

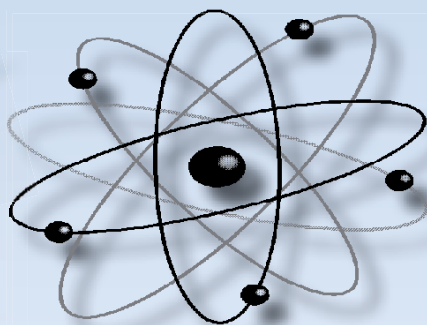
Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ 1 (57)

2022

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 , д-р техн. наук, проф.
Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»:	Сергей Николаевич Иванов , д-р техн. наук, доц.
Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина , канд. филол. наук, доц.
Технический редактор:	Татьяна Николаевна Карпова
Дизайн и верстка:	Оксана Вадимовна Приходченко , канд. техн. наук
Менеджер информационных ресурсов:	Иван Константинович Андрианов , канд. техн. наук

Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф.);
2. Энергетика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Николаевич Иванов**, д-р техн. наук, доц., **Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сариллов**, д-р техн. наук, доц., **Борис Николаевич Марьин**, д-р техн. наук, проф., **Борис Яковлевич Мокрицкий**, д-р техн. наук, доц., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
6. Металлургия и металловедение (**Владимир Алексеевич Ким**, д-р техн. наук, проф., **Олег Викторович Башков**, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Виктор Михалович Козин**, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, д-р техн. наук, проф.);
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, **Олег Евгеньевич Сысоев**, д-р техн. наук, доц.).

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, д-р культурологии, проф., **Виктория Юрьевна Прокофьева**, д-р филол. наук, проф., **Вера Ивановна Юдина**, д-р культурологии, доц., **Надежда Юрьевна Костюрина**, д-р культурологии, доц., **Илья Игоревич Докучаев**, д-р филос. наук, проф., **Александр Георгиевич Никитин**, д-р филос. наук, проф.);
2. Филология и искусствознание (**Олег Александрович Бузуев**, д-р филос. наук, проф.);
3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, д-р пед. наук, проф.);
4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, д-р полит. наук);
5. История (**Жанна Валерьяновна Петрунина**, д-р ист. наук, проф.);
6. Экономика (**Геннадий Иванович Усанов**, д-р экон. наук, проф., **Елена Витальевна Кизиль**, д-р экон. наук, доц.).

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 технологий и экономики (Венгрия)

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

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

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

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Мияки (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

КИРИЛЛ ЭМИЛЬЕВИЧ РАЗЛОГОВ, доктор искусствоведения, профессор, президент АНО «Новый институт культурологии»

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

ПОЛИТОЛОГИЯ И ПРАВО

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ МЕРЕЦКИЙ, доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин Дальневосточного государственного университета путей сообщения

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

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Лю Б., Лозовский И. В., Марьин С. Б.

B. Liu, I. V. Lozovsky, S. B. Maryin

БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЁТА И ПОСАДКИ

VERTICAL TAKEOFF AND LANDING OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

Лю Бинь – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: liubin9706@163.com.

Liu Bin – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: liubin9706@163.com.

Лозовский Иван Владимирович – старший преподаватель кафедры «Авиационное строительство» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Lozovsky@yandex.ru.

Ivan V. Lozovsky – Senior Lecturer, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Lozovsky@yandex.ru.

Марьин Сергей Борисович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Авиационное строительство» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Sergey B. Maryin – D.Sc. in Engineering, Head of Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

Аннотация. Рассмотрены существующие БПЛА вертикального взлёта и посадки. Определены основные аэродинамические схемы, и приведена классификация БПЛА вертикального взлёта и посадки.

Summary. The existing vertical takeoff and landing of UAV are considered. The main possible aerodynamic schemes of vertical take-off and landing of UAV are determined.

Ключевые слова: БПЛА, аэродинамическая схема, вертикальный взлёт.

Key words: UAV, aerodynamic scheme, vertical takeoff.

УДК 629.73

Развитие беспилотной авиационной техники связано с большими перспективами её применения. Отсутствие на борту пилота, систем жизнеобеспечения и систем управления (кабины), а также наложенных ограничений, связанных с пилотом, даёт существенный выигрыш по весовым характеристикам и способствует более эффективному и экономическому применению авиационной техники [1; 5]. Возможность вертикального взлёта и посадки БПЛА существенно расширяет область его применения.

Для вертикального взлёта и посадки БПЛА можно применить следующие аэродинамические схемы:

- вертолётная схема;
- циклолётная схема;
- реактивная схема;
- гибридная схема.

На основе рассмотренных схем сделана классификация БПЛА вертикального взлёта и посадки, которая представлена на рис. 1.

В БПЛА вертолётного типа в качестве несущей системы выступает один или несколько воздушных винтов (несущий винт). Несущий винт (винты) в большинстве конструкций имеет механизм для изменения общего и циклического шага (автомат перекося), что значительно усложняет конструкцию в целом. Беспилотные вертолёты можно разделить на следующие типы:

1. БПЛА кольцевого типа – несущий винт расположен в кольцевом канале, при этом может быть установлен один или два встречно вращающихся винта. Такие винты не имеют автомата перекоса, а управление осуществляется аэродинамическими рулями, расположенными в индуктивном потоке (FanTail фирмы ST Aerospace, Air 250).

2. Двухвинтовой вертолёт – наиболее распространённый тип вертолётов. Может быть продольной схемы (два винта, расположенные вдоль продольной оси фюзеляжа с противоположным вращением винтов, например DP-6 Whisper компании Dragonfly Pictures), поперечной схемы (два винта расположены вдоль горизонтальной оси фюзеляжа и вращаются в противоположных направлениях), соосной двухвинтовой схемы (два винта, установленные друг над другом с противоположным вращением, например KO AX X-240 фирмы Swiss UAV).



Рис. 1. Классификация БПЛА по аэродинамическим схемам

3. Многовинтовой вертолёт (мультикоптер) использует для создания подъёмной силы и управления более двух воздушных винтов. Зачастую применяются винты фиксированного шага без шарнирного крепления лопастей. Это обеспечивает простоту конструкции, эксплуатационную гибкость и низкую стоимость данного БПЛА, делает его предпочтительным выбором для гражданского применения. На сегодняшний день это преобладающий тип БПЛА вертикального взлёта и посадки [3].

Циклолёт – это летательный аппарат, использующий для создания подъёмной силы и тяги крыльчатый ротор (см. рис. 2). Принцип полёта заключается в том, что лопасти ротора сосредоточены в цилиндрической конструкции и каждая лопасть совершает вращение вдоль цилиндрической поверхности. Наиболее известной в настоящее время является платформа для электрических транспортных средств вертикального взлёта и посадки, разработанная компанией CycloTech. В настоящее время этот тип является малоизученным, но к нему проявляют большой интерес [4].

Реактивный БПЛА – БПЛА, использующий тягу турбореактивных двигателей для создания подъёмной силы. Аппарат JetQuad AB6 имеет турбореактивный двигатель, раздающий газ на четыре поворотных сопла. Они создают реактивную тягу для подъёма аппарата, а поворотом сопел осуществляется управление. Основными недостатками такой схемы являются: высокий уровень шума, высокий расход топлива, сложная, дорогая силовая установка.

Гибридный БПЛА – БПЛА, в котором используется два или более принципов создания подъёмной силы, каждый принцип зачастую используется для разных режимов полёта (взлёта, посадки, висения, горизонтального полёта). Наиболее распространённые из них имеют неподвижную конструкцию (винтокрылы) или поворотную конструкцию (конвертопланы).

На рис. 3 представлен проект грузового БПЛА вертикального взлёта и посадки. БПЛА выполнен по мультироторной схеме с грузовым контейнером в форме аэродинамической несущей поверхности (крыло малого удлинения с большой относительной толщиной). В режиме вертикального влёта и посадки подъёмная сила создаётся несущими винтами, в режиме горизонтального полёта – крылом-контейнером. Проект реализуется на кафедре «Авиационное строительство» Комсомольского-на-Амуре государственного университета [2].



Рис. 2. Циклолёт Сеульского национального университета

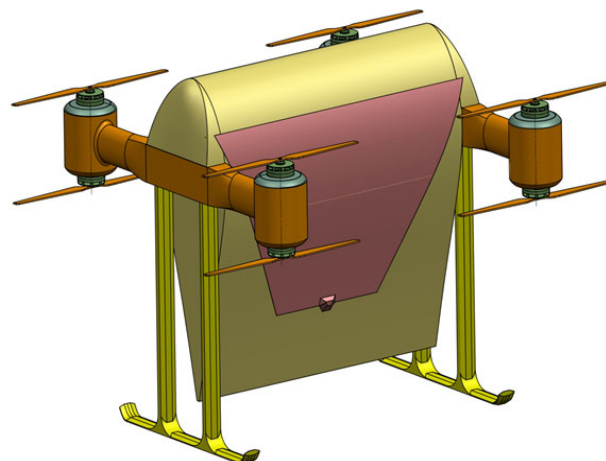


Рис. 3. Проект БПЛА вертикального взлёта-посадки с неподвижной конструкцией

Рассмотренные выше схемы показывают разнообразие БПЛА с возможностью вертикального взлёта и посадки. Многие решения уже нашли широкое применение сегодня, а также есть конструкции, которые требуют дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова, О. Р. Экономическая эффективность производства двухсредных беспилотных летательных аппаратов / О. Р. Кузнецова, В. В. Солецкий // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-2 (38). – С. 123-126.
2. Лю, Б. Грузовой БПЛА с вертикальным взлётом и посадкой / Б. Лю, И. В. Лозовский, В. В. Куриный // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 т. Т. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – С. 265-266.
3. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В. С. Фетисов, Л. М. Неугодникова, В. В. Адамовский, Р. А. Красноперов. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с. // Электронная библиотека RoyalLib.Com. – URL: https://royallib.com/read/fetisov_vladimir/bespilotnaya_aviatsiya_terminologiya_klassifikatsiya_sovremennoe_sostoyanie.html#0 (дата обращения: 14.11.2021). – Текст: электронный.
4. Крыльчатый ротор // БПЛА с крыльчатым ротором. – URL: https://blog.51cto.com/u_15353042/3746352 (дата обращения: 15.11.2021). – Текст: электронный.
5. Bobkov, A., Krivenko, M. History review of aircraft performance improvement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 939(1), 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012012.

Климаш В. С., Табаров Б. Д.
V. S. Klimash, B. D. Tabarov

РАЗРАБОТКА КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК И СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

DEVELOPMENT OF CONDENSER INSTALLATIONS AND A METHOD FOR REGULATING REACTIVE POWER IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS

Климаш Владимир Степанович – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: klimash10@mail.ru.

Vladimir S. Klimash – Doctor of Technical Sciences, Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: klimash10@mail.ru.

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.

Аннотация. Предлагается в трёхступенчатых конденсаторных установках в 1,5 раза уменьшить количество электрических и электронных аппаратов за счёт изменения соединений в силовой схеме и применения специального способа управления. Существующие установки содержат три однотипных блока конденсаторов, каждый из которых оснащён электрическим и электронным аппаратом и резисторами для их разряда. Предлагается без изменения конструктивного исполнения изделий два из этих трёх блоков соединить параллельно с применением общего электронного аппарата для подключения и отключения полученного блока конденсаторов с удвоенной ёмкостью и общего электрического аппарата в цепи разряда конденсаторов этого блока. Приводится модель в среде MATLAB для исследования динамических и стационарных процессов трёхступенчатого регулирования реактивной мощности в новой схеме конденсаторной установки. Численными экспериментами показано, что при включении и выключении установки, а также при переходе с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую предлагаемое устройство не создаёт всплесков пусковых токов. Оно после пуска практически сразу входит в установившийся режим работы и при переключении ступеней также сразу переходит с одного уровня установившихся значений токов на другой. Выключение установки без дополнительных потерь производится сначала тиристорными ключами с естественной коммутацией, а затем обесточенным сетевым выключателем, при этом не создаётся электрическая дуга на его механических контактах.

Summary. It is proposed to reduce the number of electrical and electronic devices by 1.5 times in 3-stage capacitor installations by changing connections in the power circuit and using a special control method. New principle of construction of reactive power compensators will allow, with minimal changes and additions to existing installations, to reduce the costs of their production and the cost of finished products. Existing installations contain 3 blocks of the same type of capacitors, each is equipped with an electrical and electronic apparatus and resistors for their discharge. It is proposed, without changing the design of products, to connect 2 of these 3 blocks in parallel with the use of a common electronic device for connecting and disconnecting the resulting block of capacitors with double capacity and a common electrical device in the capacitor discharge circuit of this block. A model is presented in Matlab for the study of dynamic and stationary processes of 3-stage reactive power regulation in a new scheme of a capacitor plant. Numerical experiments have shown that when the installation is turned on and off, as well as when switching from one stage of reactive power regulation to another, the proposed device does not create bursts of inrush currents. After starting, it almost immediately enters the steady-state operation



mode and when switching stages, it also immediately switches from one level of the steady-state values of such to another level of their steady-state values. The installation is switched off without switching losses and without arcing on mechanical contacts, since thyristor switches with natural switching are switched off first, and then a de-energized mains switch.

Ключевые слова: блоки конденсаторов, способ трёхступенчатого регулирования, тиристорный пускатель, системы управления, сетевой выключатель.

Key words: capacitor blocks, three-stage regulation method, thyristor starter, control systems, network switch.

УДК 621.314

Введение. Для разгрузки электрических сетей от реактивной мощности, снижения потерь электроэнергии и выравнивания напряжения у потребителей применяют конденсаторные установки [1-8]. Мощность устанавливаемых блоков конденсаторов выбирают с учётом графика электрических нагрузок. В настоящее время достаточно широко применяется трёхступенчатое регулирование реактивной мощности конденсаторными установками, в которых число ступеней регулирования реактивной мощности равно количеству блоков конденсаторов, имеющих одинаковые параметры [9-12].

Включение и выключение конденсаторной установки производится сетевым выключателем, а включение и выключение батарей конденсаторов между ступенями регулирования реактивной мощности осуществляется при помощи тиристорных ключей.

Недостатком существующих конденсаторных установок с трёхступенчатым способом регулирования реактивной мощности является применение большого количества коммутационных аппаратов, что сопряжено с увеличением затрат на их производство.

Устранению этого недостатка посвящена данная работа, в которой предлагается новая схема конденсаторной установки со специальным способом трёхступенчатого регулирования реактивной мощности.

Целью работы является уменьшение количества коммутационных аппаратов при трёхступенчатом регулировании реактивной мощности конденсаторной установкой за счёт изменения силовой схемы и введения новых операций в способ управления с изменённой последовательностью между существующими и вновь введёнными операциями.

Для достижения поставленной цели ставились и решались следующие задачи:

- разработка способа и устройства трёхступенчатого регулирования реактивной мощности;
- моделирование и проверка функционирования принципов построения двухкомплектной конденсаторной установки с трёхступенчатым регулированием реактивной мощности.

В результате решения поставленных задач и достижения поставленной цели уменьшено количество электрических и электронных аппаратов в 1,5 раза [13].

Следует отметить, что положительный результат, полученный на примере двухкомплектной конденсаторной установки с трёхступенчатым регулированием, был распространён на трёхкомплектную конденсаторную установку с семиступенчатым регулированием, для которой, кроме повышения точности регулирования реактивной мощности, уменьшено количество электрических и электронных аппаратов в 2,3 раза [14].

Поставленная в данной работе цель достигнута тем, что ёмкость второго блока конденсаторов в два раза больше, чем у первого, при этом включение второй ступени регулирования реактивной мощности производится при завершении отключения первого блока конденсаторов, а включение третьей ступени производится подключением первого блока конденсаторов параллельно ко второму блоку конденсаторов.

На рис. 1 в однолинейном исполнении приведена функциональная схема системы электроснабжения с конденсаторной установкой. Схема (см. рис. 1) состоит из сети (G), линии электропередачи (ЛЭП), выключателя нагрузки (QN) и выключателя конденсаторной установки (Q_{KY}), в состав которой также входят два блока конденсаторов (БК-1 и БК-2) в комплекте с

резистивными блоками разряда конденсаторов (РБ-1 и РБ-2), тиристорными пускателями (ТП-1 и ТП-2), выполненными на тиристорных ключах с естественной коммутацией. Система управления (СУ) конденсаторной установкой имеет трёхфазный синхронизирующий вход, управляющий вход с сигналом управления U_y и восемь выходов 1-8, подключённых к цепям управления соответствующих тиристорных ключей и блоков разряда конденсаторов.

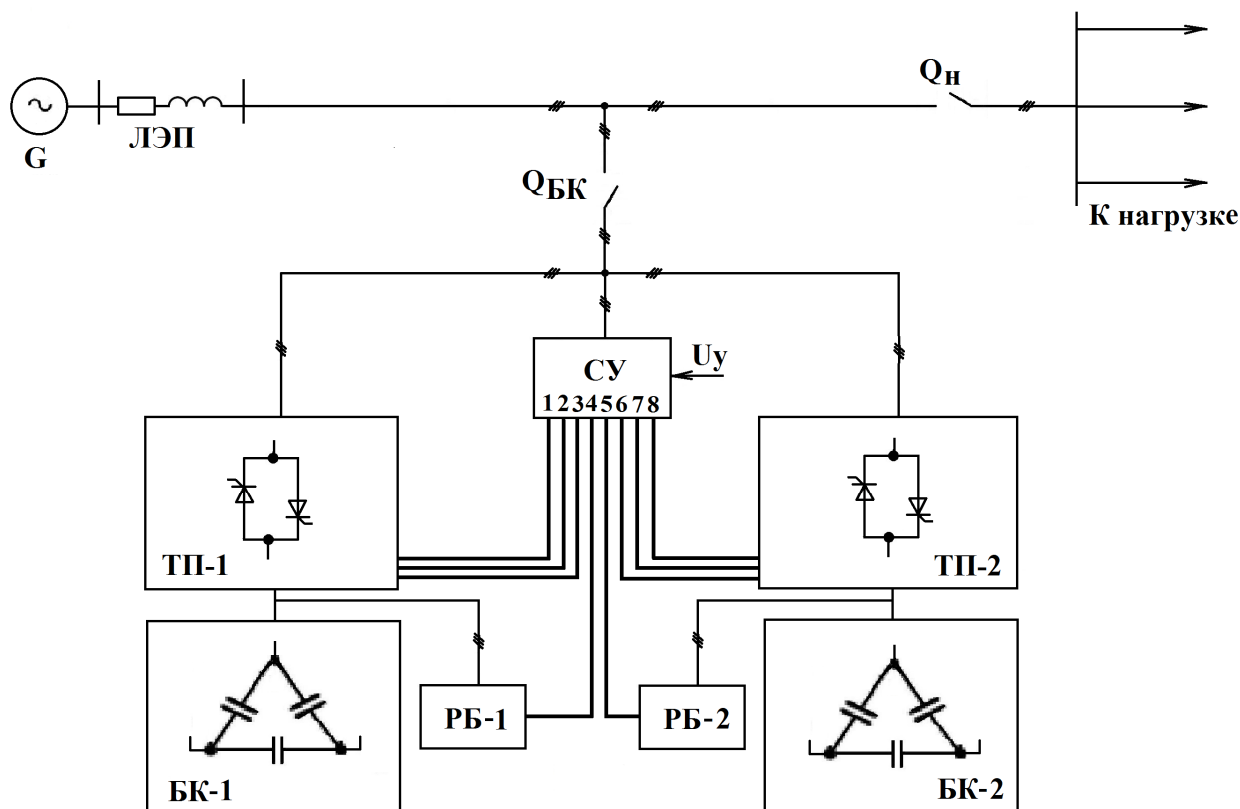


Рис. 1. Функциональная схема двухкомплектной конденсаторной установки с трёхступенчатым регулированием реактивной мощности

Принцип действия предлагаемого способа и устройства

Суть предлагаемого способа трёхступенчатого регулирования реактивной мощности в новой схеме конденсаторной установки заключается в последовательности выполнения известных и вновь введённых операций, описание которых поясняет принцип действия.

Первая операция способа заключается в подготовке к работе силовой части конденсаторной установки и предвключении микроэлектронной системы управления. Для этого в произвольный момент времени выключателем $Q_{БК}$ подают напряжение на тиристорные пускатели ТП-1, ТП-2 и систему управления.

Вторая операция способа заключается во включении первой ступени. Выполняется подключением к сети первого блока конденсаторов БК-1 посредством первого тиристорного пускателя ТП-1 при выключенном втором блоке конденсаторов. Сначала включают два тиристорных ключа, например, ТК-2 и ТК-3 для фаз «В» и «С» в момент перехода через ноль линейного напряжения между фазами «В» и «С» сети, а затем включают оставшийся тиристорный ключ ТК-1 пускателя в момент перехода через ноль напряжения фазы «А» сети. Включение тиристорных ключей ТК-1, ТК-2 и ТК-3 производят подачей импульсов управления соответственно с выходов 1, 2 и 3 системы управления.

Третья операция способа заключается во включении второй ступени. Выполняется подключением к сети второго блока конденсаторов БК-2 вторым тиристорным пускателем ТП-2 и отключением первого блока конденсаторов первым тиристорным пускателем ТП-1. Отключение

первого тиристорного пускателя производится снятием импульсов управления с его тиристорных ключей ТК-1, ТК-2, ТК-3 и соответственно с выходов 1, 2 и 3 системы управления. При подключении к сети второго блока батареи конденсаторов вторым тиристорным пускателем сначала включают два тиристорных ключа, например, ТК-5 и ТК-6 для фазы «В» и «С» в момент перехода через ноль линейного напряжения между фазами «В» и «С» сети, а затем включают оставшийся тиристорный ключ ТК-4 второго пускателя в момент перехода через ноль фазного напряжения фазы «А» сети. Включение тиристорных ключей ТК-4, ТК-5 и ТК-6 производится подачей импульсов управления соответственно с выходов 6, 7 и 8 системы управления.

Четвёртая операция способа заключается во включении третьей ступени. Выполняется подключением первой блока конденсаторов БК-1 посредством первого тиристорного пускателя ТП-1 параллельно подключённой к сети второго блока батареи конденсаторов БК-2. Эта операция способа выполняется по алгоритму, аналогичному второй его операции.

Поочерёдное отключение трёх ступеней регулирования реактивной мощности и выключение конденсаторной установки производятся также в четыре операции, но в обратной последовательности.

Моделирование двухкомплектной конденсаторной установки с трёхступенчатым регулированием реактивной мощности

Цель моделирования:

- проверка функционирования трёхступенчатого регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой, содержащей два комплекта конденсаторных блоков с коммутационными аппаратами;
- исследование физических процессов при новом способе трёхступенчатого регулирования реактивной мощности.

Для исследования предлагаемой схемы конденсаторной установки разработана модель в среде MATLAB [15]. Она представлена на рис. 2 и содержит трёхфазную сеть с однофазными источниками питания U_a , U_b и U_c , линию электропередачи ЛЭП, блок выключателя Q_n активно-индуктивной нагрузки Z_n , блок выключателя $Q_{БК}$ конденсаторной установки, первый БК-1 и второй БК-2 блоки конденсаторов с резистивными блоками разряда конденсаторов РБ-1 и РБ-2, модуль первого тиристорного пускателя ТП-1 с тиристорными ключами ТК-1 – ТК-3, модуль второго тиристорного пускателя ТП-2 с тиристорными ключами ТК-4 – ТК-6 и синхронизированный и фазированный с сетью блок системы управления СУ, измерительные датчики тока, напряжения и другие вспомогательные элементы.

На рис. 3 приведены результаты исследования на модели двухкомплектной трёхступенчатой конденсаторной установки, предназначенной для компенсации реактивной мощности. Здесь введены следующие обозначения: i_{cA} , i_{cB} и i_{cC} – мгновенные значения фазных токов сети; i_{kA} , i_{kB} и i_{kC} – мгновенные значения фазных токов конденсаторов; u_{cA} и i_{cA} – мгновенные значения фазного напряжения и тока сети; Т-1, Т-2 и Т-3 – интервалы работы первой, второй и третьей ступеней соответственно.

Осциллограммы (см. рис. 3) иллюстрируют изменение трёхфазных токов сети и конденсаторов, а также изменение в одной фазе мгновенных значений напряжения и тока сети при неизменной нагрузке и увеличении ёмкости конденсаторной установки в процессе переключения в соответствии с операциями способа трёх ступеней компенсации реактивной мощности.

На интервале времени Т-1 (см. рис. 3) СУ подаёт управляющие импульсы на тиристорные ключи первого пускателя ТП-1 и подключают к сети первый блок конденсаторов БК-1 (первая ступень регулирования). В конце интервала времени Т-1 и начале интервала Т-2 в результате того, что СУ снимает управляющие импульсы с тиристорных пускателя ТП-1 и подаёт управляющие импульсы на модуль тиристорных пускателя ТП-2 взамен первому блоку конденсаторов БК-1, вводится в работу второй блок БК-2 (вторая ступень регулирования). Блок конденсаторов БК-2 работает на интервалах времени Т-2 и Т-3. В начале временного интервала Т-3 ко второму блоку конденсаторов БК-2 тиристорным пускателем ТП-1 подключается первый блок конденсаторов БК-1 (третья ступень регулирования).

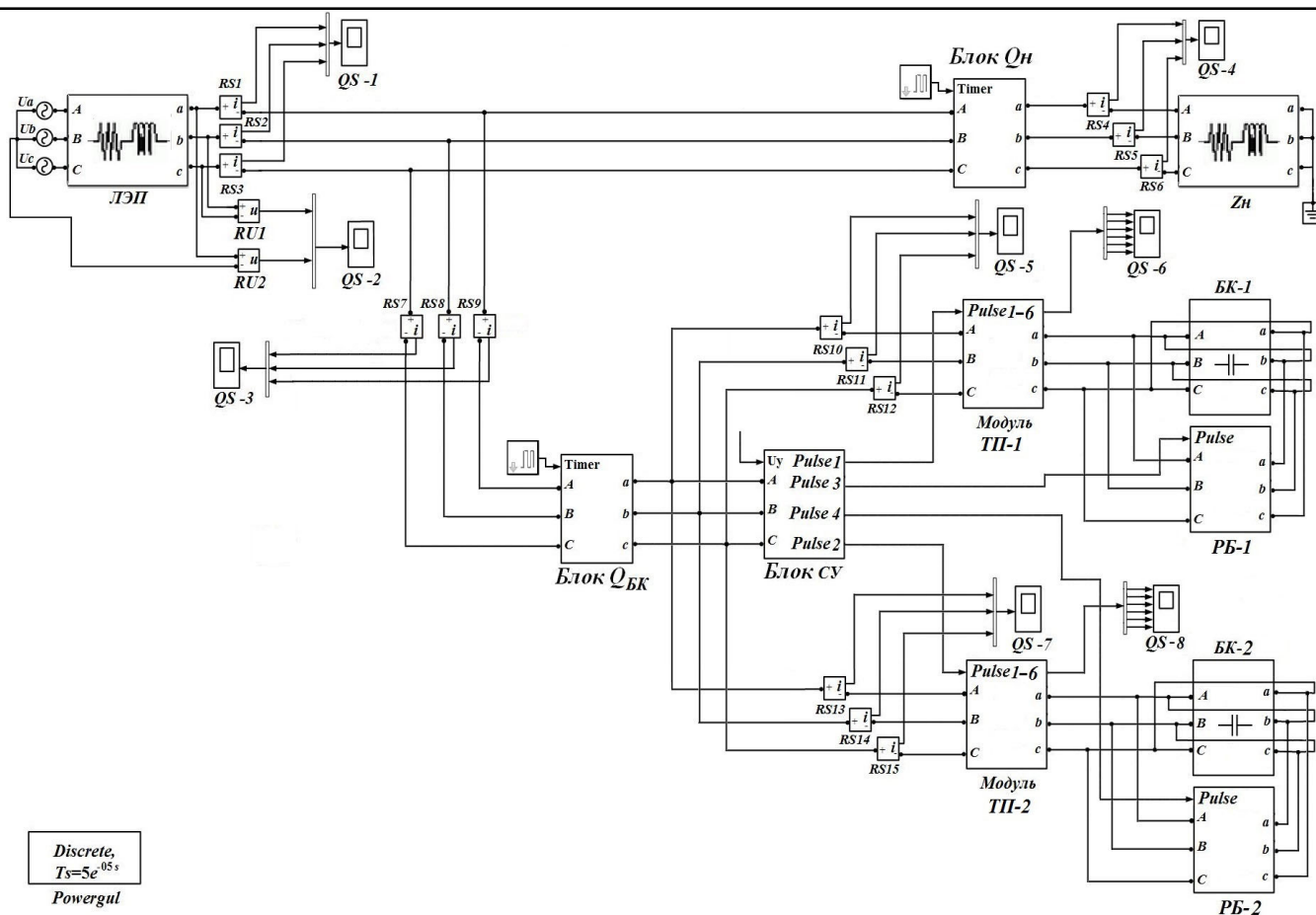


Рис. 2. Блочномодульная модель двухкомплектной конденсаторной установки с трёхступенчатым регулированием реактивной мощности

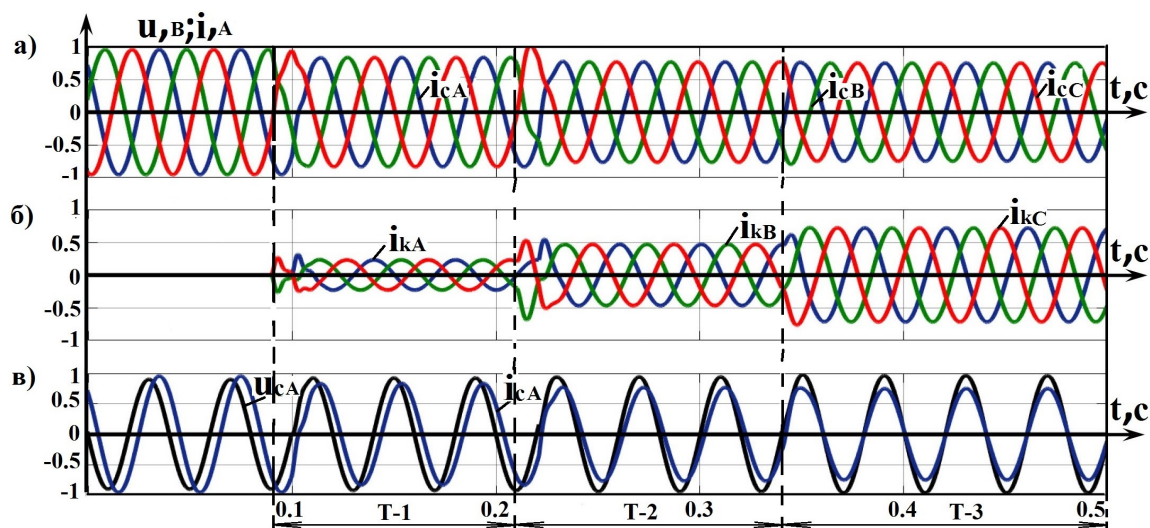


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжения при трёхступенчатом увеличении ёмкости до полной компенсации реактивной мощности:
 а – токи сети; б – токи конденсаторов; в – ток и напряжение одной фазы сети

Осциллограммами (см. рис. 3) показано, что подключение конденсаторной установки и переключение между ступенями конденсаторов выполняются без скачков токов и с мягким переходом от одного установившегося уровня к другому. На рис. 4 приведены осциллограммы действующих значений напряжения сети и токов конденсаторной установки и сети при подключении трёх ступеней регулирования реактивной мощности для одной фазы на интервалах (Т-1, Т-2 и Т-3) работы трёх ступеней конденсаторной установки. Здесь можно наблюдать за повышением напряжения и снижением тока сети (U_{CA} и I_{CA}) при увеличении тока конденсаторной установки (I_{KA}) до полной компенсации реактивной мощности.

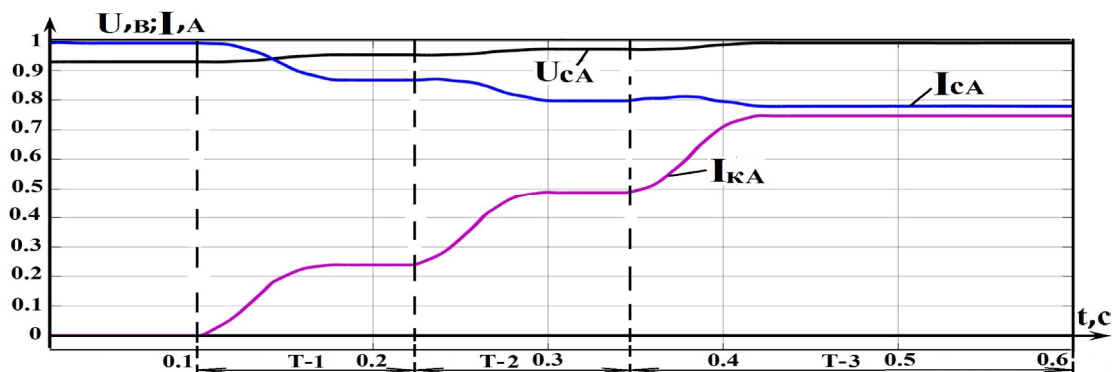


Рис. 4. Осциллограммы напряжения и токов одной фазы при трёхступенчатом увеличении ёмкости до полной компенсации реактивной мощности:
 U_{CA} и I_{CA} – напряжение и ток сети; I_{KA} – ток конденсаторной установки

На рис. 5 приведены результаты исследования трёхфазной системы токов сети и конденсаторов, а также фазного напряжения сети при переключении трёх ступеней в сторону уменьшения ёмкости конденсаторной установки. На осциллограмме (см. рис. 5) введены следующие обозначения: i_{cA} , i_{cB} и i_{cC} – мгновенные значения фазных токов сети; i_{kA} , i_{kB} и i_{kC} – мгновенные значения фазных токов конденсаторов; u_{cA} и i_{cA} – мгновенные значения фазного напряжения и тока сети; Т-3, Т-2 и Т-1 – интервалы работы третьей, второй и первой ступеней соответственно.

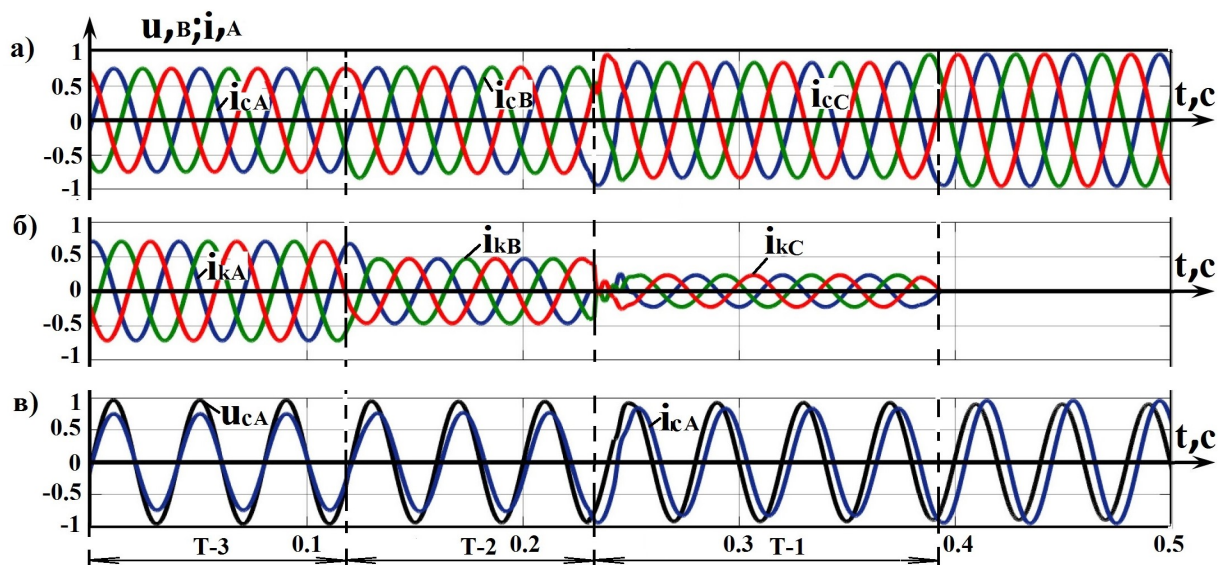


Рис. 5. Осциллограммы токов и напряжения при трёхступенчатом уменьшении ёмкости конденсаторов трёхфазной установки:
а – токи сети; б – токи конденсаторов; в – ток и напряжение одной фазы сети

Как отмечалось выше, осциллограммы (см. рис. 5) иллюстрируют операции способа трёхступенчатого регулирования реактивной мощности двухкомплектной конденсаторной установкой, но в обратной последовательности (от Т-3 к Т-1), т.е. на интервале времени Т-3 оба блока конденсаторов (БК-1 и БК-2) находятся в работе (третья ступень регулирования). В начале интервала времени Т-2 СУ снимает управляющие импульсы с модуля тириستоров ТК-1 для отключения конденсаторов БК-1, и на этом интервале времени в работе остаются только конденсаторы блока БК-2 (вторая ступень регулирования). В конце интервала времени Т-2 и начале интервала Т-1 СУ подаёт управляющие импульсы на модуль тиристоров ТК-1 и одновременно снимает управляющие импульсы с модуля тиристоров ТК-2 для переключения с блока БК-2 на блок БК-1, переводя установку на первую ступень регулирования.

Как видно из осциллограммы, приведённой на рис. 5, переключение ступеней регулирования реактивной мощности в обратной последовательности (от Т-3 к Т-1) выполняется практически без превышения токами их установившихся значений и практически сразу производится переход от одного установившегося уровня к другому.

На рис. 6 приведены осциллограммы действующих значений токов и напряжения при отключении трёх ступеней регулирования реактивной мощности для фазы «А» на интервалах (Т-3, Т-2 и Т-1) работы трёх ступеней конденсаторной установки. Здесь можно наблюдать за изменением действующих значений фазного напряжения и тока сети, а также фазного тока конденсаторной установки.

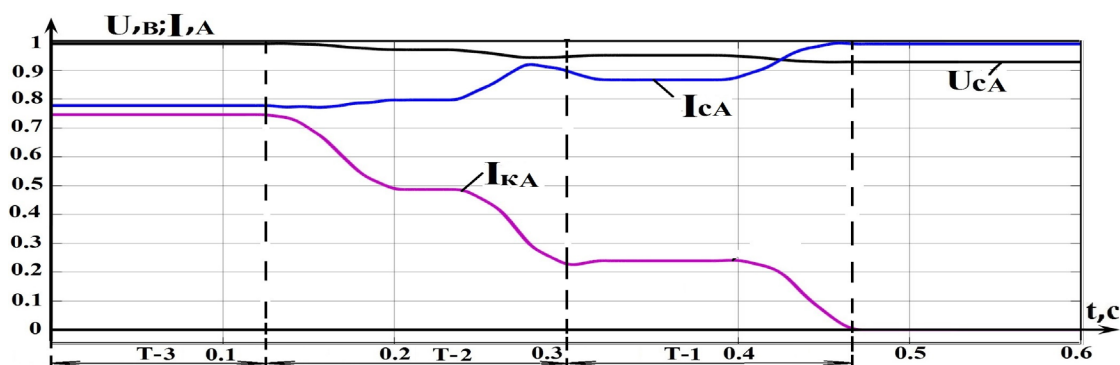


Рис. 6. Осциллограммы напряжения и токов одной фазы при трёхступенчатом уменьшении ёмкости конденсаторов трёхфазной установки:

$U_{сА}$ и $I_{сА}$ — напряжение и ток сети; $I_{кА}$ — ток конденсаторной установки

Из осциллограмм при трёхступенчатом регулировании реактивной мощности новой схемой конденсаторной установки видно, что при первоначальном включении первой или третьей ступеней и переходе с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую токи не превышают своих установившихся значений. Выключение установки сначала выполняется тиристорами с естественной коммутацией, а затем обесточенным выключателем конденсаторной установки. Это происходит без возникновения дуги на контактах выключателя и, следовательно, без коммутационных потерь.

Целесообразной областью применения предлагаемого способа являются системы электроснабжения с протяжёнными линиями электропередач. Предлагаемый способ как более совершенный может заменить известные способы регулирования в устройствах с прямой компенсацией реактивной мощности.

Заключение

По результатам исследования новой схемы конденсаторной установки с трёхступенчатым регулированием реактивной мощности и уменьшенным количеством электрических и электронных аппаратов в 1,5 раза можно сделать следующие выводы:

1. Применение трёхступенчатого регулирования реактивной мощности в новой схеме конденсаторной установки не создаёт всплесков пусковых токов при включении и выключении



установки, а также при выполнении операции специального способа регулирования реактивной мощности.

2. В процессе переключения с одной ступени на другую токи, потребляемые из сети, практически сразу переходят с одного установившегося значения на другое. Кроме этого, выключение блоков конденсаторов при переходе с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую выполняется путём естественной коммутации тиристоров, не создавая коммутационных потерь.

3. При отключении конденсаторной установки от сети благодаря тем же естественным свойствам отключение выключателя конденсаторной установки производится в обесточенном состоянии, т.е. без возникновения электрической дуги на его контактах.

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. Солодухо, 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. Солодухо. – М.: Информэлектро, 1981. – 89 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. pp. 414-423. doi: 10.1109/TIA.1983.4504217.
8. Кабышев, А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учеб. пособие / А. В. Кабышев; Томский политехнический университет. – 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, pp. 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 № 2749606 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/18 (2006.01). Способ трехступенчатого регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой: № 2020128868/07; заявлено 31.08.2020; опубликовано 16.06.2021 / В. С. Климаш, Б. Д. Табаров, Р. Р. Ниматов, Е. М. Антонов; патентообладатель ФГБОУ ВО «Дальневосточный университет путей сообщения». – 11 с.
14. Блочномодульная 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.
15. Патент № 2746796 Российская Федерация, МПК Н 02 М 3/18 (2006.01). Способ регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой: № 2020133987/07; заявлено 15.10.2020; опубликовано 21.04.2021 / С. В. Климаш, А. М. Константинов, Б. Д. Табаров, В. С. Климаш; патентообладатель ФГБОУ ВО «Дальневосточный университет путей сообщения». – 13 с.

Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л., Канашин И. В., Петрова А. Н., Хромов А. И.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л., Канашин И. В., Петрова А. Н., Хромов А. И.
Yu. Ya. Grigoriev, A. L. Grigorieva, I. V. Kanashin, A. N. Petrova, A. I. Khromov

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF DEFORMATION OF ELEMENTS, MADE
FROM STRUCTURAL MATERIALS USING MACHINE LEARNING**

Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

Yan Yu. Grigoriev – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs of the Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: naj198282@mail.ru.

Anna L. Grigoryeva – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: naj198282@mail.ru.

Канашин Илья Валерьевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

Ilya V. Kanashin – Post-Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

Петрова Анна Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

Anna N. Petrova – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, of Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

Хромов Александр Игоревич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

Khromov Alexander Igorevich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

Аннотация. В данном научном исследовании представлена математическая модель, описывающая процесс деформирования образца конструкционного материала классическим методом и с помощью элементов машинного обучения.

Summary. This scientific study presents a mathematical model describing the process of deformation of a structural material sample using a classical method and using machine learning elements.

Ключевые слова: математическое моделирование, нейронные сети, механика деформируемого твёрдого тела, поле тензора перемещений, деформация.

Key words: mathematical modeling, neural networks, mechanics of deformable solids, displacement tensor field, deformation.

УДК 004.021:004.93'11

Необходимость данного исследования связана с актуальностью аналитической оценки состояния элементов конструкции при их деформировании, которые изготавливаются на промышленных предприятиях Хабаровского края. Представителями данных предприятий являются КнААЗ, ЗЛК.

В статье представлены возможность прогнозирования состояния деформационных полей в различных критических точках этих элементов, а также проверка полученных решений с помощью элементов машинного обучения на основе нейронных сетей.

Введение

В настоящее время в промышленном судо- и авиастроении используется множество новейших материалов, которые могут сильно отличаться друг от друга.

При изготовлении фюзеляжа, хвостового оперения и крыльев самолёта используют алюминий и его сплавы. Он идеально для этого подходит прежде всего из-за своего небольшого веса, а также из-за широких возможностей менять свои свойства в сочетании с различными добавками (см. рис. 1).

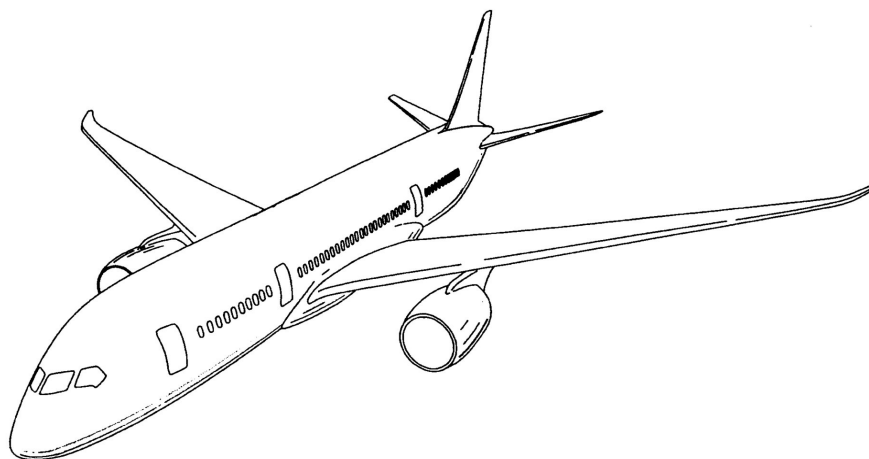


Рис. 1. Воздушное судно

Острой проблемой анализа состояния элементов конструкций является двигателестроение, в частности, для различных авиа- и водных судов.

При более детальном рассмотрении деформирования элементов двигателя при его эксплуатации возникают проблемные области, в которых наблюдается образование микротрещин под воздействием нагрузок. Пример части такого двигателя изображён на рис. 2.

Также активно используются металлические конструкции для изготовления деталей водных судов, как морских, так и речных, которые подвержены механическим и коррозионным воздействиям, так же как и деформационным (см. рис. 3).

Для решения вышеперечисленных проблем была разработана методика, описываемая математической моделью, с помощью которой можно не только увидеть малые деформации, приводящие к разрушению конструкции, но и предсказать образование и распространение трещины в зоне концентрации напряжений.

Постановка задачи

Алгоритм предложенного метода представлен в виде схемы на рис. 4.

На данном рисунке выделены основные этапы решения поставленной задачи:

1. аналитическое решение;
2. решение на программном комплексе MSC.Patran;
3. применение нейронных сетей для проверки полученных результатов;

4. создание программного комплекса для анализа полученных данных;
5. оценка погрешностей при различных подходах определения поля деформаций и проблемных областей.

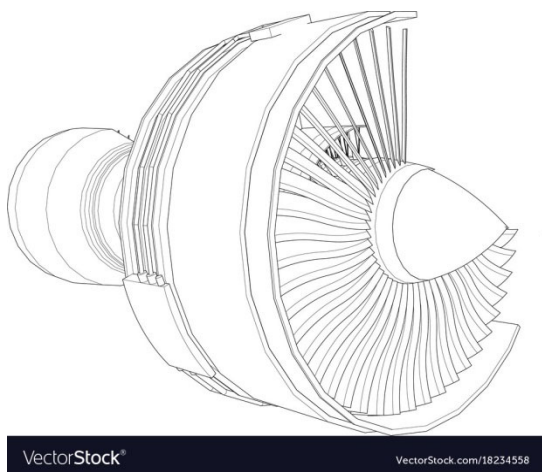


Рис. 2. Двигатель самолёта



Рис. 3. Характеристики разрушения водных судов

Решение задачи

Для решения поставленной задачи нами предлагается рассмотреть плоский образец, который является частью конструкции оболочечного типа (см. рис. 5). Материал, из которого изготовлен данный образец, соответствует материалу, из которого изготовлено изделие (алюминий для воздушного судна, стали марки А32).



Рис. 4. Алгоритм решения задачи

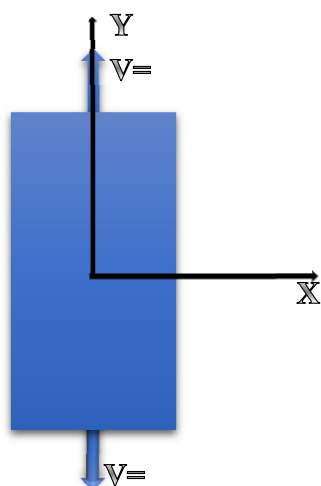


Рис. 5. Растяжение плоского образца

В связи с данной постановкой задачи будет рассмотрено плоское напряжённое состояние. Экспериментальный образец имеет прямоугольную форму вида, представленного на рис. 5.

Размеры данного образца: ширина – a_0 , длина – b_0 , толщина – c_0 . Так как выполняется соотношение $a_0 \gg c_0$, $b_0 \gg c_0$, то применим теорию для плоского напряжённого состояния.

При решении данной задачи было найдено поле скоростей деформаций, которое возникает от воздействия различных нагрузок как на обшивку фюзеляжа, особенно в местах клёпки конструкций (при нарушении целостности листа), так и в двигателях (на лопатках турбин), а также на корпусе водных судов.

Представим основные этапы исследования поставленной проблемы.

Шаг 1. Решение системы уравнений для получения

аналитической функции

Для определения поля скоростей деформаций и напряжений в зависимости от воздействия нагрузки необходимо решить систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2 = 3k^2 \\ \frac{\frac{\partial V_x}{\partial x}}{2\sigma_x - \sigma_y} = \frac{\frac{\partial V_y}{\partial y}}{2\sigma_y - \sigma_x} \\ \frac{\frac{\partial V_x}{\partial x}}{2\sigma_x - \sigma_y} = \frac{\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y}}{6\tau_{xy}} \end{array} \right.$$

Начальные условия: при $y = 1$ имеем $\sigma_y = 2k$; при $y = -1$ имеем $\sigma_y = 2k$.

Граничные условия имеют вид:

- при $y = 0$ имеем $V_x = 0$;
- при $x = 0$ имеем $V_y = 0$;
- при $y = 1$ имеем $V_x = V$;
- при $x = a$ имеем $V_y = \text{const}$,

где k – предел текучести материала, экспериментального образца.

В области авиастроения активно используется алюминий В95пч – высокопрочный термоупрочняемый сплав алюминия с цинком, магнием и медью. Это самый прочный из наиболее известных сплавов алюминия. Широко применяемый высокопрочный сплав в виде катаных и пресованных длинномерных (до 30 м) полуфабрикатов для верхних обшивок крыла (плиты, листы), стрингеров, балок, стоек (профили, трубы) и других элементов фюзеляжа и крыла современных самолётов (Ту-204, Бе-200, Ил-96) [1].

Решение представленной задачи получено в виде схемы, изображённой на рис. 6.

Из представленного решения можно сделать вывод, что разрушение материала на корпусе изделия будет наступать при достижении величины первого главного значения тензора Альманси E_1 значения 0,5. Аналитически данное предположение можно увидеть в формуле

$$\lim_{\delta \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2} \left(1 - (1 - \delta)^{-1 - \frac{\sqrt{2}}{2}} \right) \right) = 0,5.$$

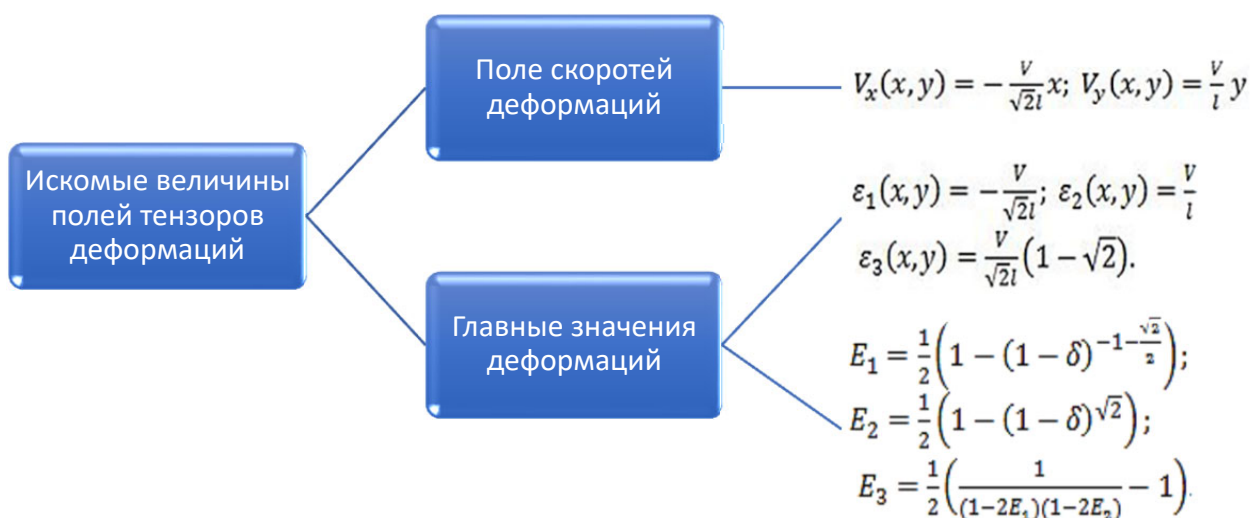


Рис. 6. Поля деформаций при аналитическом решении

На графике (см. рис. 7) данная зависимость изображена графически.

Шаг 2. Альтернативное численное решение данной задачи

Следующим шагом решения данной многоуровневой задачи является получение численно-го поля решений с помощью программного комплекса MSC.Patran модуле Nastran.

Рассматривается полоса из алюминия В95пч, имеющая размеры 1200×5000 мм и толщину 12 мм согласно ГОСТ 13616-97.

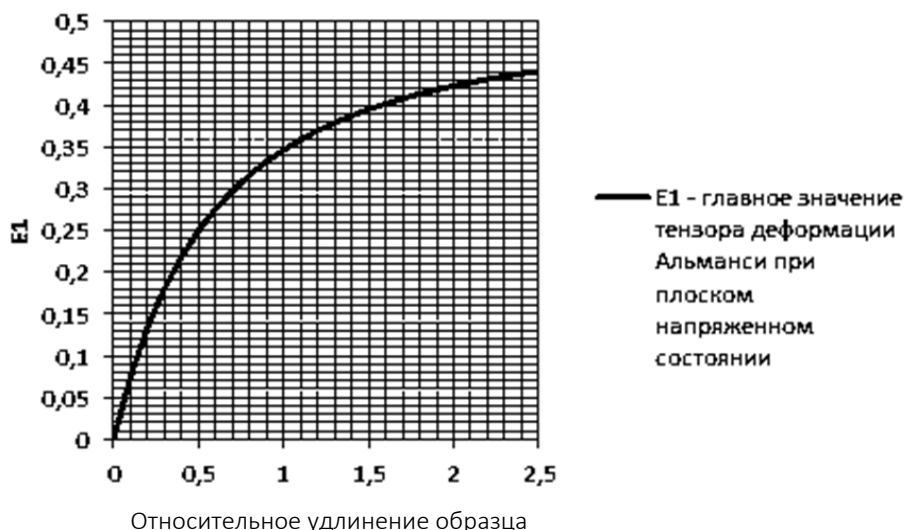


Рис. 7. Динамика изменения деформации

Задавая граничные и реальные условия для данного образца (см. рис. 8), получаем различные состояния и поля деформаций, напряжений и перемещений, представленные на рис. 9-10.

При помощи численных решений были получены следующие экспериментальные данные, представленные в табл. 1.

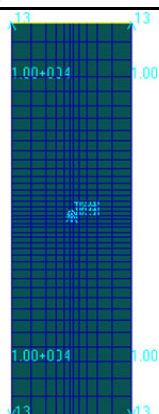


Рис. 8. Начальное состояние растягиваемого образца

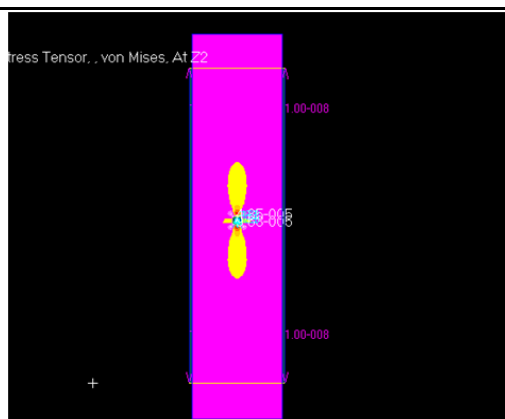


Рис. 9. Полученное поле напряжений

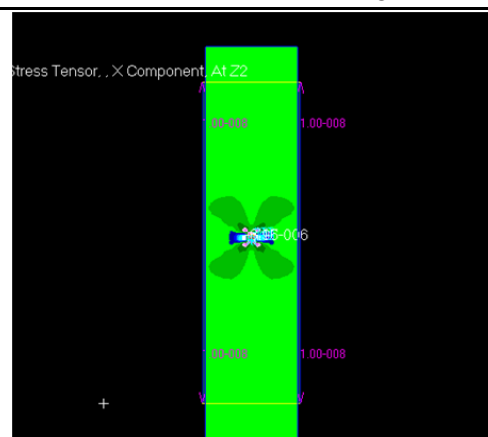


Рис. 10. Полученное поле скоростей деформаций

Таблица 1

Экспериментальные данные растяжения образца

Номер эксперимента	Деформация	Относительное удлинение образца	Номер эксперимента	Деформация	Относительное удлинение образца
1	0	0	6	0,249756145	0,5
2	0,075078926	0,1	7	0,275862049	0,6
3	0,133731844	0,2	8	0,297898709	0,7
4	0,18051054	0,3	9	0,316687289	0,8
5	0,218477025	0,4	10	0,332849438	0,9

Шаг 3. Поиск решения данной задачи с помощью нейронных сетей

Для более адекватной оценки полученного решения были использованы современные технологии. С помощью нейронных сетей были проанализированы имеющиеся данные. Решения представлены на рис. 11.

Данные решения графически были соотнесены с аналитическим решением, построены графики функций, представленные на рис. 12 и 13. Из полученных выше графиков видно, что оба способа практически не дают погрешности.

Шаг 4. Создание программного комплекса

Для комплексного использования всех приведённых выше решений был создан программный комплекс, проводящий анализ полученной задачи и определяющий целесообразность аналитического и численного решения. Общий вид программного комплекса представлен на рис. 14.

x_train= tor	[0.431417],	
[0.075482],	[0.434927],	
[0.134079],	[0.438160],	
[0.180813],	[0.441146],	
[0.218744],	[0.443909],	
[0.249993],	[0.446472],	
[0.276074],	[0.448854],	
[0.298090],	[0.451073],	
[0.316861],	[0.453142],	
[0.333000],	[0.455076],	
[0.347008],	[0.456887],	
[0.359234],	[0.458584],	
[0.369981],	[0.460178],	
[0.379482],	[0.461677],	
[0.387928],	[0.463088],	
[0.395472],	[0.464419],	
[0.402241],	[0.465675],	
[0.408341],	[0.466862],	
[0.413858],	[0.467985],	
[0.418867],	[0.469050],	
[0.423429],	[0.470059],	
[0.427597],	[0.471017],	
[0.431417],	[0.471927],	
[0.434927],	[0.472793],	
[0.438160],	[0.473617],	
[0.441146],	[0.474402],	
[0.443909],	[0.475151],	
[0.446472],	[0.475865],	
[0.448854],	[0.476548],	
[0.451073],	[0.476675]]	

Шаг	Значение
0,1	0,000474900064889355
0,2	0,0754820038807335
0,3	0,134079285777378
0,4	0,180813608004741
0,5	0,21874407744521
0,6	0,249993526256596
0,7	0,27607466611467
0,8	0,29809042222428
0,9	0,316861179626295
1	0,333007996761516
1,1	0,347008433984346
1,2	0,359234867542151
1,3	0,369981318817901
1,4	0,379482588506809
1,5	0,387928122389583
1,6	0,395472214484188
1,7	0,402241614458306
1,8	0,408341271143598
1,9	0,413858718283514
2	0,418867458761095
2,1	0,423429601443894
2,2	0,427597934259546
2,3	0,431417567692423
2,4	0,434927247972773
2,5	0,438160413963728
2,6	0,44114605364315
2,7	0,443909402597559
2,8	0,446472517177955
2,9	0,448854747431682
3	0,451073129488009
3,1	0,453142712627272
3,2	0,45507683360205
3,3	0,45688734716047
3,4	0,458584821184328
3,5	0,46017870222108
3,6	0,461677456559035
3,7	0,4630886908944
3,8	0,464419255910892
3,9	0,46567533549487
4	0,46686252382862

Рис. 11. Численное решение с помощью нейронных сетей

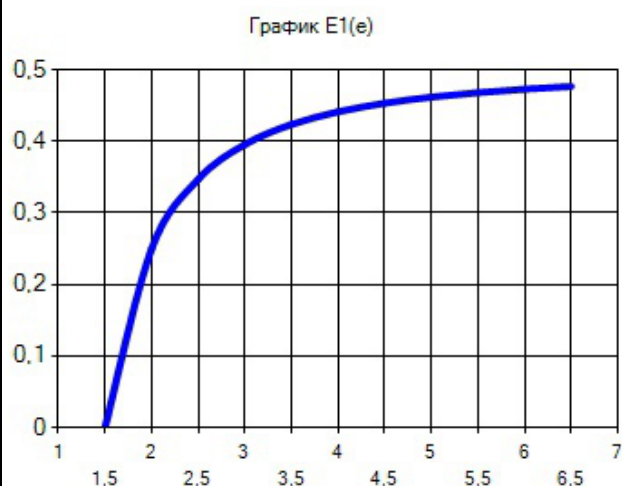


Рис. 12. Аналитическое решение задачи

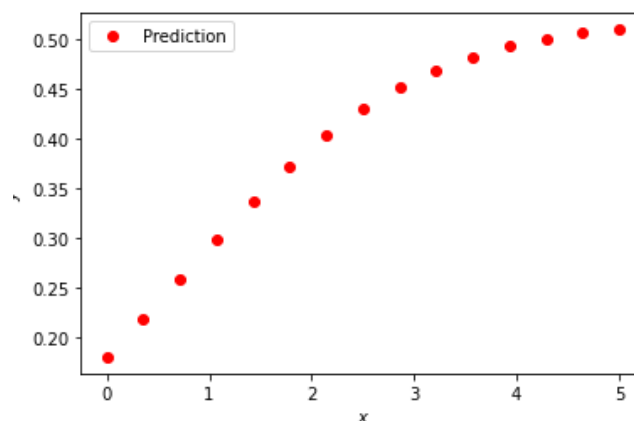


Рис. 13. Данные полученные с помощью нейронных сетей

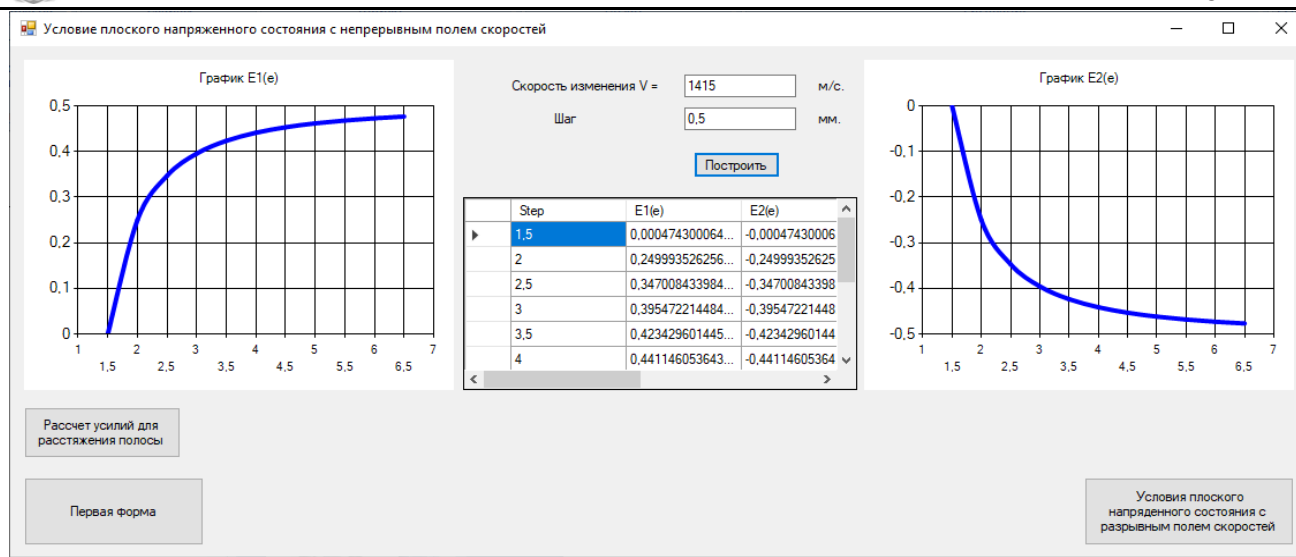


Рис. 14. Программный комплекс

Заключение

Данная статья показывает, что можно спрогнозировать развитие микротрещин на поверхности и внутри определённых видов металла. В работе была рассмотрена полоса, изготовленная из алюминия, который является строительным материалом для самолётов различных сообщений, а также для элементов конструкций. В самолёто- и кораблестроении очень важно иметь возможность аналитически оценивать состояния элементов конструкций, изготавливаемых на промышленных предприятиях края (КнААЗ, ПАО «Амурский судостроительный завод»), заранее прогнозировать состояние этих элементов, а также избегать проблем, связанных с эксплуатацией крупных технических систем. Именно с данной задачей связана актуальность научной работы. С помощью предложенного аналитического решения можно определить то критическое состояние, в котором может оказаться обшивка корабля. Данным критерием оценки надёжности предлагается использовать первое значение тензора деформации Альманси и в зависимости от относительных удлинений и нагрузок применять корректирующие меры. С помощью нейронных сетей анализ результатов осуществляется более точно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мокшанов, А. С. Металлы и их сплавы, применяемые в авиастроении / А. С. Мокшанов, А. А. Панюжев // Траектория научно-технологического развития России с учётом глобальных трендов: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 29 ноября 2019 г. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2019. – С. 138-142.
2. Развитие техники и технологии испытания баллистических шлемов / Е. А. Чернышов, И. Д. Романов, А. Д. Романов, Р. О. Горбатов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (37). – С. 100-107.
3. Амосов, О. С. Создание интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы безопасности вуза нового поколения: о новом проекте Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета / О. С. Амосов, С. Г. Баена, Я. С. Иващенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № I-1 (29). – С. 119-120.
4. Амосов, О. С. Сетевая классификация атак в задачах информационной безопасности на основе интеллектуальных технологий, фрактального и вейвлет-анализа / О. С. Амосов, Д. С. Магола, С. Г. Баена // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № IV-1 (32). – С. 19-29.
5. Моделирование деформационных процессов элементов сложных конструкций в условиях малоцикло-вой деформации / А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев, А. И. Хромов, И. В. Канахин // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 123-128.

6. Хромов, А. И. Поверхность нагружения, связанная с линиями уровня поверхности деформаций несжимаемого жёсткопластического тела / А. И. Хромов, Е. П. Кочеров, А. Л. Григорьева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2006. – № 43. – С. 88-91.
7. Григорьева, А. Л. Алгоритм решения задачи о растяжении полосы с непрерывным полем скоростей перемещений с использованием деформационно-энергетического условия пластичности / А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1-3. – С. 694-700.
8. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов: учеб. пособие / Н. В. Голубева. – СПб.: Лань, 2013. – 192 с.
9. Разработка модели определения глубины пространства для задач детектирования препятствий беспилотного летательного аппарата / Р. И. Шишов, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева, Е. П. Жарикова // Современные наукоёмкие технологии. – 2019. – № 11-2. – С. 306-313.
10. Детектирование состояния поверхности / Е. П. Жарикова, И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 58-63.
11. Намоконов, А. Н. Разработка программного комплекса получения параметров, характеризующих поведение быстрохватывающихся бетонов высокопрочных марок / А. Н. Намоконов, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. В 3 ч. Ч. 2 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – С. 330-333.
12. Атюков, Н. В. Математическое моделирование образа объекта с помощью лазерного дальномера / Н. В. Атюков, А. Л. Григорьева // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, 9-20 апреля 2018 г., г. Комсомольск-на-Амуре. В 2 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – С. 129-131.
13. Архипова, Н. И. Теория системного анализа и управления: учеб. пособие для вузов / Н. И. Архипова, В. В. Кульба, С. А. Косяченко. – М.: «Издательство ПРИОР», 2008. – 384 с.
14. Аттетков, А. В. Введение в методы оптимизации / А. В. Аттетков, В. С. Зарубин, А. Н. Канатников. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 272 с.
15. Сухарев, А. Г. Методы оптимизации / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – М.: Юрайт, 2014. – 368 с.
16. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов: учеб. пособие / Н. В. Голубева. – СПб.: Лань, 2013. – 192 с.
17. Тимченко, Т. Н. Системный анализ в управлении / Т. Н. Тимченко. – М.: РИОР, 2011. – 162 с.
18. Сарилова, О. А. Факторная модель как метод оценки вклада нематериальных активов в стоимость организации / О. А. Сарилова, А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2012. – № III-2 (11). – С. 107-112.



Марченко Н. М.
N. M. Marchenko

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ПАКЕТЕ MATLAB

SIMULATION OF A REACTIVE POWER COMPENSATOR IN THE MATLAB PACKAGE

Марченко Нина Михайловна – кандидат технических наук, доцент Департамента энергетических систем Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, Приморский край, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел. +7(924)126-81-91. E-mail: n-m-m@mail.ru.

Nina M. Marchenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Energy Systems Department, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690091, Primorsky territory, Vladivostok, 8 Sukhanova str.; tel. +7(924)126-81-91. E-mail: n-m-m@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматривается разработанная модель компенсатора реактивной мощности в приложениях Simulink и Simscape пакета MATLAB при работе на электродвигательную нагрузку, приведены результаты моделирования процессов компенсации реактивной мощности и их анализ. Исследования на модели позволяют облегчить работу при проектировании эффективных систем электроприводов, а также снизить затраты при создании электроприводов переменного тока.

Summary. The article discusses the developed model of the reactive power compensator in Simulink and Simscape applications of the MATLAB package when working on an electromotive load, and presents the results of modeling the processes of reactive power compensation and their analysis. The model studies make it easier to design efficient electric drive systems as well as reduce costs when creating AC drives.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, компенсатор, компенсация реактивной мощности, модель, пакет MATLAB.

Key words: asynchronous motor, compensator, reactive power compensation, model, MATLAB package.

УДК 621.316.727:004.942

В настоящее время на промышленных предприятиях различных отраслей народного хозяйства наибольшее распространение получили электроприводы (ЭП) переменного тока в связи с целым рядом преимуществ электродвигателей переменного тока по сравнению с двигателями постоянного тока. К сожалению, широкое использование ЭП на базе трёхфазных асинхронных двигателей (АД) привело к ухудшению такого энергетического показателя, как коэффициент мощности. АД являются основными потребителями реактивной мощности, на долю которых приходится от 60 до 80 % всей реактивной мощности, потребляемой предприятием [1], т. к. работа этих машин основана на принципе электромагнитной индукции, сопровождаемом процессом непрерывного изменения магнитного потока в их магнитопроводах и полях рассеяния. Поэтому подводимый к ним поток мощности должен содержать не только активную составляющую P , но и реактивную индуктивного характера QL , необходимую для создания магнитных полей, без которых процессы преобразования тока и напряжения невозможны.

Для уменьшения потребления реактивной мощности АД:

- выбирают двигатели с небольшим запасом по активной мощности;
- выполняют переключение статорных обмоток с треугольника на звезду при их загрузке ниже 40...50 %;
- исключается режим холостого хода путём установки соответствующих ограничителей;
- проводят регулярный технический осмотр и ремонт АД;
- заменяют АД синхронными той же мощности, если это возможно по технико-экономическим условиям.

Дальнейшее снижение потребления реактивной мощности ЭП возможно только с помощью специальных компенсирующих устройств.

К средствам компенсации реактивной мощности (КРМ) относится следующее оборудование:

- конденсаторные установки;
- фильтрокомпенсирующие устройства;
- статический тиристорный компенсатор;
- синхронный компенсатор.

Для успешного проектирования эффективных систем целесообразно осуществлять исследование КРМ на моделях. В отличие от устройств КРМ, моделируемых в [2–5] и ориентированных на энергосистему (наличие двунаправленной компенсации (индуктивная – ёмкостная), а также принятие фактора стабилизации уровня напряжения в качестве определяющего для осуществления КРМ), предлагаемая модель компенсирующего устройства (КУ) привязана непосредственно к потребителю и способна имитировать только генерацию реактивной (ёмкостной) энергии. Данное свойство КРМ обуславливает его применение исключительно в качестве компенсатора индуктивной энергии, главным образом, в среде с электродвигательной нагрузкой. В связи с этим отталкиваться от уровня напряжения в сети как фактора запуска и работы компенсатора не является рациональным решением, поскольку это противоречит условиям обеспечения качества напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий. Поэтому определяющим для работы КРМ был принят факт потребления реактивной мощности нагрузкой из внешней сети.

Предлагаемая для исследования система состоит из источника питания, нагрузки и устройства компенсации реактивной мощности (см. рис. 1).

Исследование системы проводилось на модели, реализованной в приложении Simulink библиотеки Simscape программного пакета MATLAB.

В качестве источника питания, блок-схема модели которого и необходимого измерительного комплекса показаны на рис. 2, используется идеальный источник трёхфазного переменного напряжения, представленный в виде трёх блоков AC Voltage Source. Источник питания собран по схеме «звезда с глухозаземлённой нейтралью» и имитирует (в упрощённой форме) сторону низкого напряжения цехового трансформатора 10/0,4 кВ. Для заземления нейтрали используется блок Ground1.

Измерительный комплекс на источнике питания представлен в виде измерителей тока (A1, A2, A3) и напряжения (V1, V2), измерителя активной и реактивной мощности (на фазу) (блок Power1) [6] с вычислением значения $\cos \varphi$, измерителя действующего значения и анализатора гармонического спектра фазного тока.

Для вычисления значения $\cos \varphi$ в модели организована подсистема PF1 (сокращение от Power Factor – коэффициент мощности).

Вычисление действующего значения фазного тока (фаза А от блока A1) производится посредством блока RMS1 [7].

Вычисление полного коэффициента гармонических искажений (Total Harmonic Distortion) в режиме реального времени осуществляется блоком THD. Следует заметить, что во внутренней структуре блока THD разработчиками MATLAB предусмотрена задержка по времени, привязанная к частоте входного гармонического сигнала. Анализ гармонического спектра фазного тока (фаза А от блока A1) производится с помощью блока Scope7 при внесении изменений в его внутренние настройки, а также блока Powergui после настройки инструмента FFT Analysis, расположенного во вкладке Tools (инструменты). В результате вычислений на выходе блока THD получается коэффициент гармонических искажений в долевого соотношении от основной частоты, но поскольку этот показатель, как правило, выражается в процентах, для удобства его визуализации используется блок Gain3.

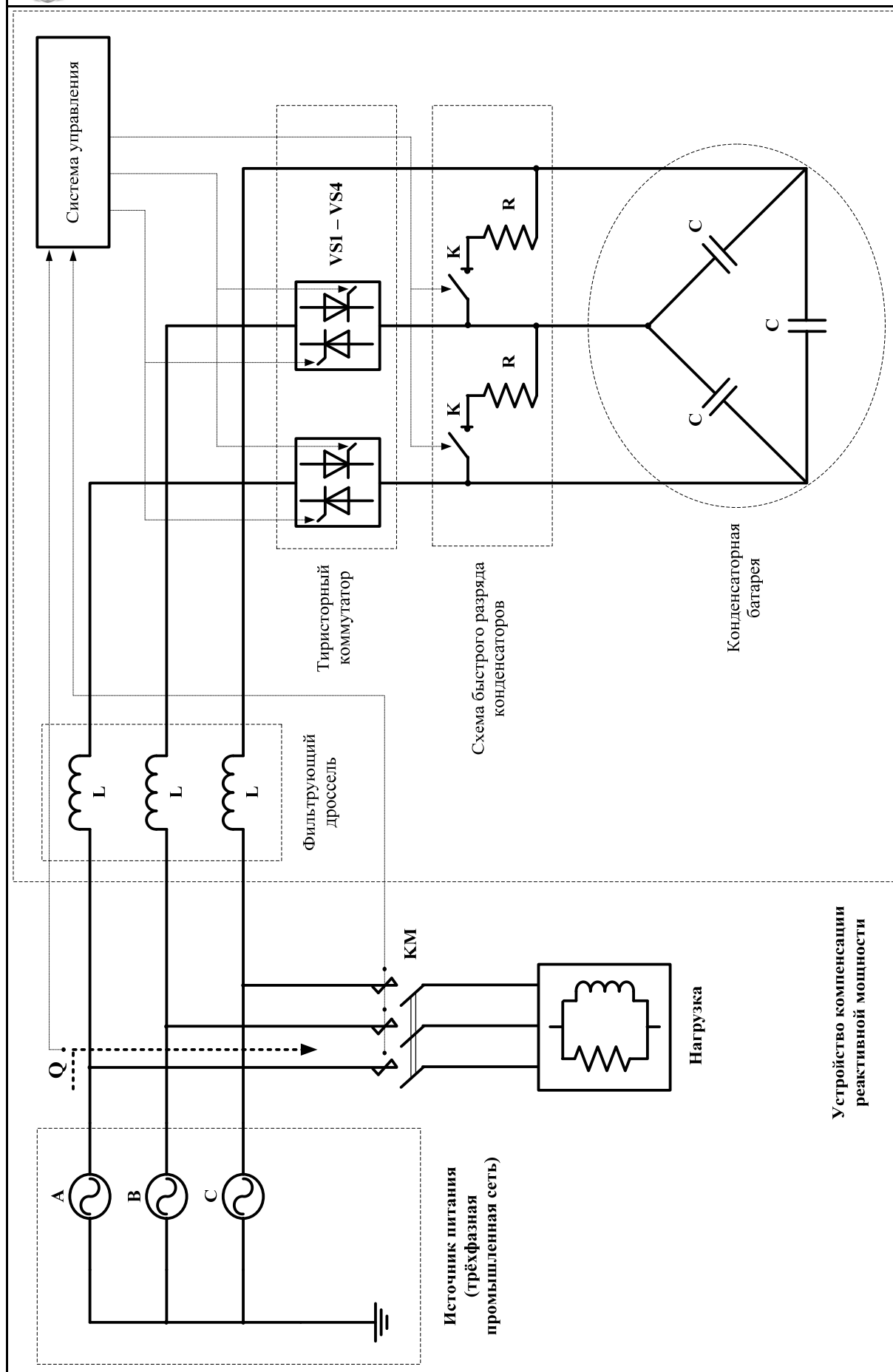


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема исследуемой системы



Визуализация измеряемых параметров осуществляется с помощью соответствующих осциллографов Scope, а фиксация установившихся значений этих параметров – с помощью блоков Display.

Нагрузка представлена трёхфазным АД с короткозамкнутым ротором, который и является потребителем реактивной мощности. Технические данные АД приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические данные АД

Тип	P_n , кВт	n_n , об/мин	s_n , %	η_n , %	$\cos \varphi_n$	M_{\max}/M_n	M_{\min}/M_n	M_p/M_n	I_p/I_n
A2-92-2	125	3000	1,4	94,0	0,9	2,2	1,0	1,0	7,0

На модели АД представлен трёхфазной параллельной активно-индуктивной нагрузкой Three-Phase Parallel RL Load (см. рис. 3) [8]. В параметрах настройки этого блока, кроме амплитудного значения фазного напряжения (Nominal phase-to-phase voltage V_n (Vrms) = 311 В), номинальной частоты (Nominal frequency f_n (Hz) = 50 Гц), задаётся активная мощность (Active power P (W) = 125 000 Вт) и реактивная индуктивная (Inductive reactive power Q_l (positive var)), рассчитанная по формуле

$$Q_n = \frac{P_n}{\eta_n} \operatorname{tg} \varphi_n = \frac{125000}{0,94} 0,484 = 64362 \text{ ВАр}.$$

Реактивная (ёмкостная) мощность в настройках блока нагрузки (Capacitive reactive power Q_c (negative var)) задаётся равной 0.

Для отключения нагрузки с целью проведения анализа процессов при включении конденсаторной батареи, входящей в состав КРМ, на разрядное сопротивление используется трёхфазный электромагнитный контактор КМ (Three-Phase Breaker). Управление контактором КМ производится блоком Switch1. С учётом параметров настройки блоков в режиме компенсации реактивной мощности нагрузки (длительность – 0,1 с) контактор КМ остаётся замкнут. Его размыкание осуществляется посредством выключателя со встроенным таймером (в виде системы блоков Clock1 – Constant1/Constant2 – Switch1), настроенным на половину от полного времени симуляции с учётом разряда конденсаторов (0,2 с). Здесь же подаётся сигнал на отключение КРМ путём автоматической блокировки средства измерения реактивной мощности (блок Power1) в случае размыкания контактора, тем самым обеспечивается отсутствие сигнала на управляющих электродах тиристорных (см. рис. 1).

КРМ представляет собой конденсаторную батарею, включаемую в сеть двухфазным тиристорным коммутатором. Также на выходе он оснащён фильтрующим дросселем и оборудован схемой быстрого разряда конденсаторов. Принцип действия КРМ основан на реактивном энергообмене между компенсирующим устройством и нагрузкой с целью снижения генерации индуктивного тока со стороны источника. Конденсаторная батарея собрана по схеме «треугольник», каждая из фаз которой на модели (см. рис. 4) представлена в виде подсистем C_a , C_b и C_c , реализованных посредством блока Subsystem. Значение ёмкости конденсатора определяется по выражению [9]

$$C_a = \frac{Q_c}{3U_m^2 2\pi f} = \frac{30}{3 \cdot 0,311^2 \cdot 2\pi \cdot 50} 10^6 = 329,06 \text{ мкФ},$$

где Q_c – номинальная реактивная конденсатора, кВАр; U_m – амплитуда фазного напряжения сети, кВ; f – промышленная частота сети, Гц.

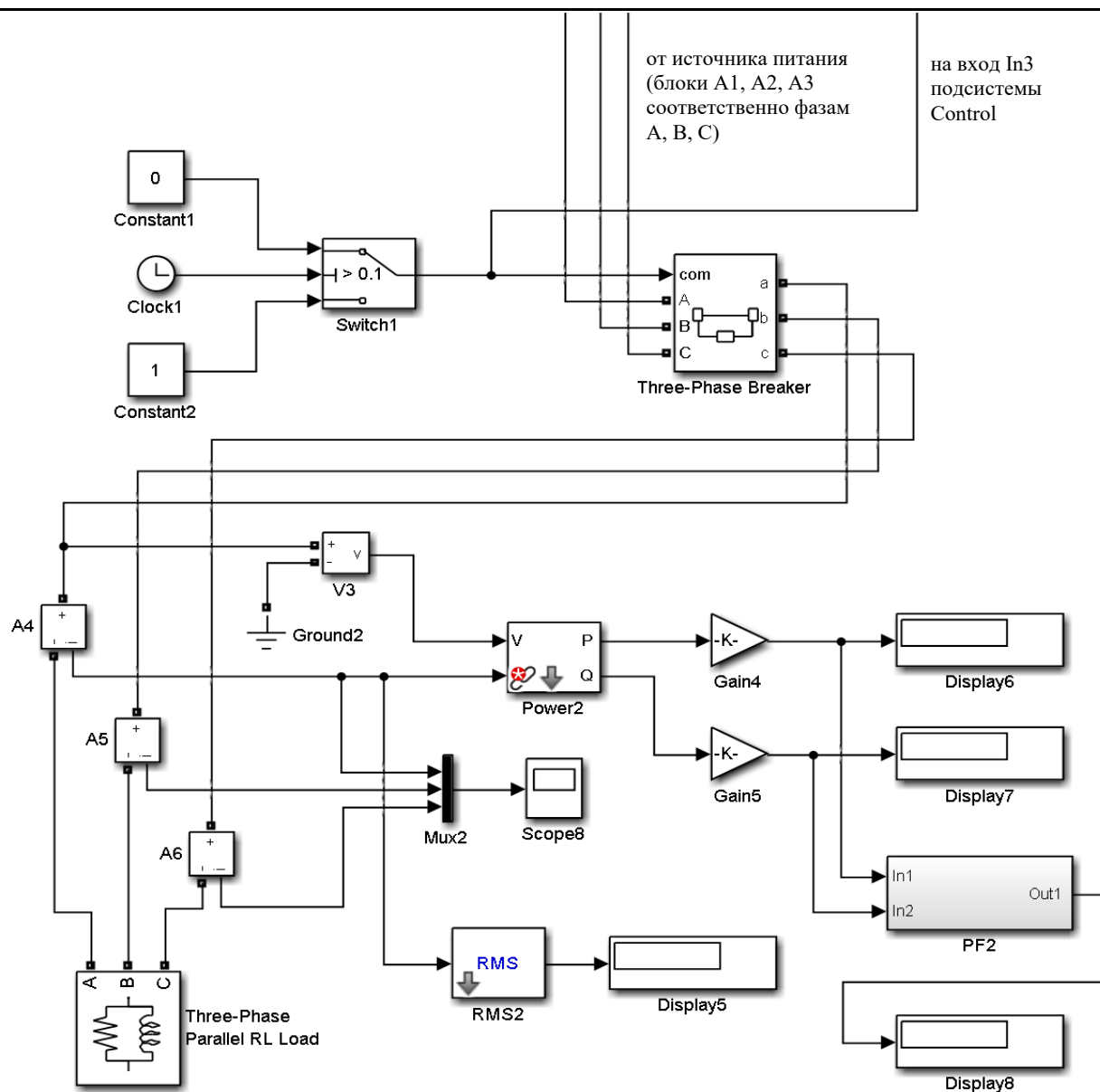


Рис. 3. Блок-схема модели нагрузки с измерительным комплексом

Тиристорный коммутатор представлен в виде тиристорных ключей (блоки Thyristor), представленных двумя параллельно противовключёнными тиристорами, что обеспечивает пропускание амплитуды ёмкостного тока обеих полярностей (см. рис. 4). Каждый из вентилях снабжён шунтирующим активным сопротивлением, предназначенным для его защиты от перенапряжений, возникающих в сети при переходных процессах, коммутации индуктивных нагрузок и т. п.

Система управления коммутатором (подсистема Control) состоит из двух частей: включение/отключение устройства КРМ при включении/отключении нагрузки и включение/отключение тиристорного коммутатора при наличии/отсутствии потребления реактивной мощности этой же самой нагрузкой. Работа первой части организована посредством блока Switch3. Запуск КРМ на готовность к режиму компенсации происходит только при включении нагрузки, что исключает возможную перекомпенсацию внешней электрической сети ёмкостным током. Для диагностики сигнала на включение компенсатора используется блок Display12. Работа второй части системы управления связана напрямую с включением и отключением тиристорного коммутатора по факту потребления реактивной мощности нагрузкой.

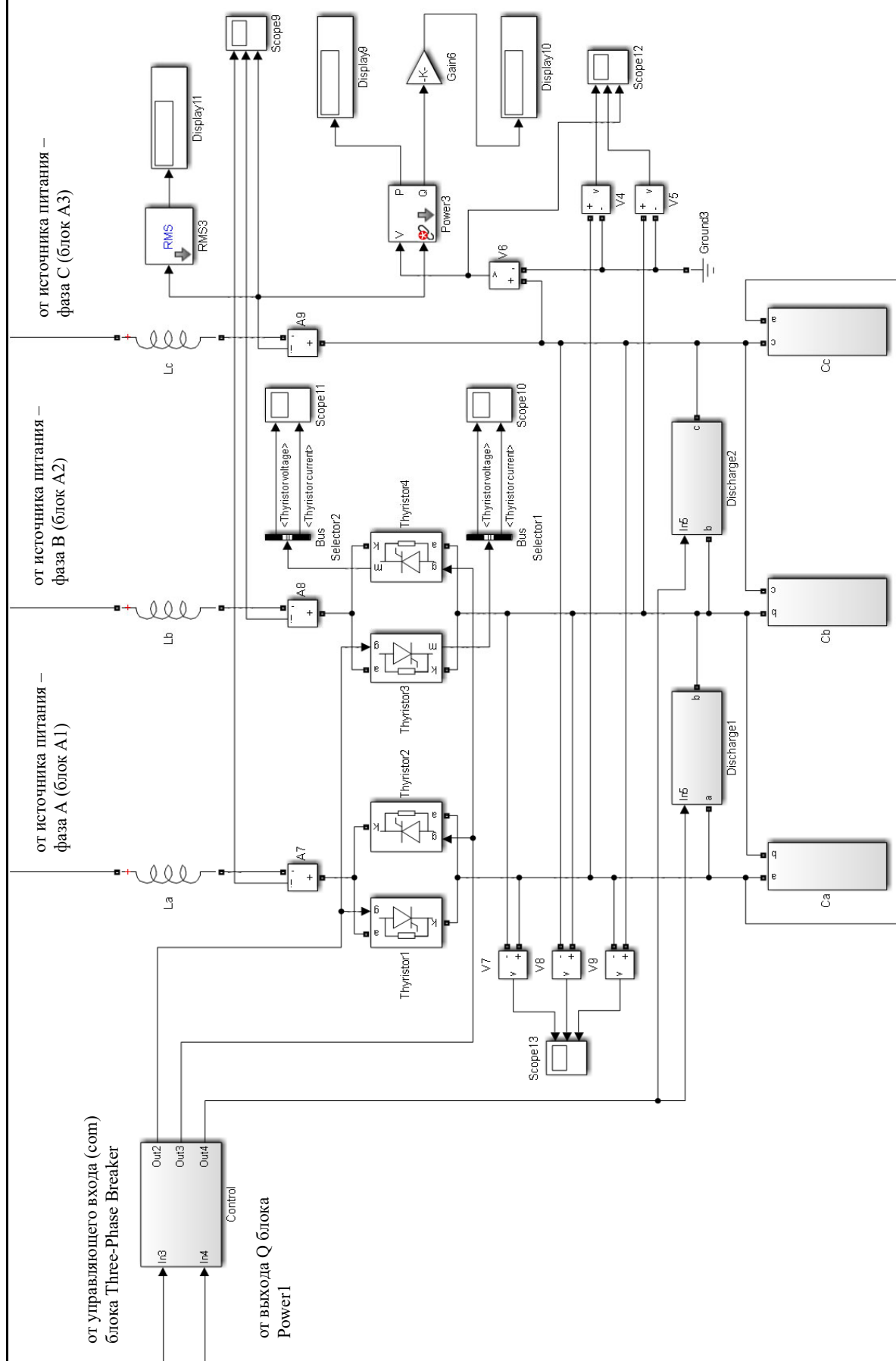


Рис. 4. Блок-схема модели КРМ с измерительным комплексом и системой управления (подсистема Control)

Для диагностики сигналов на включение тиристорных ключей используются блоки Display13 и Display14.

Таким образом, запуск тиристорного коммутатора и КРМ в целом производится при нулевом перепаде напряжения (момент равенства напряжений на выводах конденсатора и в сети) по полнофазному полярному методу, т. е. включение тириستоров на прямое напряжение происходит в момент подачи сигнала на управляющий электрод, на обратное – с временной задержкой в 0,01 с. Указанный способ запуска позволяет в момент коммутации исключить броски тока, связанные с зарядом конденсаторов.

Фильтрующий дроссель, установленный на выходе компенсатора, предназначен для подавления токов высших гармоник и действует в двух направлениях. Во-первых, он препятствует проникновению во внешнюю сеть импульсов тока со стороны тиристорных в момент их включения/выключения. Во-вторых, используется в качестве ограничителя резонансных явлений между компенсирующим устройством и индуктивностью сети. На модели (см. рис. 4) дроссель представлен в виде трёхфазной системы катушек индуктивности, реализованной посредством трёх блоков Series RLC Branch (La, Lb и Lc). Данное помехоподавляющее устройство подбирается в соответствии с рабочим напряжением сети и величиной ёмкости конденсаторов в КБ. Здесь же следует учитывать, что при применении фильтрующих дросселей эквивалентная индуктивная нагрузка сети увеличится и также потребует компенсации, следовательно, использования конденсаторов повышенной ёмкости [10].

Система управления (Control) имеет в своём составе таймер, состоящий из блока-выключателя Switch, блоков управляющих единичного и нулевого сигналов (блоки Constant) и блока часов Clock, синхронизированного со временем симуляции.

Симуляция работы исследуемой системы включает два режима:

1. компенсации реактивной мощности нагрузки (длительность 0,1 с);
2. компенсации реактивной мощности нагрузки с её последующим отключением и замыканием КБ на разрядный модуль (длительность 0,2 с).

При исследовании первого режима анализируется уменьшение амплитуды (действующего значения) фазного тока во внешней сети за счёт снижения его реактивной составляющей при неизменной величине соответствующего тока на нагрузке. Также отмечается практически полное сокращение потребления реактивной мощности из электрической сети предприятия в связи с установлением реактивного энергообмена между компенсатором и нагрузкой. Более того, производится анализ гармонического состава фазного сетевого тока (фаза А) с целью выявления высших гармоник при работе КРМ и оценки величины их суммарного содержания во входном сигнале относительно основной частоты.

При исследовании второго режима осуществляется оценка уровня безопасности устройства КРМ в отключённом состоянии (с незаряженными конденсаторами) и эффективности работы разрядного модуля посредством анализа затухания/стабилизации напряжения, соответственно, на выводах конденсаторных батарей и на выходе КРМ (напряжение анод-катод на тиристорах).

На рис. 5 представлены осциллограммы токов в фазах (Ia, Ib, Ic) на выходе компенсирующего устройства. Как видно из графика, запуск КРМ производится одновременно с включением нагрузки (начало симуляции), что связано с задержкой по времени измерения реактивной мощности (фактора работы компенсатора), предусмотренной в блоке Power1, а также временной настройкой включения тиристорных ключей для обеспечения запуска тиристорного коммутатора при нулевом перепаде напряжения в сети.

Значение амплитуды компенсирующего тока определяется по формуле

$$I_{\text{мф}} = \frac{Q_{\text{КБ}}}{U_{\text{мф}}} = \frac{60}{0,311} = 192,93 \text{ А},$$

где $Q_{\text{КБ}}$ – номинальная реактивная мощность фазы конденсаторной батареи, кВАр; $U_{\text{мф}}$ – амплитуда фазного напряжения сети, кВ.

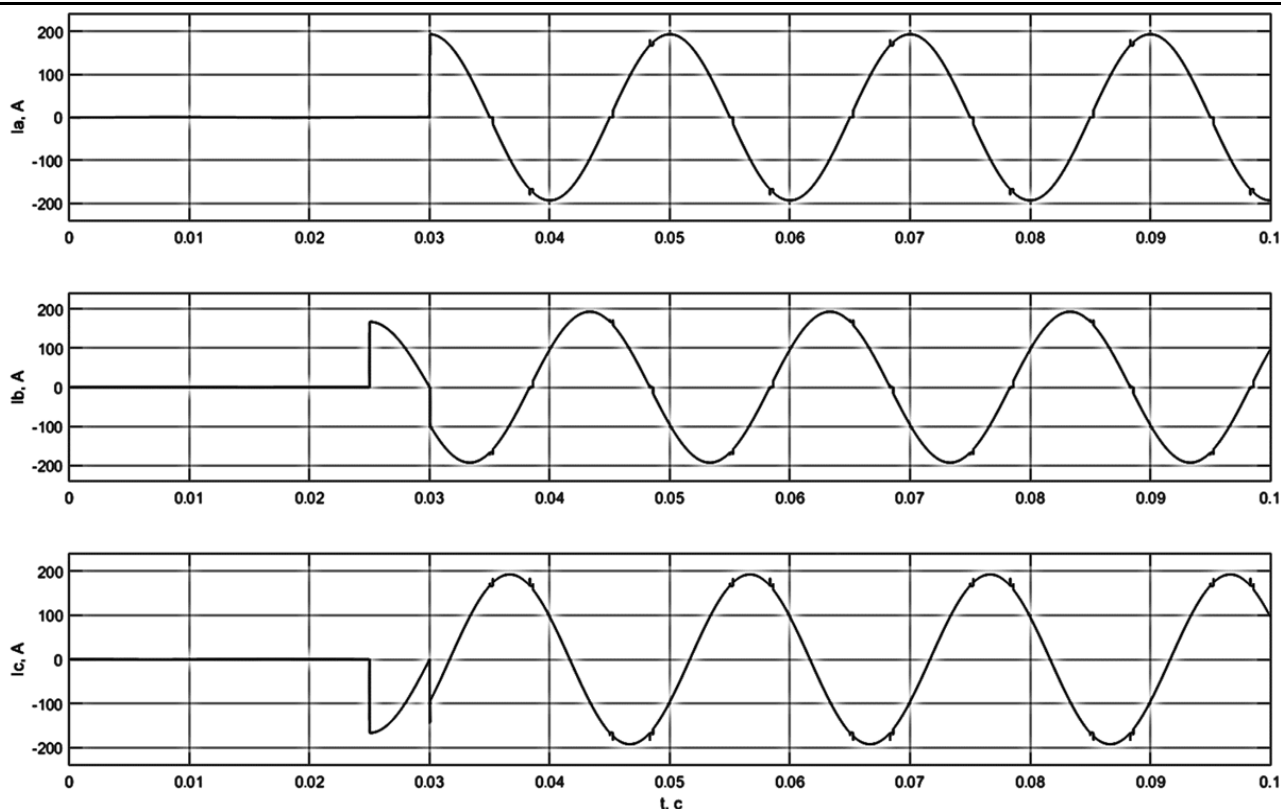


Рис. 5. Осциллограмма фазных токов на выходе компенсирующего устройства

На осциллограмме видно, что амплитуда фазных токов на выходе КРМ соответствует её расчётному значению. Также в связи с наличием нелинейных элементов (тиристоров) в составе компенсатора следует отметить явные пульсации компенсирующего тока, появляющиеся в момент их открытия/закрытия.

На рис. 6 показано изменение реактивной мощности (Q) на источнике до и после компенсации с учётом временной задержки ($t = 0,02$ с). Как видно из рисунка, до компенсации реактивной мощности ($t = 0,02 \dots 0,03$ с) её величина на источнике соответствует номинальной реактивной мощности нагрузки ($Q_H = 64,36$ кВАр). В установившемся режиме компенсации (при $t = 0,05 \dots 0,1$ с) потребление реактивной мощности нагрузкой из сети снизилось на величину номинальной реактивной мощности конденсаторной батареи (60 кВАр) и в результате составило около 4,5 кВАр, что свидетельствует о практически полном замещении индуктивного тока сети компенсирующим. Таким образом, потребление полной мощности нагрузкой со стороны источника питания фактически определяется только активной составляющей фазного тока.

Волнообразное изменение реактивной мощности (на интервале времени $t = 0,03 \dots 0,05$ с) обусловлено переходом системы «нагрузка – КРМ» в режим компенсации, что отражается на увеличении потребления активной мощности из сети этой системой в связи с вводом в действие тиристорных ключей.

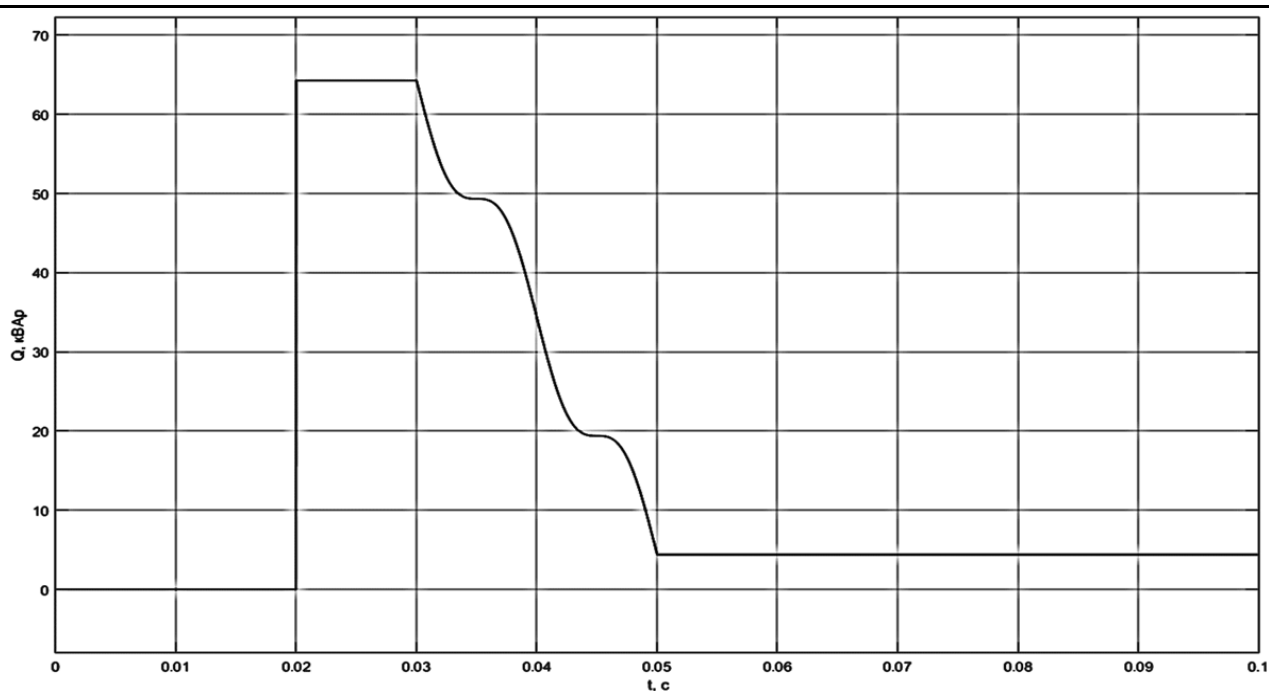


Рис. 6. Осциллограмма изменения реактивной мощности на источнике до ($t = 0,02 \dots 0,03$ с) и после ($t = 0,05 \dots 0,1$ с) компенсации

На рис. 7 показано изменение коэффициента мощности на источнике до и после компенсации. Как видно из графика, до включения компенсирующего устройства (при $t = 0,02 \dots 0,03$ с) $\cos \varphi$ на источнике составлял примерно $0,89 \dots 0,9$, что соответствовало его номинальному значению на нагрузке. После перехода системы «нагрузка – КРМ» в режим компенсации ($t = 0,05 \dots 0,1$ с), характеризующийся некоторым колебанием $\cos \varphi$ вследствие аналогичных процессов в среде параметров P и Q (при $t = 0,03 \dots 0,05$ с), коэффициент мощности стал равным практически 1 ($\cos \varphi = 0,999$), что свидетельствует о наличии перетоков только активной мощности из внешней сети (со стороны источника питания) в нагрузку.

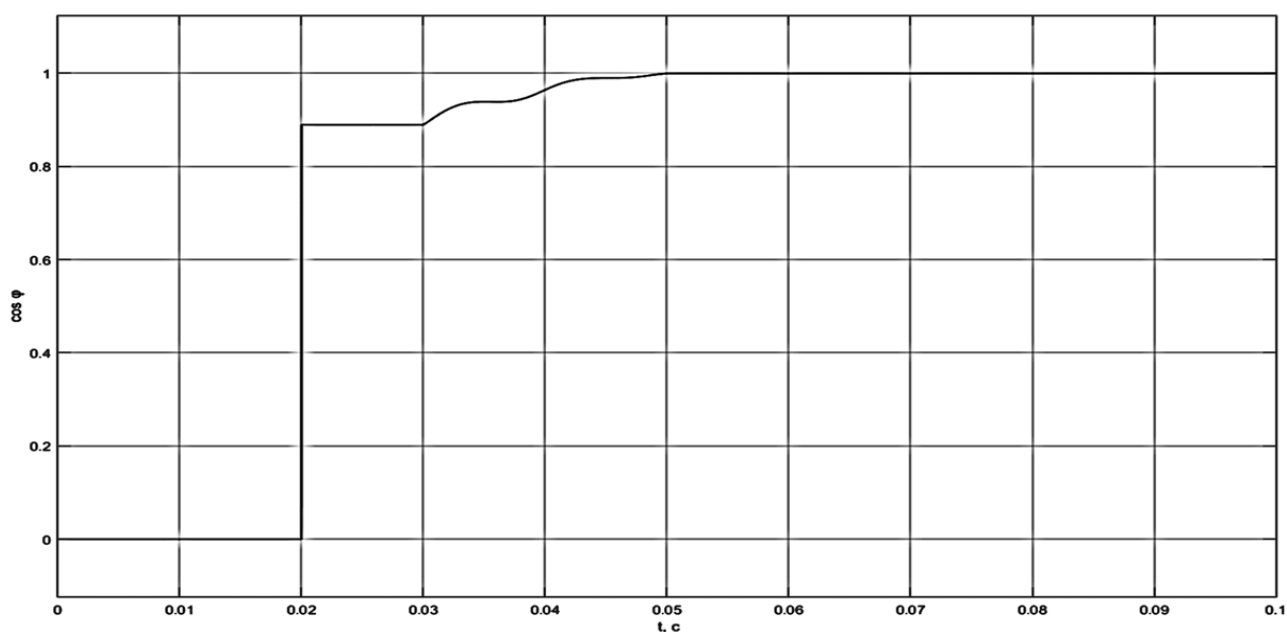


Рис. 7. Осциллограмма изменения коэффициента мощности на источнике до ($t = 0,02 \dots 0,03$ с) и после ($t = 0,05 \dots 0,1$ с) компенсации



В ходе проведённых на модели экспериментов было произведено измерение напряжения на выходе компенсатора (анод-катод тиристоры) и на выводах конденсаторных батарей с целью оценки уровня безопасности устройства в отключённом состоянии и при разряде конденсаторов. Анализ поведения напряжения в представленных выше состояниях компенсирующего устройства показал на недостаток КРМ – опасность поражения электрическим током обслуживающего персонала, что необходимо учитывать при решении вопросов безопасности в процессе эксплуатации подобных компенсирующих устройств на промышленных предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лихачёв, В. Л. Электродвигатели асинхронные: учеб. для вузов / В. Л. Лихачёв. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 304 с.
2. Хасан, А. Х. Разработка регулируемого источника реактивной мощности для систем электроснабжения промышленных предприятий Ирака: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Хасан Альван Хуссаин; Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина (ИГЭУ). – Иваново, 2009. – 20 с.
3. Соловьёв, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьёв, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2014. – № 2. – С. 23-28.
4. Пионкевич, В. А. Математическое моделирование статических компенсаторов реактивной мощности для решения задач регулирования напряжения в энергетических системах / В. А. Пионкевич // Вестник ИрГТУ. Серия: Энергетика. – 2015. – № 12 (107). – С. 192-197.
5. Баранов, И. А. Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения с помощью MATLAB-Simulink / И. А. Баранов, А. В. Аргунов // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2021. – № 2. – С. 5-12.
6. Джендубаев, А.-З. Р. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике: учеб. пособие / А.-З. Р. Джендубаев, И. И. Алиев. – Черкесск: БИЦ СевКавГГТА, 2014. – 136 с.
7. Дьяконов, В. П. Simulink: справ. / В. П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 518 с.
8. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink: учеб. пособие / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
9. Соколов, М. М. Электропривод и электроснабжение промышленных предприятий: учеб. / М. М. Соколов, Д. Н. Липатов. – М.: Энергия, 1965. – 440 с.
10. Борисов, П. А. Расчёт и моделирование выпрямителей: учеб. пособие / П. А. Борисов, В. С. Томасов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 69 с.
11. Ivanov, S. Synthesis of the Control Device of the Electromechanical Drive of the Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911 2086.
12. Соловьёв, В. А. Разработка математической модели процесса резания рубительной машины / В. А. Соловьёв, А. И. Малюкова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 47-51.

Стельмашук С. В., Черепанов Н. И.
S. V. Stelmashchuk, N. I. Cherepanov

СИСТЕМА ПОДЧИНЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

SUBORDINATE CONTROL SYSTEM FOR DC DRIVE WITH SERIAL EXCITATION

Стельмашук Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

Sergei V. Stelmashchuk – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

Черепанов Николай Иванович – бакалавр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: koluk99@mail.ru.

Nikolay I. Cherepanov – Bachelor's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: koluk99@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрено применение принципов подчинённого управления к двигателю постоянного тока с последовательным возбуждением (ДПТ-ПВ), аналогичное двигателю постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ-НВ). Рассматриваемая система подчинённого управления (СПУ) содержит контуры скорости и тока, но в силу унификации стандартных настроек задача использования контура по положению решается просто, и поэтому не рассматривалась. Так как ДПТ-ПВ имеет нелинейное математическое описание, то для использования стандартных настроек осуществляется линеаризация ДПТ-ПВ относительно базовой точки, соответствующей тому или иному производственному условию эксплуатации. В работе рассматривалась настройка как на модульный, так и на симметричный оптимум. Также рассматривались различные поправки к параметрам регуляторов СПУ в зависимости от величины инерционных масс привода, которые вынуждают учитывать ЭДС якоря двигателя. Основным результатом исследования, рассмотренного в работе, является более высокое быстродействие ДПТ-ПВ в сравнении с ДПТ-НВ. При токоограничении электромагнитный момент ДПТ-ПВ в разы выше, чем у ДПТ-НВ, что определяет повышенное быстродействие. Данное качество управления даёт перспективы в использовании ДПТ-ПВ в общепромышленных механизмах.

Summary. The article considers the application of the principles of subordinate control to a DC series motor, similar to a separately excited DC motor. The considered subordinate control system contains speed and current circuits, but due to the unification of standard settings, the task of using a contour by position is solved simply, and therefore was not considered. Since the DC series motor has a nonlinear mathematical description, the linearization of the DC series motor relative to the base point corresponding to a particular production operating condition is carried out for the use of standard settings. The paper considered both the adjustment to the modular and symmetric optimum. Various corrections to the parameters of the subordinate control system regulators were also considered, depending on the magnitude of the inertial masses of the drive, which force the EMF of the engine armature to be taken into account. The main result of the study considered in this paper is a higher performance of DC series motor in comparison with separately excited DC motor. With current limitation, the electromagnetic moment of the DC series motor is several times higher than that of the separately excited DC motor, which determines the increased speed. This quality of management gives prospects for the use of DC series motor in general industrial mechanisms.

Ключевые слова: подчинённое управление, двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, линеаризация.

Key words: subordinate control, DC series motor, linearization.

УДК 621.3.078:681.5.013

Введение

В настоящее время тяговый электропривод имеет узкое применение. Это связано со сложностью управления им [1–4], хотя квадратичная зависимость момента от тока двигателя носит весьма привлекательный характер и для общепромышленных приводов с реактивной нагрузкой, которые в режиме холостого хода имеют существенные значения [5] или требуют значительные усилия [6]. Рассмотренная проблематика в вопросах оптимального управления ДПТ-ПВ выявила «несомненные преимущества ДПТ-ПВ, что делает перспективным применение в электроприводе» [7]. Вследствие нелинейного характера механической характеристики (МХ) управление ДПТ-ПВ требует нелинейного регулирования либо применением нелинейного регулятора, либо применением устройств, компенсирующих нелинейности самого двигателя. В любом случае сначала необходимо рассмотреть процесс управления ДПТ-ПВ в линеаризованном виде.

В статье рассмотрены следующие вопросы: линеаризация ДПТ-ПВ относительно базовой точки на МХ ДПТ-ПВ; использование подчинённого регулирования с помощью контуров тока и скорости; применение стандартных форм настройки контуров тока и скорости, а именно настройки на модульный оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО), а также учёт влияния ЭДС якоря. Понятно, что такая СПУ будет применима только для малых отклонений управляющих и возмущающих воздействий. В дальнейшем потребуются дополнительные исследования устойчивости данной системы для больших отклонений.

Линеаризация ДПТ-ПВ

Структурная схема ДПТ-ПВ с нелинейным математическим описанием представлена на рис. 1.

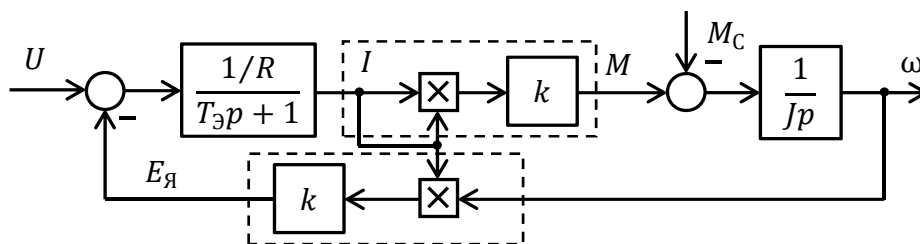


Рис. 1. Структурная схема ДПТ-ПВ с нелинейным математическим описанием:

U – напряжение; I – ток; M – момент; ω – скорость; $E_я$ – ЭДС якоря двигателя; M_c – статический момент; $T_э = L/R$ – электромагнитная постоянная времени двигателя, здесь $L = L_я + L_в$ – суммарная индуктивность цепи двигателя, состоящая из индуктивности якоря $L_я$ и обмотки возбуждения $L_в$; $R = R_я + R_в$ – суммарное активное сопротивление цепи двигателя, состоящее из активных сопротивлений якоря $R_я$ и обмотки возбуждения $R_в$; J – суммарный момент инерции привода; k – постоянная двигателя

Осуществляется локальная линеаризация блоков перемножения. На структурной схеме (см. рис. 1) пунктирной линией выделены две нелинейные зависимости:

$$M = kI^2; \quad E_я = k\omega I. \quad (1)$$

Постоянная двигателя k определяется номинальными данными двигателя:

$$k = \frac{U_n - I_n R}{I_n \omega_n}.$$

Линеаризация нелинейных зависимостей момента и ЭДС якоря выполняется относительно базовых значений МХ ДПТ-ПВ (см. рис. 2). Базовые значения должны быть связаны уравнением МХ ДПТ-ПВ:

$$\omega_B = \frac{U_B}{\sqrt{kM_B}} - \frac{R}{k}.$$

Для линеаризации выражений (1) задаются базовым значением нагрузки (момента нагрузки M_B или тока нагрузки $I_B = \sqrt{M_B/k}$), а также базовым значением напряжения U_B , которые определяют базовую скорость ω_B , либо задаются базовыми значениями нагрузки и скорости, а затем определяют базовое значение напряжения.

Возникают новые базовые значения, соответствующие линеаризованной МХ (ЛМХ): базовое значение скорости холостого хода ω_{0B} при базовом значении напряжения двигателя U_B и базовое значение номинальной скорости холостого хода ω_{0BH} при номинальном значении напряжения двигателя U_H . Не рекомендуется за базовое значение напряжения брать номинальное значение, т. к. отклонения напряжения ΔU должны рассматриваться с различным знаком, т. е. необходимо допускать увеличение напряжения двигателя, чего нельзя выполнить при $U_B = U_H$. Поэтому необходимо задать $0 < U_B < U_H$.

Для линеаризации выполняется разложение зависимостей (1) в степенной ряд:

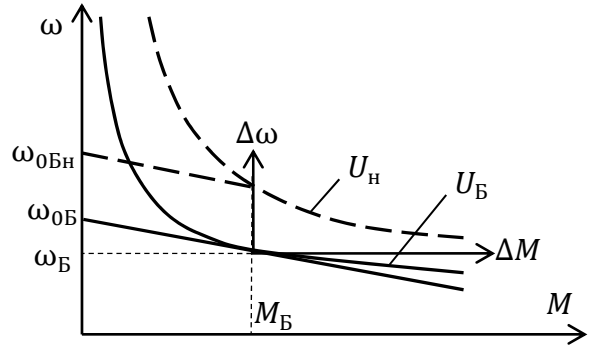


Рис. 2. Линеаризация МХ ДПТ-ПВ

$$M = M_B + \Delta M = kI_B^2 + \left. \frac{d(kI^2)}{dI} \right|_{I=I_B} \Delta I = kI_B^2 + C_m \Delta I;$$

$$E_{\text{я}} = E_{\text{я}B} + \Delta E_{\text{я}} = k\omega_B I_B + \left. \frac{d(k\omega I)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_B} \Delta \omega + \left. \frac{d(k\omega I)}{dI} \right|_{I=I_B} \Delta I = k\omega_B I_B + C_n \Delta \omega + C_l \Delta I,$$

где коэффициенты линеаризации

$$C_m = \frac{\Delta M}{\Delta I} = 2I_B k; \quad C_n = \frac{\Delta E_{\text{я}}}{\Delta \omega} = I_B k; \quad C_l = \frac{\Delta E_{\text{я}}}{\Delta I} = \omega_B k.$$

Структурная схема ДПТ-ПВ с линеаризованным описанием представлена на рис. 3.

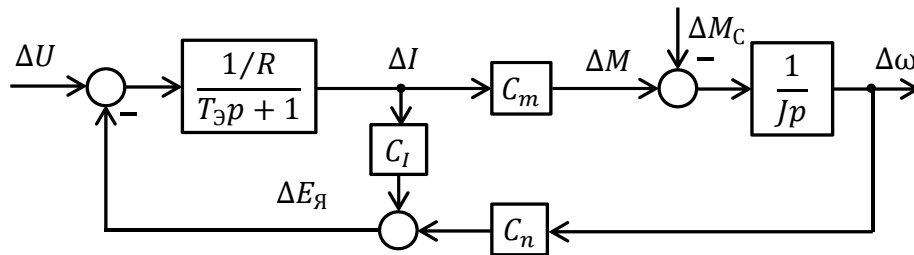


Рис. 3. Структурная схема ДПТ-ПВ с линеаризованным описанием

Видно, что внутренняя обратная связь (ВОС) по ЭДС якоря определяется двумя каналами: ВОС по току, характеризуемая коэффициентом C_l , и ВОС по скорости, характеризуемая коэффициентом C_n : $\Delta E_{\text{я}} = C_n \Delta \omega + C_l \Delta I$. Коэффициент C_m определяет электромагнитную связь между током и электромагнитным моментом двигателя: $\Delta M = C_m \Delta I$.

Уравнение ЛМХ ДПТ-ПВ определяется в осях отклонений ($\Delta \omega$, ΔM):

$$\Delta\omega = \frac{\Delta U}{C_n} - \frac{R + C_I}{C_n C_m} \Delta M.$$

Скорость холостого хода ЛМХ ДПТ-ПВ, соответствующей базовому напряжению U_B , исходя из рис. 2 выражается формулой

$$\omega_{0Б} = \omega_B + \frac{R + C_I}{C_n C_m} M_B.$$

Предполагается, что диапазон регулирования ограничивается естественной МХ и жёсткостью ЛМХ ДПТ-ПВ. Таким образом, верхний предел области регулирования скорости определяется ЛМХ, соответствующей номинальному напряжению ДПТ-ПВ U_H , где скорость холостого хода (см. рис. 2)

$$\omega_{0Бн} = \omega_{0Б} + \frac{U_H - U_B}{C_n}.$$

Подчинённое регулирование ДПТ-ПВ

На рис. 4 представлена структурная схема СПУ ДПТ-ПВ, которая реализуется двумя контурами: тока и скорости.

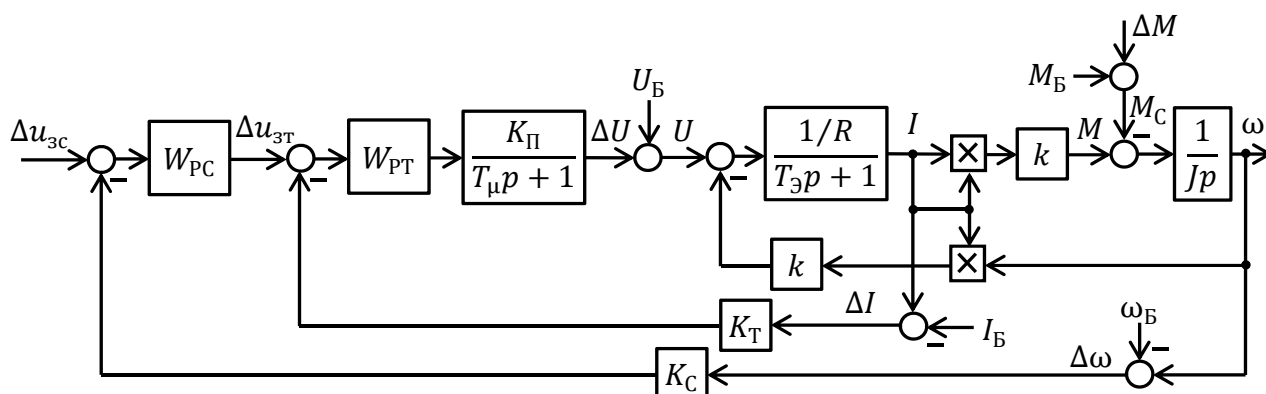


Рис. 4. СПУ с нелинейным ДПТ-ПВ

В линеаризованном виде СПУ ДПТ-ПВ представлена на рис. 5.

Коэффициенты усиления преобразователя K_P , датчиков тока K_T и скорости K_C определяются исходя из технологических особенностей устройств:

$$K_P = \frac{U_H}{u_{y\max}}; \quad K_T = \frac{u_{y\max}}{I_{\max}}; \quad K_C = \frac{u_{y\max}}{\omega_{0Бн}},$$

где $u_{y\max}$ – максимальное значение сигнала управления; I_{\max} – максимально допустимое значение тока двигателя.

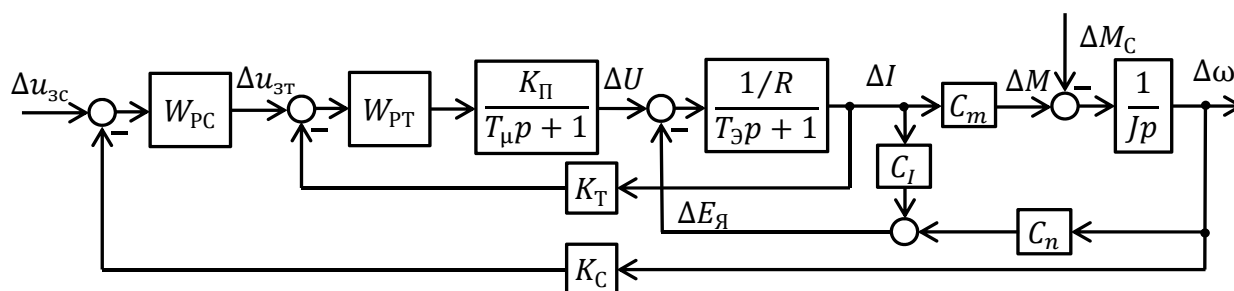


Рис. 5. Линеаризованная СПУ ДПТ-ПВ

Видно, что коэффициент усиления датчика скорости K_C зависит от базовой нагрузки. Постоянную времени преобразователя примем за малую некомпенсируемую постоянную времени T_μ .

Стандартная настройка без учёта ВОС по скорости и току

На рис. 6 представлена двухконтурная СПУ ДПТ-ПВ без учёта ВОС по току и скорости.

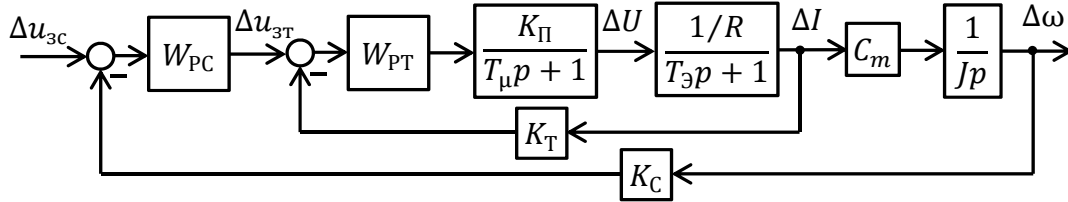


Рис. 6. СПУ ДПТ-ПВ без учёта ВОС по току и скорости

Здесь задача настройки регуляторов тока и скорости решается известным способом, рассмотренным в различной литературе по настройке СПУ двигателем постоянного тока с независимым возбуждением [8]. Контур тока настраивается на МО, параметры ПИ-регулятора тока:

$$W_{РТ}(p) = K_{РТ} \frac{T_{РТ}p + 1}{T_{РТ}p}; \quad K_{РТ} = \frac{RT_\Delta}{2T_\mu K_\Pi K_T}, \quad T_{РТ} = T_\Delta. \quad (2)$$

Параметры регулятора тока не зависят от базовых параметров. Если контур скорости настраивается на МО, то параметры П-регулятора скорости

$$W_{РС}(p) = K_{РС} = \frac{JK_T}{4T_\mu K_C C_m}. \quad (3)$$

При настройке контура скорости на СО передаточная функция ПИ-регулятора скорости

$$W_{РС}(p) = K_{РС} \frac{8T_\mu p + 1}{8T_\mu p}.$$

Коэффициент усиления регулятора скорости $K_{РС}$ зависит от коэффициента линеаризации C_m , а следовательно, от базовых параметров линеаризации.

Для оценки влияния обоих ВОС структурная схема контура тока примет вид на рис. 7.

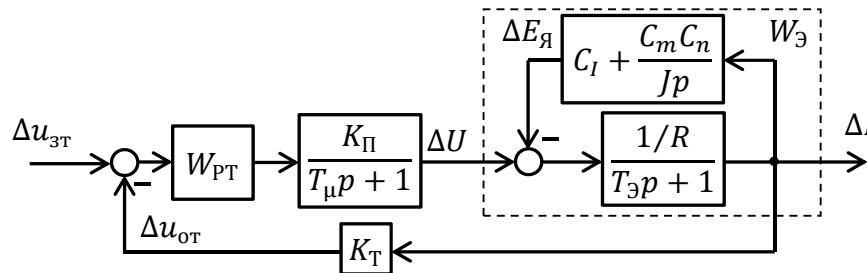


Рис. 7. Оценка влияния ВОС по току и скорости в контуре тока СПУ ДПТ-ПВ

Передаточная функция электрической цепи двигателя:

$$W_\Delta(p) = \frac{Jp}{JRT_\Delta p^2 + J(R + C_I)p + C_n C_m} = \frac{\frac{T_M}{R}p}{T_M T_\Delta p^2 + T_M' p + 1},$$

где $T_M = \frac{JR}{c_n c_m}$ – электрохимическая постоянная времени; $T'_M = \frac{J(R+C_I)}{c_n c_m} = \frac{JR'}{c_n c_m}$ – эквивалентная электрохимическая постоянная времени; $R' = R + C_I$ – эквивалентное сопротивление электрической цепи двигателя.

В этом случае передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{\text{раз.т}}(p) = \frac{T_M(T_\Sigma p + 1)}{2T_\mu(T_\mu p + 1)(T_M T_\Sigma p^2 + T'_M p + 1)}.$$

В контуре тока присутствует член $T_M T_\Sigma p^2 + T'_M p + 1$, у которого $T'_M \gg T_M T_\Sigma$, так что можно принять $T_M T_\Sigma p^2 + T'_M p + 1 \approx T'_M p + 1$. В отличие от СПУ с ДПТ-НВ, где присутствует аналогичный член $T_M T_\Sigma p^2 + T_M p + 1$, член $T'_M p + 1$ из-за того, что $T'_M > T_M$, существенно влияет на динамику контура тока и СПУ в целом. Влияние T'_M в $\left(\frac{R+C_I}{R}\right)$ раз больше, чем T_M . На рис. 8 представлены графики переходных процессов скорости СПУ без наличия ВОС (штриховая линия), т.е. соответствующей стандартной настройке, и с наличием ВОС с большой инерционной массой, соответствующей статической ошибке $\delta I \approx 5\%$ (пунктирная линия), а также с малой инерционной массой при $\delta I \approx 50\%$ (сплошная линия).

Для оценки влияния ВОС по току и скорости также определяется относительная статическая ошибка регулирования тока двигателя [9]:

$$\delta I = \frac{\Delta I_{\text{зад}} - \Delta I_{\text{уст}}}{\Delta I_{\text{зад}}} = \frac{\Delta u_{\text{зт}} - \Delta u_{\text{от}}}{\Delta u_{\text{зт}}} = \frac{1}{1 + W_{\text{раз.т}}(p)} \Big|_{p=0} = \frac{2T_\mu}{2T_\mu + T'_M}.$$

Статическая ошибка СПУ с ДПТ-ПВ не отличается от статической ошибки СПУ с ДПТ-НВ [9].

Коэффициент линеаризации C_I характеризует ВОС по току. Поэтому необходимо при настройке контура тока учесть влияние ВОС по току на динамику СПУ с ДПТ-ПВ.

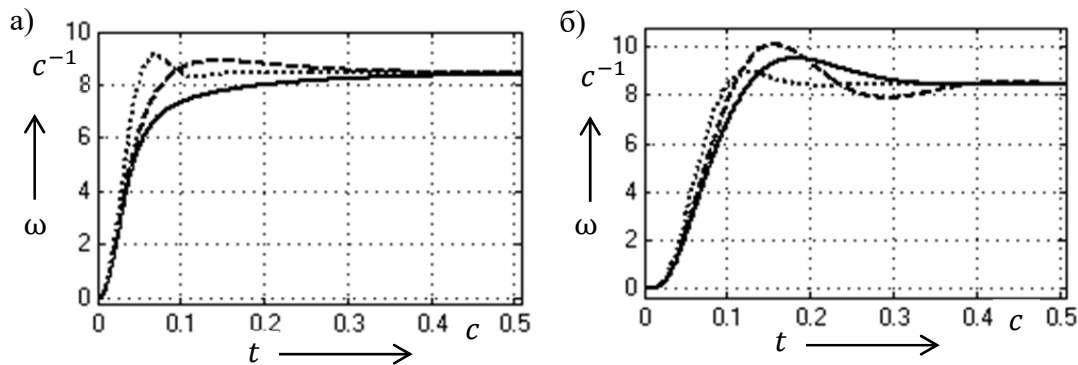


Рис. 8. Переходные процессы скорости СПУ ДПТ-ПВ без учёта влияния ВОС по току и скорости при настройке на МО (а) и СО (б)

Стандартная настройка с учётом ВОС по току, но без учёта ВОС по скорости

Для компенсации влияния ВОС по току необходимо при настройке контура тока учесть ВОС по току в контуре тока (см. рис. 9).

В результате при настройке контура тока на МО необходимо рассматривать эквивалентное активное сопротивление R' и эквивалентную электромагнитную постоянную времени $T'_\Sigma = \frac{L}{R+C_I} = \frac{L}{R'}$. Тогда в ПИ-регуляторе тока изменится только постоянная времени $T_{\text{рт}} = T'_\Sigma$, а коэффициент усиления регулятора $K_{\text{рт}}$ не изменится (2), т.к. $R'/T'_\Sigma = RT_\Sigma$. Параметры регулятора скорости останутся теми же, что и при настройке СПУ без учёта ВОС по току и скорости (3).

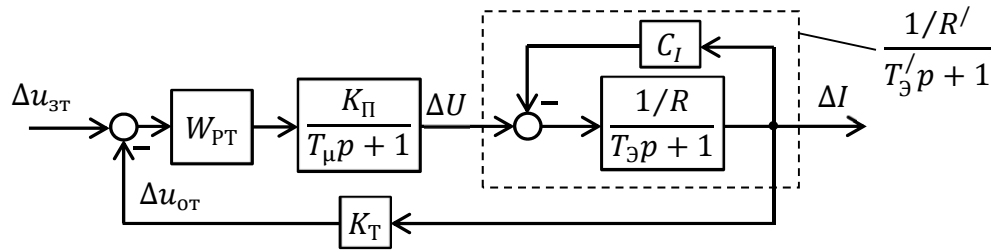


Рис. 9. Настройка контура тока СПУ ДПТ-ПВ с учётом влияния ВОС по току

На рис. 10 представлены графики переходных процессов скорости СПУ ДПТ-ПВ с наличием ВОС по току и скорости, где настройка контура тока произведена с учётом ВОС по току при малых (сплошная линия) и больших (пунктирная линия) инерционных массах привода. Видно, что, в отличие от СПУ, где контур тока настроен без учёта ВОС по току, в СПУ с контуром тока, настроенным с учётом ВОС по току при больших инерционных массах, переходный процесс соответствует стандартной настройке. При малых инерционных массах наблюдается несоответствие по перерегулированию, но быстродействие соизмеримо со стандартной настройкой.

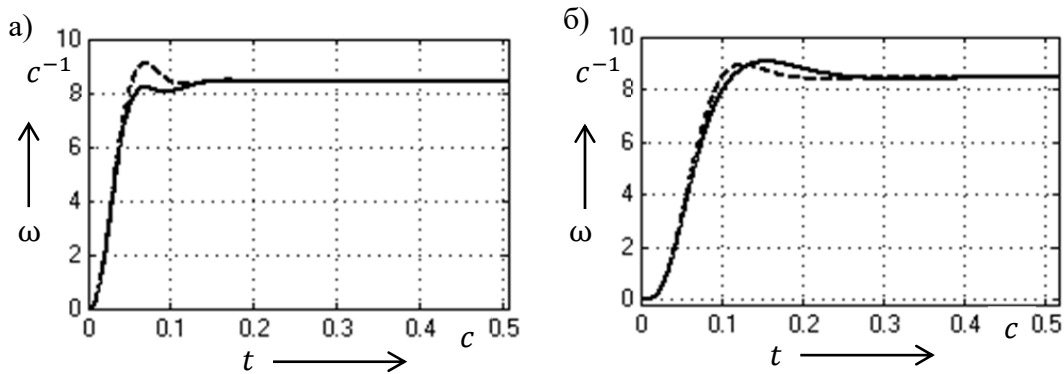


Рис. 10. Переходные процессы скорости СПУ ДПТ-ПВ с учётом влияния ВОС по току при настройке на МО (а) и ГО (б)

Стандартная настройка с учётом ВОС по току и ВОС по скорости

Оценим влияние ВОС по скорости (см. рис. 11). Передаточную функцию электрической цепи двигателя, при условии что $R'/T_э' = RT_э$, рассмотрим в виде

$$W_э(p) = \frac{Jp}{JR'/T_э'p^2 + JR'/p + C_n C_m} = \frac{\frac{T_M'}{R'}p}{T_M'/T_э'p^2 + T_M'p + 1}.$$

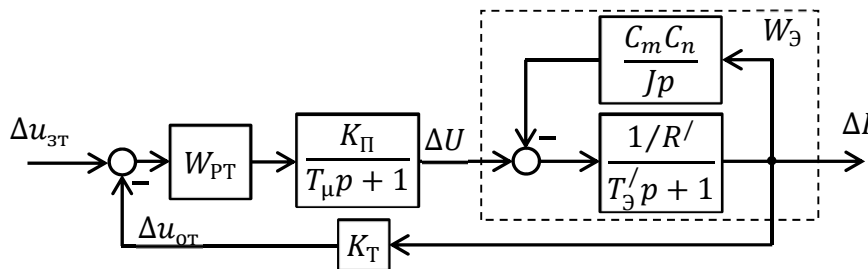


Рис. 11. Оценка влияния ВОС по скорости в контуре тока СПУ ДПТ-ПВ

Тогда передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{\text{раз.т}}(p) = \frac{T'_M(T'_3 p + 1)}{2T_\mu(T_\mu p + 1)(T'_M T'_3 p^2 + T'_M p + 1)}.$$

Относительная статическая ошибка регулирования тока двигателя

$$\delta I = \frac{2T_\mu}{2T_\mu + T'_M}. \quad (4)$$

Это означает, что при тех же инерционных массах привода, как в СПУ с ДПТ-ПВ без учёта влияния ВОС по току, в СПУ с ДПТ-ПВ, где при настройке контура тока учитывается влияние ВОС по току, т. к. $T'_M > T_M$, статическая ошибка регулирования тока будет намного меньше. Для примера, соответствующего рис. 10, для больших инерционных масс $\delta I \approx 1\%$ (против 5%) (пунктирная линия), а при малых инерционных массах $\delta I \approx 20\%$ (против 50%) (сплошная линия). Это является существенным достоинством в настройке регулятора тока с учётом ВОС по току.

Для оценки влияния ВОС по скорости на динамику СПУ ДПТ-ПВ необходимо рассмотреть два случая:

1. Корни члена $T'_M T'_3 p^2 + T'_M p + 1$ являются вещественными. Тогда

$$T'_M T'_3 p^2 + T'_M p + 1 = (T_1 p + 1)(T_2 p + 1),$$

где

$$T_{1,2} = \frac{T'_M}{2} \left(1 \mp \sqrt{1 - 4 \frac{T'_3}{T'_M}} \right).$$

Примем, что $T_1 < T_2$, тогда постоянная времени контура тока $T_{\text{рт}} = T_1$ [10]. В этом случае передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{\text{раз.т}}(p) = \frac{K_{\text{рт}} K_{\text{П}} K_{\text{Т}} T'_M}{R/T_1 (T_\mu p + 1)(T_2 p + 1)}.$$

Передаточная функция замкнутого контура тока будет представлять собой инерционное звено второго порядка. Для соответствия настройке на МО коэффициент демпфирования контура тока должен быть равен $1/\sqrt{2}$ [10]. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы коэффициент усиления регулятора тока

$$K_{\text{рт}} = \frac{R/T_1}{2T_\mu K_{\text{П}} K_{\text{Т}}} \frac{T_\mu^2 + T_2^2}{T_2 T'_M}.$$

В результате образуется контур тока с малой постоянной времени:

$$T'_\mu = \frac{T_\mu T_2}{T_\mu + T_2}.$$

Если пренебречь членом высшего порядка в передаточной функции замкнутого контура тока, то регулятор скорости при настройке на МО [10]

$$W_{\text{РС}}(p) = K_{\text{РС}} = \frac{J K_{\text{Т}}}{4T_\mu K_{\text{С}} C_m} \frac{(T_\mu + T_2)^3}{T_2 (T_\mu^2 + T_2^2)},$$

при настройке на СО

$$W_{PC}(p) = K_{PC} \frac{8T_{\mu}'p + 1}{8T_{\mu}'p}.$$

2. Корни члена $T_{\mu}'T_{\Sigma}'p^2 + T_{\mu}'p + 1$ являются комплексными. Тогда справедлива аппроксимация [10]

$$T_{\mu}'T_{\Sigma}'p^2 + T_{\mu}'p + 1 \approx T_{\mu}'T_{\Sigma}'p^2.$$

В этом случае передаточная функция разомкнутого контура тока

$$W_{раз.т}(p) = K_{РТ} \frac{T_{РТ}p + 1}{T_{РТ}p} \frac{K_{П}K_{Т}}{(T_{\mu}'p + 1)R/T_{\Sigma}'p}.$$

Видно, что контур тока двукратно интегрирующий. Поэтому контур тока настраивается на СО [10]. В этом случае коэффициент усиления регулятора тока $K_{РТ}$ не изменится (2), т. к. $R/T_{\Sigma}' = RT_{\Sigma}$. Постоянная времени регулятора тока $T_{РТ} = 4T_{\mu}$. На входе контура тока для исключения большого перерегулирования устанавливается фильтр с постоянной времени $4T_{\mu}$ [10]. Если пренебречь членами высшего порядка, то передаточная функция замкнутого контура тока с фильтром аппроксимируется аperiодическим звеном первого порядка с постоянной времени $4T_{\mu}'$, где [10]

$$T_{\mu}' = T_{\mu} \frac{1 + \frac{2T_{\mu}}{T_{\Sigma}'} + \frac{2T_{\mu}^2}{T_{\mu}'T_{\Sigma}'}}{1 + \frac{8T_{\mu}^2}{T_{\mu}'T_{\Sigma}'}}.$$

При настройке контура скорости на МО П-регулятор скорости примет вид

$$W_{PC}(p) = K_{PC} = \frac{JK_{Т}}{8T_{\mu}K_{С}C_m} \frac{\left(1 + \frac{8T_{\mu}^2}{T_{\mu}'T_{\Sigma}'}\right)^2}{1 + \frac{2T_{\mu}}{T_{\Sigma}'} + \frac{2T_{\mu}^2}{T_{\mu}'T_{\Sigma}'}}.$$

при настройке на СО

$$W_{PC}(p) = K_{PC} \frac{16T_{\mu}'p + 1}{16T_{\mu}'p}.$$

На рис. 12 представлены графики переходных процессов скорости СПУ ДПТ-ПВ с учётом влияния ВОС по току и скорости при настройке контуров тока и скорости, соответствующих случаям малых инерционных масс, когда $T_{\mu}' < 4T_{\Sigma}'$ (пунктирная линия), и больших инерционных масс, когда $T_{\mu}' \geq 4T_{\Sigma}'$ (сплошная линия). Видно, что переходные процессы соответствуют стандартным настройкам и при малых инерционных массах быстроедействие СПУ в 2 раза меньше.

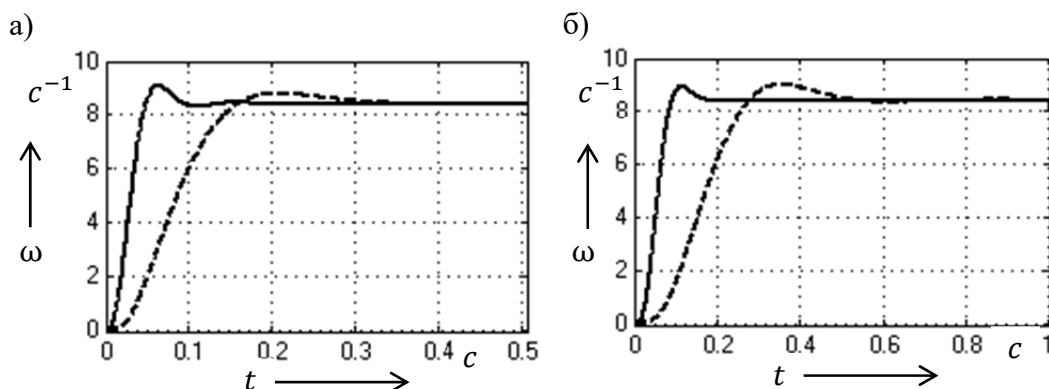


Рис. 12. Переходные процессы скорости СПУ ДПТ-ПВ с учётом влияния ВОС по току и по скорости при настройке на МО (а) и СО (б)

Выводы.

При стандартной настройке СПУ без учёта ВОС по току и скорости критерий по относительной статической ошибке регулирования тока как для ДПТ-НВ $\delta I = \frac{2T_\mu}{2T_\mu + T_M} < 5\%$ не выполняется (см. рис. 8). Это означает, что ВОС по току в СПУ ДПТ-ПВ необходимо обязательно учитывать при настройке контура тока. Тогда относительная статическая ошибка регулирования тока вычисляется по формуле (4). В табл. 1 представлены формулы для расчёта регуляторов СПУ ДПТ-ПВ.

Таблица 1

Стандартная настройка регуляторов тока и скорости для СПУ ДПТ-ПВ

Регуляторы СПУ ДПТ-ПВ	Большие инерционные массы (учёт ВОС по току, без учёта ВОС по скорости) $\delta I < 5\%$		Малые инерционные массы (учёт ВОС по току и по скорости) $\delta I > 5\%$	
	$T_M' > 4T_\mu'$		$T_M' < 4T_\mu'$	
Регулятор тока $K_{рт} \frac{T_{рт}p + 1}{T_{рт}p}$	$K_{рт} = \frac{R/T_\mu'}{2T_\mu K_\Pi K_T}$ $T_{рт} = T_\mu'$	$K_{рт} = \frac{R/T_1}{2T_\mu K_\Pi K_T} \frac{T_\mu^2 + T_2^2}{T_2 T_M'}$ $T_{рт} = T_1$	$K_{рт} = \frac{R/T_\mu'}{4T_\mu K_\Pi K_T}$ $T_{рт} = 4T_\mu$ фильтр с постоянной $4T_\mu$ на входе контура тока	
Регулятор скорости $K_{рс} (МО)$ $K_{рс} \frac{T_{рс}p + 1}{T_{рс}p} (СО)$	$K_{рс} = \frac{JK_T}{4T_\mu K_C C_m}$ $T_{рс} = 8T_\mu$	$K_{рс} = \frac{JK_T}{4T_\mu K_C C_m} \frac{(T_\mu + T_2)^3}{T_2 (T_\mu^2 + T_2^2)}$ $T_{рс} = 8T_\mu \frac{T_2}{T_\mu + T_2}$	$K_{рс} = \frac{JK_T}{8T_\mu K_C C_m} \frac{\left(1 + \frac{8T_\mu^2}{T_M' T_\mu'}\right)^2}{1 + \frac{2T_\mu}{T_\mu'} + \frac{2T_\mu^2}{T_M' T_\mu'}}$ $T_{рс} = 16T_\mu \frac{1 + \frac{2T_\mu}{T_\mu'} + \frac{2T_\mu^2}{T_M' T_\mu'}}{1 + \frac{8T_\mu^2}{T_M' T_\mu'}}$	

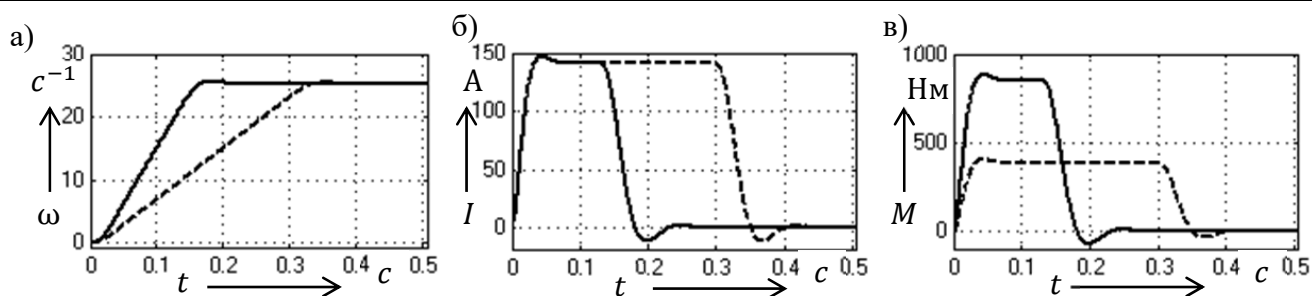


Рис. 13. Переходные процессы скорости (а), тока (б) и момента (в) СПУ ДПТ-ПВ (сплошная линия) и СПУ ДПТ-НВ (пунктирная линия)

При исследовании СПУ ДПТ-ПВ, в сравнении с СПУ ДПТ-НВ с токоограничением, выявлено основное преимущество ДПТ-ПВ перед ДПТ-НВ. На рис. 13 представлены графики переходных процессов скорости, тока и момента одного и того же двигателя, но с разным типом возбуждения. Исследование проводилось при больших инерционных массах. Видно, что при равном значении токоограничения момент ДПТ-ПВ значительно превышает момент ДПТ-НВ. Это связано с квадратичной зависимостью момента и тока двигателя, что обеспечивает большее быстродействие ДПТ-ПВ в сравнении с ДПТ-НВ той же мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мин Ту Аунг. Динамическая коррекция электропривода с двигателем последовательного возбуждения / Мин Ту Аунг, В. И. Суздорф // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2018. – Т. 16. – № 1. – С. 54-60.
2. Мешков, А. С. Стабилизация скорости двигателя последовательного возбуждения / А. С. Мешков, Мин Ту Аунг, В. И. Суздорф // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды II Всероссийской научно-практической конференции, Хабаровск, 20-21 сентября 2018 года. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 244-247.
3. Бузикаева, А. В. Синтез энергосберегающего управления двигателем последовательного возбуждения / А. В. Бузикаева, С. П. Черный, В. И. Суздорф // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2020. – № III-1 (43). – С. 23-28.
4. Реверсивный регулируемый двигатель последовательного возбуждения / Т. И. Рыбалкина, М. И. Стальная, И. А. Иванов, Е. Д. Рязанова // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Рубцовск, 27-28 октября 2017 года. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2017. – С. 450-452.
5. Шмырин, Д. П. Исследование математической модели двух смежных клетей при прокатке с петлеобразованием / Д. П. Шмырин, Н. Е. Дерюжкова // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – С. 104-106.
6. Исследование взаимосвязанной системы позиционных электроприводов стержневой установки / Н. Е. Дерюжкова, В. А. Соловьев, А. Х. Чжо, В. В. Тетерин // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды II Всероссийской научно-практической конференции, Хабаровск, 20-21 сентября 2018 г. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 253-256.
7. Каган, В. Г. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения / В. Г. Каган, Г. В. Лебедев, Л. И. Малинин. – М.: Энергия, 1971. – 96 с.
8. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г. Б. Онищенко, М. И. Аксенов, В. П. Грехов, М. Н. Зарицкий, А. В. Куприков, А. И. Нитиевская. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
9. Шрейнер, Р. Т. Системы подчинённого регулирования электроприводов: учеб. пособие / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 279 с.
10. Решмин, Б. И. Проектирование и наладка систем подчинённого регулирования электроприводов / Б. И. Решмин, Д. С. Ямпольский. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.



Урасов Д. В., Черный С. П.
D. V. Urasov, S. P. Cherniy

ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДА КЛАПАНА В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

FILTERING OF THE CONTROL SIGNAL BY A PROPORTIONAL REGULATOR FOR THE VALVE ELECTRODE IN AN ARC STEEL FURNACE

Урасов Дмитрий Владимирович – начальник ОАСУ ТП ООО «Амурсталь» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Вагонная, 30; тел. 8(4217)24-12-09. E-mail: epapu@knastu.ru.
Dmitriy V. Urasov – Head of the OASU TP ООО «Amurstal» (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681000, Komsomolsk-on-Amur, Vagonnaya str., 30; tel. 8(4217)24-12-09. E-mail: epapu@knastu.ru.

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(4217)24-12-09. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Sergey P. Cherniy – 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.; tel. 8(4217)24-12-09. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Аннотация. В представленной работе проведено моделирование процессов, протекающих в дуговых сталеплавильных печах. Показана необходимость применения фильтрации управляющего сигнала не только для снижения амплитуды механических колебаний, возникающих в активной фазе технологического процесса, но и для сохранения быстродействия автоматизированной системы. Проанализировано влияние постоянной времени фильтра на изменение основных параметров технологического процесса.

Summary. In the present paper, the modeling of processes occurring in arc steelmaking furnaces is carried out. The necessity of using control signal filtering is shown, both to reduce the amplitude of mechanical vibrations occurring in the active phase of the technological process, and to preserve the performance of the automated system. The influence of the filter time constant on the change of the main parameters of the technological process is analyzed.

Ключевые слова: фильтрация сигнала управления, дуговая сталеплавильная печь, влияние постоянной времени фильтра.

Key words: control signal filtering, arc steelmaking furnace, the effect of the filter time constant.

УДК 004.896

В настоящее время в чёрной металлургии широко используются дуговые сталеплавильные печи (ДСП). В ДСП такого типа возможно получение высоколегированных и легированных сталей, плавить которые в печах других типов, например мартеновских или конвертерных, представляется либо затруднительным, либо невозможным.

Процесс плавления в электродуговых печах осуществляется за счёт выделения тепловой энергии, получаемой от электрической дуги, возникающей между графитовыми электродами и металлошихтой. Одним из требований эффективного расхода электрической энергии является точность поддержания заданного значения длины дуги, для чего ДСП оснащаются регуляторами.

При питании таких печей от трёхфазных сетей каждый из трёх каналов регулятора длины дуги строится по идентичной схеме с индивидуальными гидравлическими или электрическими приводами перемещения электродов.

В качестве объекта управления рассмотрим ДСП производства фирмы CONCAST, которая эксплуатируется на металлургическом предприятии «Амурсталь». Эта печь оснащена регулятором

AEREG с гидравлическим приводом перемещения электродов. Функционально система управления электродами AEREG разделена на две части: основная часть реализована на контроллерной платформе SIMATIC S7-400 (ПЛК регулятора), осуществляющей функцию трёхканального цифрового регулятора поддержания длины дуги. Дополнительная часть выполнена с применением ЭВМ, оборудованной модулями сигнальных интерфейсов National Instruments и соответствующим специализированным программным обеспечением, в функции которой входит формирование рецепта плавки, хранение архивных данных и прочее.

В процессе плавления автоматизированная система регулирования по заранее заданному рецепту управляет режимами работы механизмов, выдавая команды на изменение рабочей ступени трансформатора напряжения и реактора, а также рабочей точки регулятора. Каждый из трёх независимых каналов регулятора электродов построен по идентичной схеме и с точки зрения ТАУ представляет собой замкнутую систему управления перемещением электрододержателя с положительной обратной связью по ошибке и с П(ИД)-регулятором в контуре управления. На рис. 1 показана упрощённая структурная схема регулятора длины дуги первой фазы, реализованная на базе ПЛК.

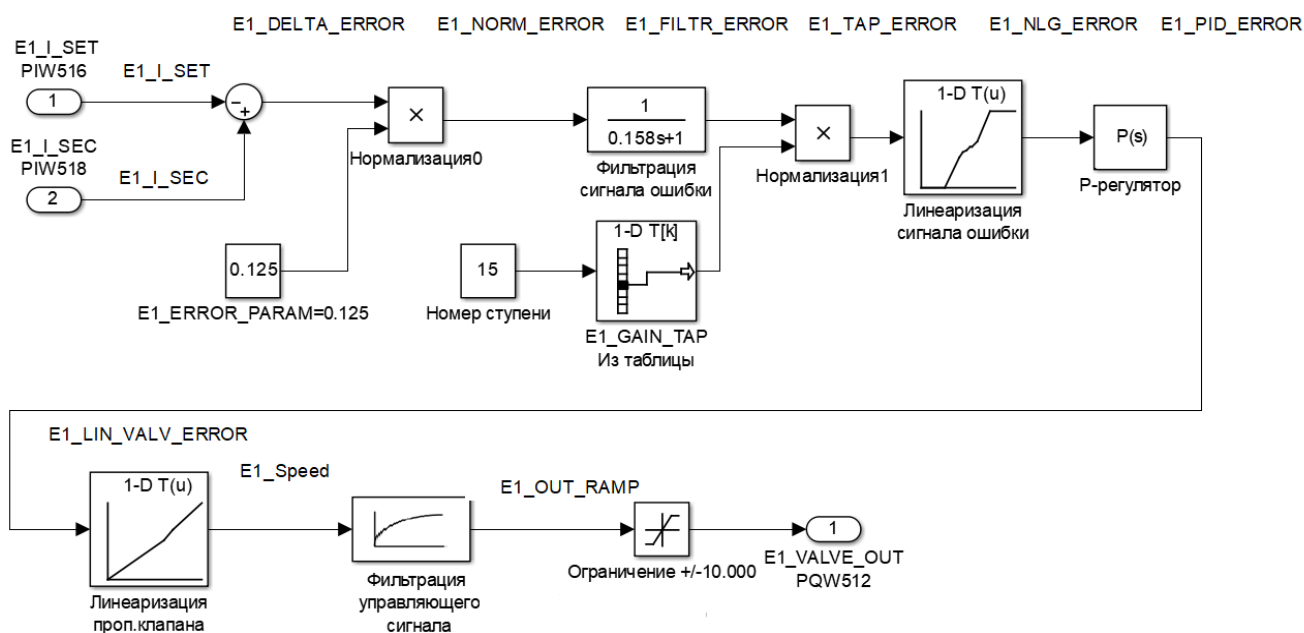


Рис. 1. Структурная схема регулятора дуги первой фазы, реализованная на базе ПЛК

После ввода величины заданного значения ($E1_I_SET$) и получения текущего значения тока ($E1_I_SEC$) под электродом производится расчёт сигнала ошибки ($E1_DELTA_ERROR$). Далее сигнал ошибки нормализуется ($E1_NORM_ERROR$), фильтруется ФНЧ первого порядка ($E1_FILTR_ERROR$), корректируется в зависимости от ступени трансформатора напряжения ($E1_TAP_ERROR$), после чего формируется нелинейный коэффициент усиления для учёта индивидуальной электрохимической характеристики печи ($E1_NLG_ERROR$). На основе полученной ошибки П(ИД)-регулятором формируется управляющее воздействие ($E1_PID_ERROR$), и после линеаризации ($E1_LIN_VALV_ERROR$), фильтрации и ряда нормирующих функций сигнал управления ($E1_OUT_RAMP$) подаётся на пропорциональный клапан перемещения электрода ($E1_VALVE_OUT$ PQW512).

Функция фильтрации заданного значения для пропорционального клапана

В канале регулирования поддержания дуги управляющее воздействие ($E1_Speed$, см. рис. 2), сформированное регулятором на основе сигнала ошибки, подаётся на пропорциональный клапан перемещения электродом через фильтр первого порядка (FC231, см. рис. 2). Фильтрация позволяет сгладить механические колебания и снизить нагрузку на гидравлические элементы.

Степень фильтрации зависит от режима работы регулятора, определяемого сигналом REGO. В автоматическом режиме, когда система замкнута по обратной связи, сигнал E1_Speed проходит через фильтр FC231, в ручном режиме управления – через фильтр FC232.

Графитовый электрод состоит из трёх соединённых вместе частей, общий вес которых составляет более 3 тонн. Резкие рывки способны разрушить соединительные ниппели. С другой стороны, чрезмерно высокий коэффициент фильтрации управляющего сигнала тормозит систему, делая процесс поддержания дуги нестабильным.

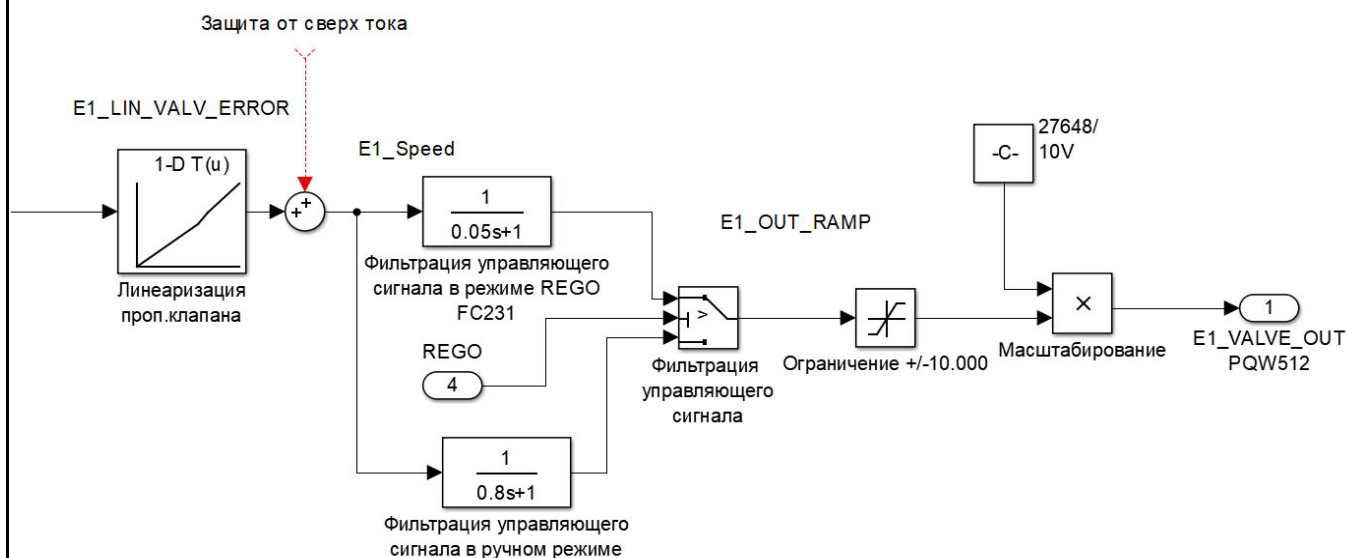


Рис. 2. Структурная схема формирования управляющего значения перемещением электрода первой фазы

Для оценки степени влияния постоянной времени фильтра на амплитуду механических колебаний и качество регулирования был проведён эксперимент на работающей печи. Механические колебания оценивались по изменению гидравлического давления, измеряемого в отводящей магистрали электрода № 3 (давление под электродом № 3).

Для фиксации амплитуды всплесков гидравлического давления в программе регулятора длины дуги каждой фазы было реализовано скользящее окно наблюдения с функцией расчёта локальных максимумов и минимумов [2]. Исходя из скорости протекания процессов в гидравлической системе ширина окна наблюдения выбрана равной 1,3 с. На графиках переходных характеристик (см. рис. 3 и 4) гидравлическое давление обозначено переменной E3_SNAP_PRESS_VAL, переменные E3_SNAP_WINW, E3_SNAP_MAXW и E3_SNAP_MINW – соответственно высота, локальные максимум и минимум окна наблюдения.

В ходе эксперимента постоянная времени фильтра увеличивалась от 100 до 350 мс, переходные процессы фиксировались программой цифрового осциллографа.

С увеличением значения постоянной времени фильтра его влияние на характер процессов регулирования возрастало. На рис. 3 показан процесс регулирования длины дуги для электрода № 3 с постоянной времени фильтра 200 мс. Как видно из рисунка, при одинаковых пиковых заданиях скорости перемещения электрода значение давления под ним имеет разную амплитуду: при включённом фильтре (сигнал E3_RAMP_ENABLE активен) амплитуда давления меньше, чем при выключенном.

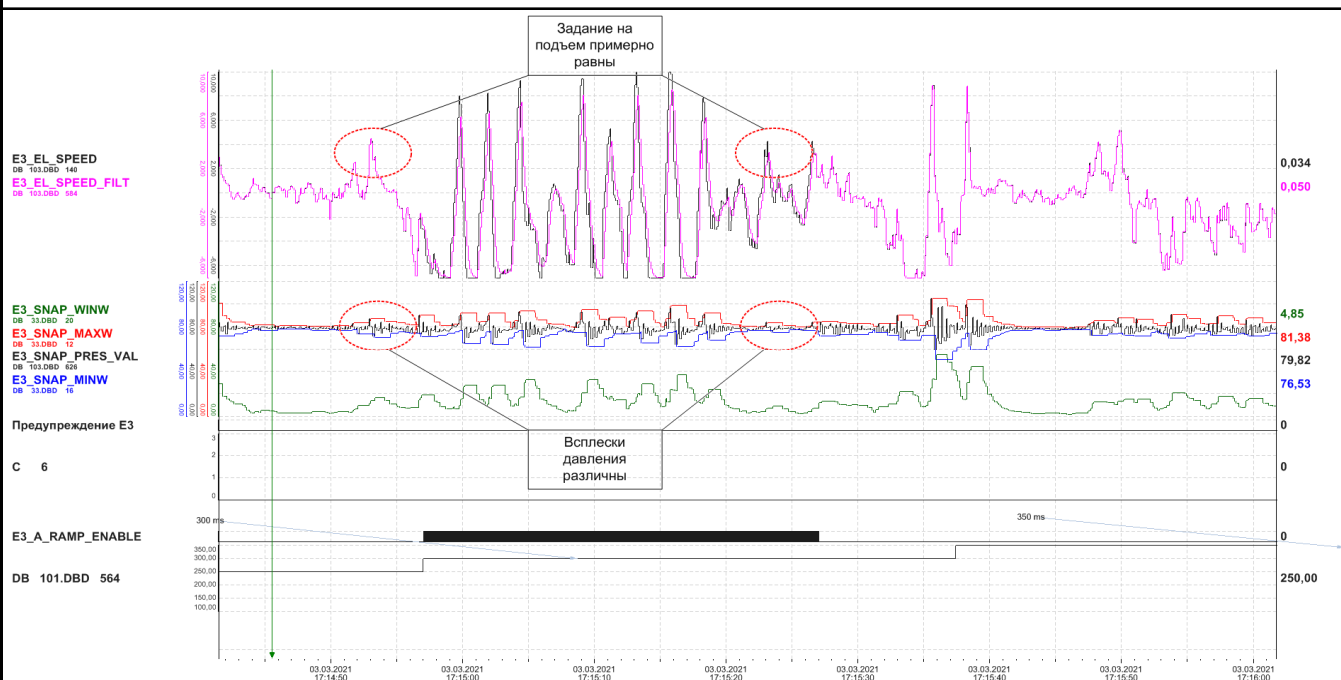


Рис. 3. Переходные характеристики в системе управления электродом № 3 при значении постоянной времени 200 мс

Включение фильтра замедляет скорость реакции системы на изменение тока под электродом. На рис. 4 показан переходный процесс для электрода № 3 с постоянной времени 350 мс с активированным фильтром.

Как видно из рис. 4, большая постоянная времени фильтра существенно затормозила систему и произошёл разрыв дуги.

Выбор величины значения постоянной времени фильтра должен обеспечить необходимое сглаживание механических колебаний без существенного замедления системы. При наличии полной структурной схемы системы управления расчёт постоянной времени фильтра возможен классическими методами. Однако часто структурная схема или её параметры неизвестны либо их трудно идентифицировать. Тогда установка постоянной времени фильтра производится эмпирическим методом.

В рассматриваемом случае постоянная времени фильтра была выбрана эмпирическим методом после проведения нескольких экспериментов и составила значение 110 мс.

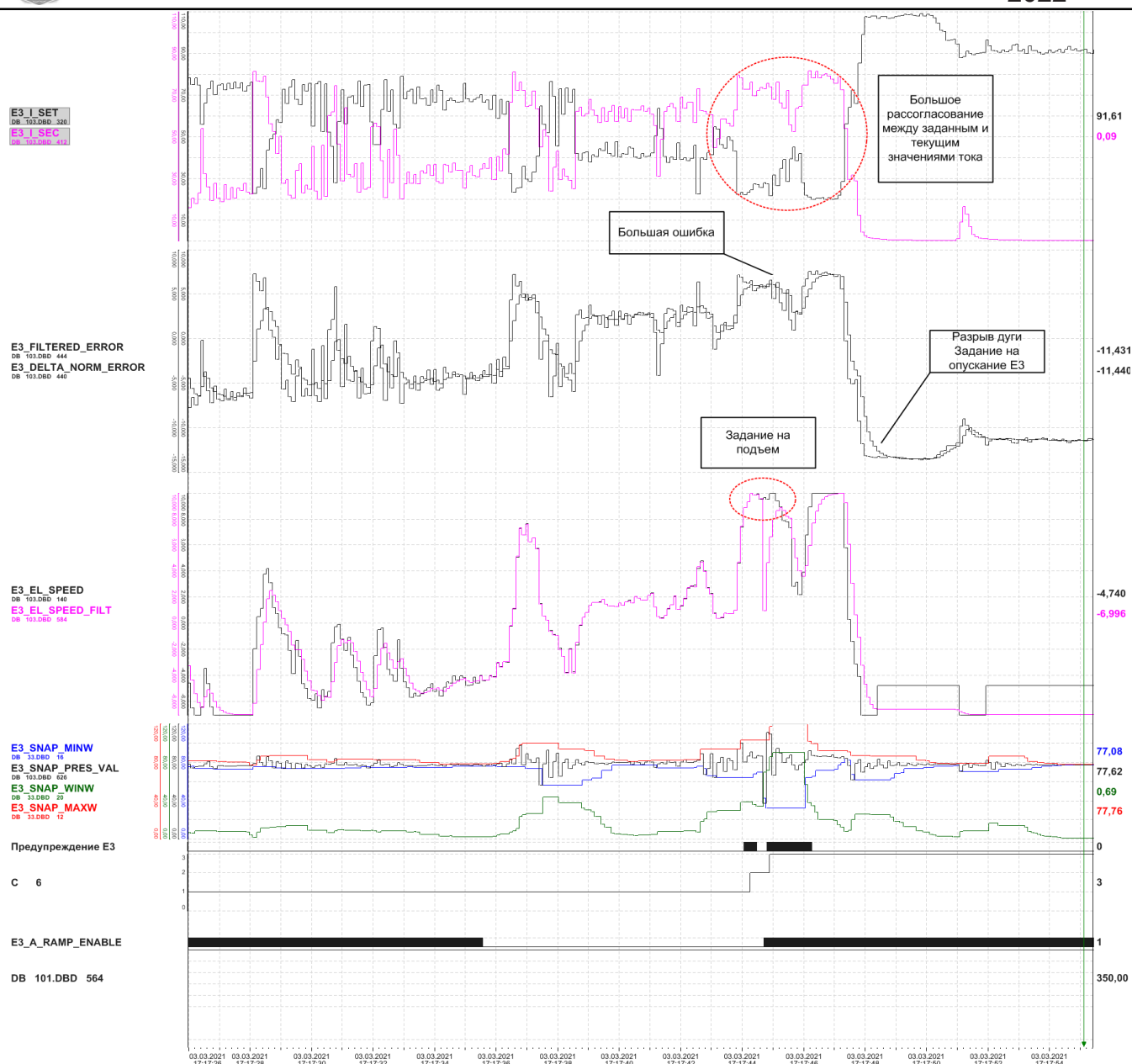


Рис. 4. Переходные характеристики в системе управления электродом № 3 при значении постоянной времени 350 мс

Закключение

Регулятор управления электродами представляет собой сложную электромеханическую систему, параметры которой зависят от многих факторов: старения и температуры масла, веса электрода, выбора рабочей точки. Правильный выбор коэффициента фильтрации позволяет эффективно управлять процессом плавления через оптимальную длину дуги и предотвратить поломки электродов, связанные с излишними механическими колебаниями.

Исследования, изложенные в материале статьи, проводились в рамках гранта № ВНО10/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».

ЛИТЕРАТУРА

1. Гутман, М. Б. Электрические печи сопротивления и дуговые печи: учеб. / М. Б. Гутман, Л. С. Кацевич, М. С. Лейканд. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
2. Лапшин, И. В. Автоматизация дуговых печей / И. В. Лапшин. – Москва: Издательство МГУ, 2004. – 165 с.
3. Стельмашук, С. В. Синтез следящего электропривода с контуром скорости, настроенного на модульный оптимум / С. В. Стельмашук, В. А. Бунаков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № IV-1 (28). – С. 54-62.
4. Сисоян, Г. А. Электрическая дуга в электрической печи: учеб. пособие / Г. А. Сисоян. – Москва: Металлургия, 1974. – 304 с.
5. Бургутин, Ю. И. Организация работ по эксплуатации систем автоматизации в чёрной металлургии: справ. / Ю. И. Бургутин, К. И. Котов, М. А. Шершевер. – Москва: Металлургия, 1986. – 272 с.
6. 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.
7. Глинков, Г. М. Контроль и автоматизация металлургических процессов: учебник для вузов / Г. М. Глинков, А. И. Косырев, Е. К. Шевцов. – Москва: Металлургия, 1989. – 351 с.
8. Глинков, Г. М. Теоретические основы автоматического управления металлургическими процессами / Г. М. Глинков, М. Д. Климовицкий. – Москва: Металлургия, 1985. – 304 с.
9. Стельмашук, С. В. Согласованное управление транспортировки ленты с модальным регулятором / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (38). – С. 28-40.
10. Глинков, Г. М. АСУ технологическими процессами в агломерационных и сталеплавильных цехах: учебник для вузов / Г. М. Глинков, В. А. Маковский. – Москва: Металлургия, 1981. – 360 с.
11. Urasov D. V., Intelligent Control System for the Complex of Ultrasonic Gas-Oxygen Burners / D. V. Urasov, S. P. Cherniy, V. A. Solovyev, A. V. Buzikayeva // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies, Springer Nature Switzerland AG 2021, Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, volume 200), pp. 106-116. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_12.
12. АСУ на промышленном предприятии: методы создания: справ. / С. Б. Михалев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 399 с.
13. Соловьев, В. А. Адаптивная фильтрация задающего сигнала системы управления расходом воды зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья / В. А. Соловьев, Д. В. Урасов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 4-13.
14. Urasov D., Second-order aperiodic link modelling with the use of Siemens programmable logical controller SCL hardware / D. Urasov, S. Cherniy, R. Bazhenov, L. Alekseeva, I. Korosteleva // Journal of Physics: Conference Series 1661 (2020) 012111.



Хрульков В. Н., Черный С. П.
V. N. Khrulkov, S. P. Cherny

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЧЁТКИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ

FEATURES OF FUZZY CONTROL ALGORITHM IMPLEMENTATION BASED ON PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS

Хрульков Владимир Николаевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: krapu@knastu.ru.

Vladimir N. Khrulkov – Post-graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: krapu@knastu.ru.

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: krapu@knastu.ru.

Sergey P. Cherny – 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: krapu@knastu.ru.

Аннотация. В представленной работе рассматривается один из подходов к аппаратной реализации интеллектуальных систем управления на основе теории нечётких множеств. Синтез нечёткого логического регулятора выполнен на базе универсальных программируемых логических контроллеров (ПЛК) и реализует процедуры управления маломощным электроприводом. Выбор объекта регулирования и аппаратных средств, реализующих интеллектуальную систему управления, был произведён по результатам анализа доступности на рынке и технических характеристик, учитывающих особенности программирования таких систем с использованием универсальных ПЛК. В качестве алгоритма нечёткого логического вывода был выбран алгоритм Мамдани как наиболее гибкий, универсальный и обладающий большим потенциалом по перенастройке блоков дефазификации. Представлены и проанализированы результаты работы нечёткого регулятора, управляющего скоростью вращения вала двигателя, проведён сравнительный анализ данных, полученных опытным путём на ПЛК, с результатами моделирования, полученными в среде инженерных вычислений MATLAB.

Summary. In the present paper, one of the approaches to the hardware implementation of intelligent control systems based on the theory of fuzzy sets is considered. The synthesis of a fuzzy logic controller is based on universal programmable logic controllers (PLCs) and implements control procedures for a low-power electric drive. The choice of the object of regulation and hardware implementing an intelligent control system was made based on the results of an analysis of market availability and technical characteristics that take into account the programming features of such systems using universal PLCs. The Mamdani algorithm was chosen as the fuzzy inference algorithm, as the most flexible, versatile and with great potential for reconfiguring defuzzification blocks. The results of the operation of a fuzzy controller regulating the speed of motor shaft rotation are presented and analyzed, a comparative analysis of the data obtained experimentally on a PLC with the simulation results in the Matlab engineering computing environment is carried out.

Ключевые слова: нечёткий логический регулятор, ПЛК, электродвигатель постоянного тока, система управления.

Key words: fuzzy current controller, PLC, DC motor, control system.

УДК 681.58

Исследования, изложенные в материале статьи, проводились в рамках гранта № ВНО10-2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».

Введение

Технологии управления, основанные на теории нечётких множеств, в настоящий момент нашли своё применение при формализации процессов, протекающих в сложных технологических объектах, и активно применяются для реализации сложных законов регулирования таких объектов. Нечёткие алгоритмы управления в совокупности с использованием классических способов и методик регулирования позволяют существенно улучшить ряд динамических характеристик развитых систем автоматизации, упростить синтез процедур управления такими системами, а также расширить возможности учёта и компенсации детерминированных и недетерминированных возмущающих воздействий.

Главной проблемой, связанной с аппаратной реализацией интеллектуальных систем управления, основанных на мягких вычислениях, является отсутствие специализированных средств промышленного исполнения или их недоступность вследствие введенных ограничительных мер. В качестве примера можно отметить ряд продуктов компании Siemens, которые на текущий момент либо сняты с производства, либо исключены из поддержки, среди них микроконтроллер Siemens SAE81C99A и программное обеспечение FuzzyControl++. Для других известных производителей подобных технических средств, таких как Arduino, Schneider Electric, Raspberry Pi, характерны сложности, обусловленные интеграцией и существенной ограниченностью специализированных библиотек, позволяющих синтезировать рассматриваемые нечёткие логические контроллеры.

Выполнение подобного рода систем управления с применением универсальных промышленных контроллеров представляет собой достаточно трудоёмкую задачу по причине необходимости программной реализации механизмов нечёткого вывода с использованием специализированных средств проектирования.

Для аппаратной реализации нечёткого регулятора, имеющего в своей основе ПИД-закон управления, предлагается использовать аппаратно-программную платформу Arduino DUE, имеющую 32-битное ядро, позволяющее выполнять операции с данными шириной 4 байта за 1 такт (частота процессора (CPU) 84 МГц), и библиотеку Embedded Fuzzy Logic Library (eFLL) для реализации систем, основанных на мягких вычислениях.

В качестве объекта управления используется электродвигатель постоянного тока серии Tetrix MAX, на валу которого установлен квадратурный энкодер US Digital для реализации обратной связи по скорости. Анализ технических характеристик показал, что быстродействие контроллера и датчика в обратной связи достаточно для реализации нечёткого ПИД-регулятора на предлагаемой аппаратной платформе. Пропорциональный канал регулирования скорости вращения электродвигателя постоянного тока представляет собой ШИМ в совокупности с нечётким корректирующим модулем, в основе которого заложен алгоритм нечёткого логического вывода Мамдани. Предварительная настройка регулятора осуществлялась с применением языка инженерных вычислений MATLAB, т. к. это позволяет оценить адекватность реализованных моделей. Использование функций принадлежности треугольного вида при формализации входных и выходных лингвистических переменных в модели системы и интеллектуальном регуляторе, реализованном на микроконтроллере, приводит к некоторому рассогласованию между выходными сигналами, описывающими переходные характеристики по скорости.

Преимущество использования аппаратной платформы Arduino заключается в её доступности на рынке, простоте языка программирования, наличии и удобстве использования стандартного набора библиотек, а также возможности подключения большого количества разных типов датчиков и исполнительных механизмов. Вместе с тем необходимо отметить, что существенными недостатками библиотеки eFLL для дальнейших исследований при построении интеллектуальных си-

стем являются отсутствие нечёткого логического вывода Сугено, использование центроидного метода приведения к чёткости, а также применение функций принадлежности исключительно аппроксимированного вида.

Методика реализации нечёткого логического регулятора аппаратными средствами

Основой для формирования интеллектуальной системы управления с использованием нечёткого логического регулятора (НЛР) на основе ПЛК будет сравнительный анализ функционирования блоков дефаззификации на имитационной модели, реализованной средствами языка инженерных вычислений.

На начальном этапе синтез основных блоков НЛР был проведён в программной среде MATLAB с использованием модуля Fuzzy Logic Toolbox. Для проверки работоспособности НЛР на ПЛК была использована аппаратно-программная платформа Arduino DUE, имеющая 32-битное ядро и библиотеку Embedded Fuzzy Logic Library (eFLL) для реализации систем, основанных на мягких вычислениях (см. рис. 1).

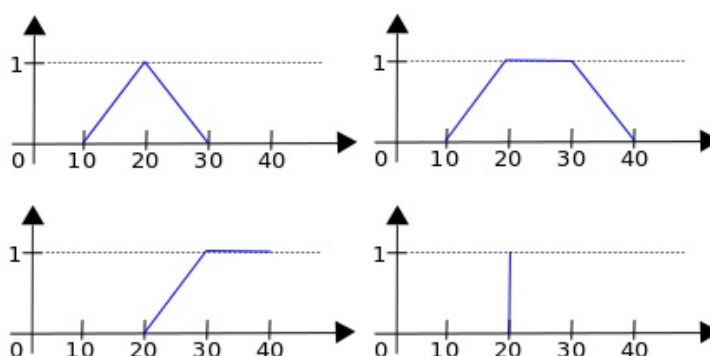


Рис. 1. Функции принадлежности, предоставляемые библиотекой eFLL

На рис. 2 приведена функциональная схема нечёткого модуля, используемого для предварительного тестирования НЛР. При построении был использован алгоритм нечёткого логического вывода Мамдани с центроидным методом приведения к чёткости, а также одной входной лингвистической переменной и одной выходной. Выбранная библиотека eFLL существенно ограничена и настроена на реализацию алгоритма вывода Мамдани. Кроме того, необходимо отметить, что ограничения также распространяются на форму функций принадлежности (сигмоидальные, гауссовы, z- и s-образные), методы приведения к чёткости (первого и среднего максимумов), а также алгоритм вывода Такаги-Сугено.

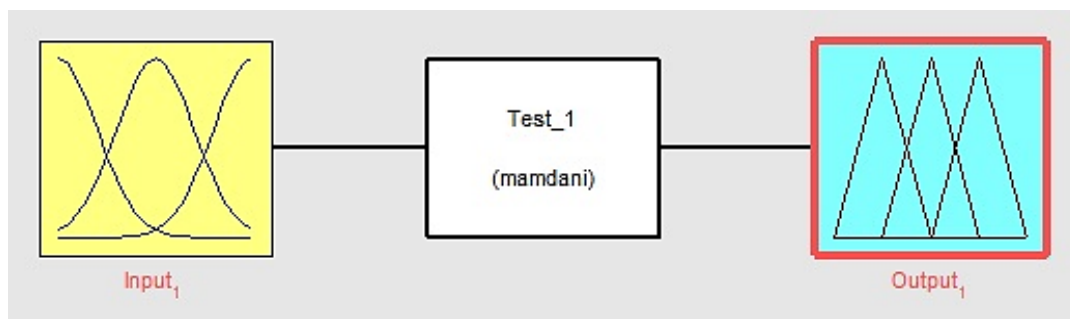


Рис. 2. Нечёткий модуль

На рис. 3 и 4 представлены входная и выходная лингвистические переменные НЛР с тремя элементами в базовом терм-множестве и функциями принадлежности треугольной формы. Необходимо отметить, что для проверки качества функционирования блоков дефаззификации данных НЛР для ПЛК используются функции принадлежности аппроксимированного вида.

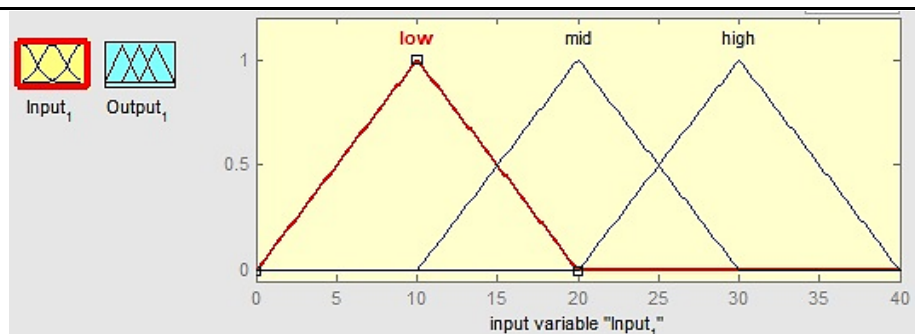


Рис. 3. Входная лингвистическая переменная НЛР

База нечётких продукционных правил имеет следующий вид:

1. If (input_1 is low) then (Output_1 is low);
2. If (input_1 is mid) then (Output_1 is mid);
3. If (input_1 is high) then (Output_1 is high);

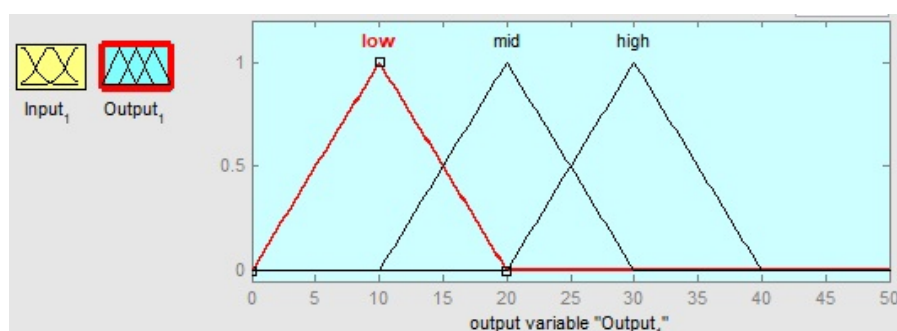


Рис. 4. Выходная лингвистическая переменная НЛР

В табл. 1 представлены результаты дефаззификации регуляторами, реализованными средствами имитационного моделирования и ПЛК. Данные для входных параметров в интервалах от 1 до 10 и от 30 до 40 были исключены в связи с полным совпадением результатов нечёткого вывода у ПЛК и модели. Из таблицы видно, что в зоне пересечения функций принадлежности имеется повторяющаяся ошибка при генерации результата НЛР, которую необходимо нивелировать в дальнейшем при построении системы с использованием ПЛК. Наличие данной ошибки связано с тем, что алгоритм нечёткого вывода Мамдани, осуществлённый в библиотеке eFLL для Arduino, реализован не в полной мере и имеет ряд существенных ограничений.

Далее проведём моделирование работы нечёткого регулятора с применением языка инженерных вычислений. Основные параметры модели были получены непосредственно с объекта регулирования, а также выведена зависимость изменения скорости вращения вала двигателя от заполнения ШИМ с учётом ограничений обеспечения пуска двигателя минимальным значением заполнения.

База нечётких продукционных правил имеет следующий вид:

1. If (RPS is Low) then (PWM is LowP);
2. If (RPS is LowMid) then (PWM is LowMidP);
3. If (RPS is Mid) then (PWM is MidP);
4. If (RPS is MidHigh) then (PWM is MidHighP);
5. If (RPS is High) then (PWM is HighP);

После настройки и тестирования нечёткого регулятора на имитационной модели проведём анализ его работоспособности непосредственно с применением ПЛК. На рис. 5 представлена схема подключения основных элементов к плате контроллера.

Таблица 1

Результаты дефазификации средствами ПЛК и MATLAB

Входные параметры	Вывод MATLAB (x1)	Вывод ПЛК (x2)	Ошибка (x1-x2)
11	11,3	11,61	-0,31
12	12,4	12,73	-0,33
13	13,3	13,59	-0,29
14	14,2	14,32	-0,12
15	15	15	0
16	15,8	15,8	0
17	16,7	16,61	0,09
18	17,6	17,43	0,17
19	18,7	18,28	0,42
20	20	20	0
21	21,3	21,61	-0,31
22	22,4	22,73	-0,33
23	23,3	23,59	-0,29
24	24,2	24,32	-0,12
25	25	25	0
26	25,8	25,8	0
27	26,7	26,61	0,09
28	27,6	27,43	0,17
29	28,7	28,28	0,42

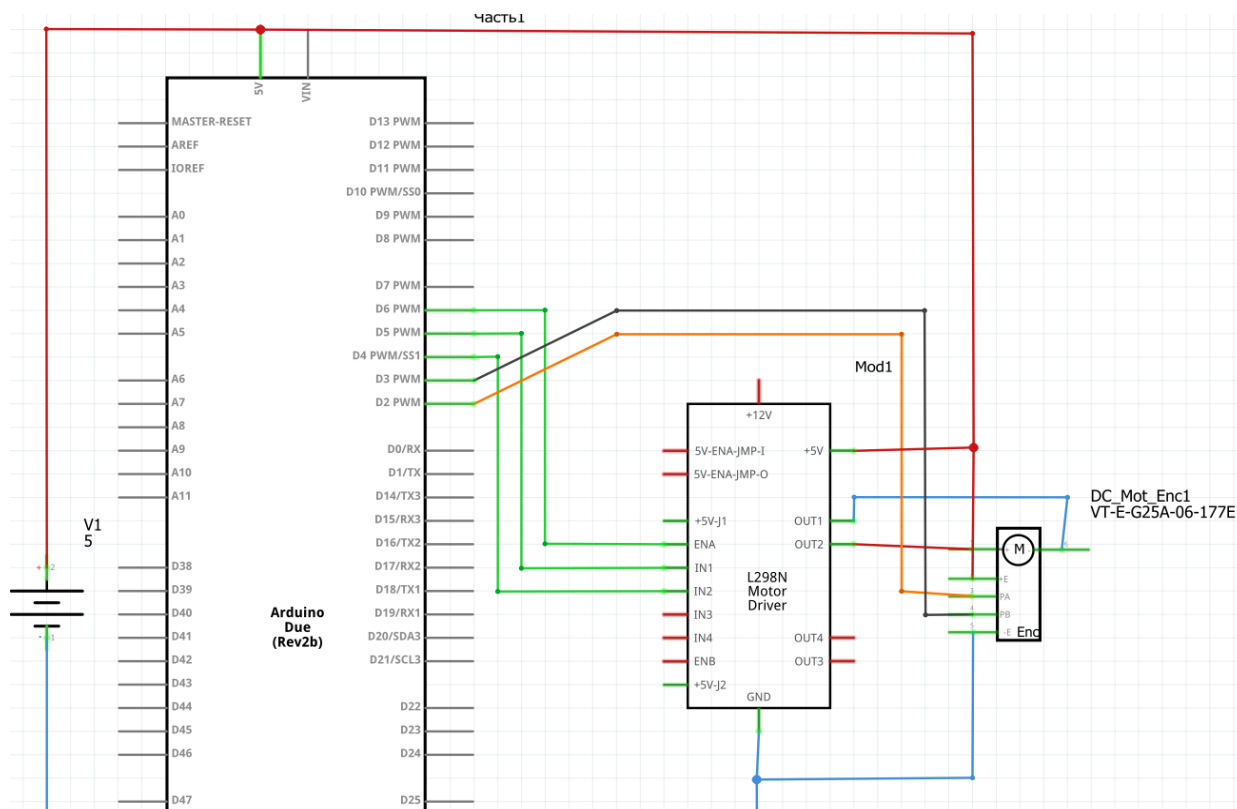


Рис. 5. Функциональная схема подключения ПЛК

Алгоритм подключения электропривода реализован по следующей схеме: фазы двигателя подключены к драйверу двигателя L298N в разъёмы OUT1 и OUT2; питание энкодера 5В и Gnd берётся непосредственно с портов контроллера; для обработки показаний с датчика разъёмы энкодера А и В подключаются к цифровым портам 2 и 3 ПЛК соответственно, а драйверы ena, in1 и in2 соединены с портами контроллера 6, 5 и 4, функции которых состоят в задании уровня ШИМ и направления вращения вала двигателя.

Ниже представлен синтаксис настройки входных и выходных термов нечёткого регулятора треугольной формы, которые были отстроены с помощью функции MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.

Настройка входных термов скорости вращения вала электродвигателя на Arduino:

```
FuzzyInput *RPS = new FuzzyInput(1); // создание первого нечёткого входа
```

```
FuzzySet *LowR = new FuzzySet(83.36, 87.74, 87.74, 101); // создание термов  
RPS->addFuzzySet(LowR);
```

```
FuzzySet *LowMidR = new FuzzySet(91.4, 100, 100, 111); // создание термов  
RPS->addFuzzySet(LowMidR);
```

```
FuzzySet *MidR = new FuzzySet(101, 111, 111, 121);  
RPS->addFuzzySet(MidR);
```

```
FuzzySet *MidHighR = new FuzzySet(111, 121, 121, 130);  
RPS->addFuzzySet(MidHighR);
```

```
FuzzySet *HighR = new FuzzySet(121, 134.4, 134.4, 186);  
RPS->addFuzzySet(HighR);
```

```
fuzzy->addFuzzyInput(RPS);
```

Настройка выходных термов уровня ШИМ Arduino:

```
FuzzyOutput *PWM_1 = new FuzzyOutput(1); // создание первого нечёткого выхода
```

```
FuzzySet *LowP = new FuzzySet(60, 80, 80, 100);  
PWM_1->addFuzzySet(LowP);
```

```
FuzzySet *LowMidP = new FuzzySet(80.1, 102, 102, 124.9);  
PWM_1->addFuzzySet(LowMidP);
```

```
FuzzySet *MidP = new FuzzySet(105, 137, 137, 160);  
PWM_1->addFuzzySet(MidP);
```

```
FuzzySet *MidHighP = new FuzzySet(140, 157.5, 157.5, 240);  
PWM_1->addFuzzySet(MidHighP);
```

```
FuzzySet *HighP = new FuzzySet(230, 255, 255, 280);  
PWM_1->addFuzzySet(HighP);
```

```
fuzzy->addFuzzyOutput(PWM_1);
```

Далее представлен фрагмент описания базы знаний НЛР, который соответствует данным, полученным с учётом имитационного моделирования (см. рис. 6 и 7).

Объявление правил нечёткого регулятора:

```
//настройка первого правила
FuzzyRuleAntecedent *ifRPSLow = new FuzzyRuleAntecedent();
ifRPSLow->joinSingle(LowR);

FuzzyRuleConsequent *thenPWM_1_Low = new FuzzyRuleConsequent();
thenPWM_1_Low->addOutput(LowP);

FuzzyRule *fuzzyRule01 = new FuzzyRule(1, ifRPSLow, thenPWM_1_Low);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule01);

// настройка второго правила
FuzzyRuleAntecedent *ifRPSLowMid = new FuzzyRuleAntecedent();
ifRPSLowMid->joinSingle(LowMidR);

FuzzyRuleConsequent *thenPWM_1_LowMid = new FuzzyRuleConsequent();
thenPWM_1_LowMid->addOutput(LowMidP);

FuzzyRule *fuzzyRule02 = new FuzzyRule(2, ifRPSLowMid, thenPWM_1_LowMid);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule02);
```

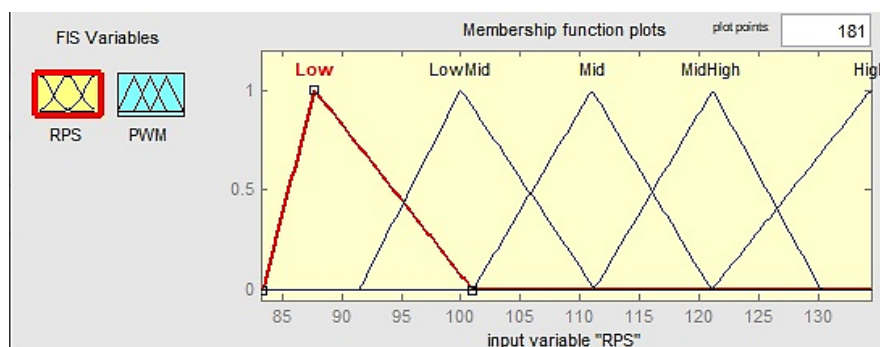


Рис. 6. Базовое терм-множество лингвистической переменной «скорость вращения вала»

Фрагмент программного кода считывания входного значения скорости вращения с монитора порта:

```
void loop ()
{
    //ввод данных через монитор порта

    input_m = Serial.readString();
    irm = input_m.toInt();
    if (0 < input_m.length() && irm >= 0 && irm <= 25500)
    {
        input = float(irm) / 100.00;
        if (input<=90) {input=90;}
        if (input>=130) {input=130;}
    }
}
```

С помощью монитора порта задаётся входное значение необходимой скорости вращения вала двигателя с учётом следующих ограничений: выбранный двигатель может развивать минимальную скорость в 90 об/мин и максимальную в 130 об/мин.

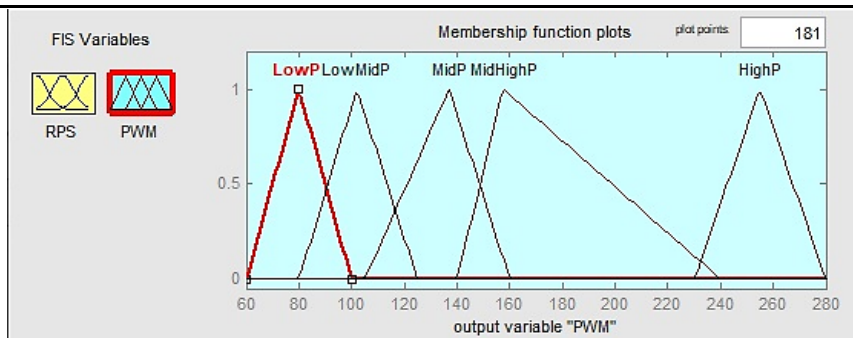


Рис. 7. Базовое терм-множество лингвистической переменной «уровень ШИМ»

Код запуска электродвигателя:

if ((input > 90) && (P_start == HIGH)) //запуск двигателя параметром с монитора порта с последующей остановкой данной команды

```
{
    PWM_S = PWM_S + 50;
    if (PWM_S >= 255) { PWM_S = 255; }
    analogWrite( ena, PWM_S );
    digitalWrite( in1, HIGH );
    digitalWrite( in2, LOW );
```

```
    if (velRPS >= input)
    { P_start = LOW; }
}
```

Алгоритм запуска двигателя осуществляется по следующей схеме:

- проверяется входной параметр скорости и сравнивается с пороговым значением;
- логическая переменная, отвечающая за первичный пуск двигателя, проверяется на истинность ($P_Start = 1$);
- увеличивается уровень ШИМ (переменная PWM_S) до тех пор, пока значение показаний энкодера не станет равным заданному значению;
- управление двигателем переходит к нечёткому регулятору.

Программный код управления скоростью вращения двигателя с использованием НЛР имеет следующую нотацию:

```
if (P_start == LOW)
{
    // регулятор
    Error = input - velRPS;
    U = k * Error;
    RPS = input + U;
    Serial.print (" // ");
    Serial.print ("RPS = "); Serial.print (RPS);
    Serial.print (" // ");
    Serial.print ("Error = "); Serial.print (Error);
    Serial.println("\n\nEntrance: ");
    Serial.print("\t\tRPS: ");
    Serial.println(RPS);
    fuzzy->setInput(1, RPS);
    fuzzy->fuzzify();
    float output = fuzzy->defuzzify(1);
    Serial.println("Result: ");
```



```
Serial.print("\t\t\tPWM_1: ");
Serial.println(output);

analogWrite( ena, output );
digitalWrite( in1, HIGH );
digitalWrite( in2, LOW );

}
}
```

В базовом варианте пропорциональная составляющая закона управления формируется с использованием стандартных классических подходов, а затем передаётся в качестве уставки на интеллектуальное управляющее устройство (переменная первичного запуска $P_Start = 0$). Рассчитанное значение отклонения передаётся на вход нечёткого регулятора, и после дефазификации полученный результат записывается в переменную `output`, которая отвечает за уровень сигнала ШИМ, подаваемый на установленный порт контроллера.

На рис. 8 – 11 представлены результаты работы регулятора при различных входных задающих воздействиях. Из полученных результатов можно сделать вывод, что между интеллектуальной системой управления, реализованной с использованием ПЛК, и имитационной моделью существует небольшое отклонение. Подобного рода расхождения обусловлены особенностями реализации алгоритмов нечёткого вывода с применением языка инженерных вычислений и весьма ограниченными возможностями специализированного программного обеспечения ПЛК.

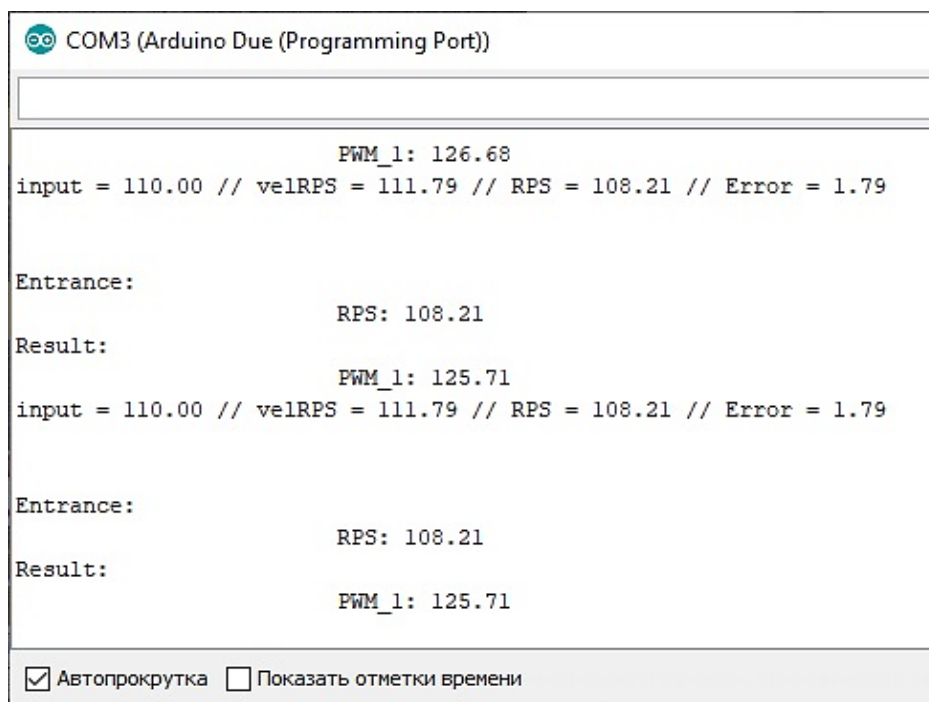


Рис. 8. Результат работы нечёткого регулятора на Arduino при входном значении 110

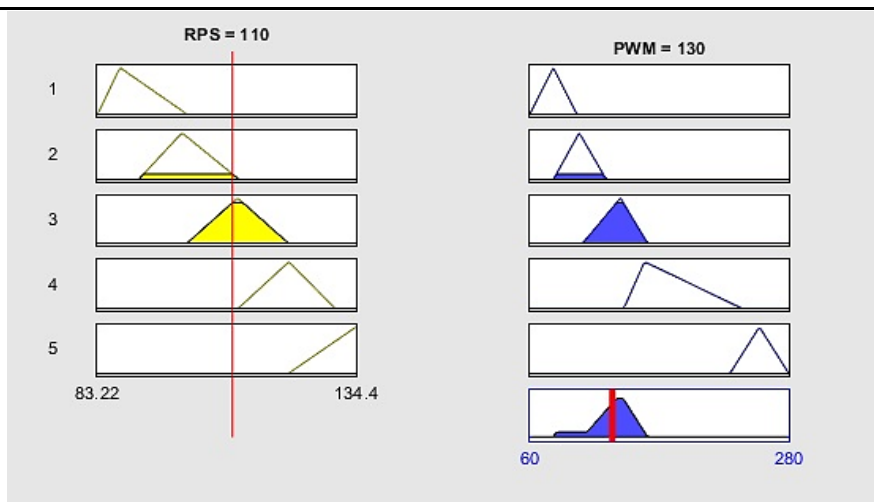


Рис. 9. Результат работы смоделированного нечёткого регулятора при входном значении 110

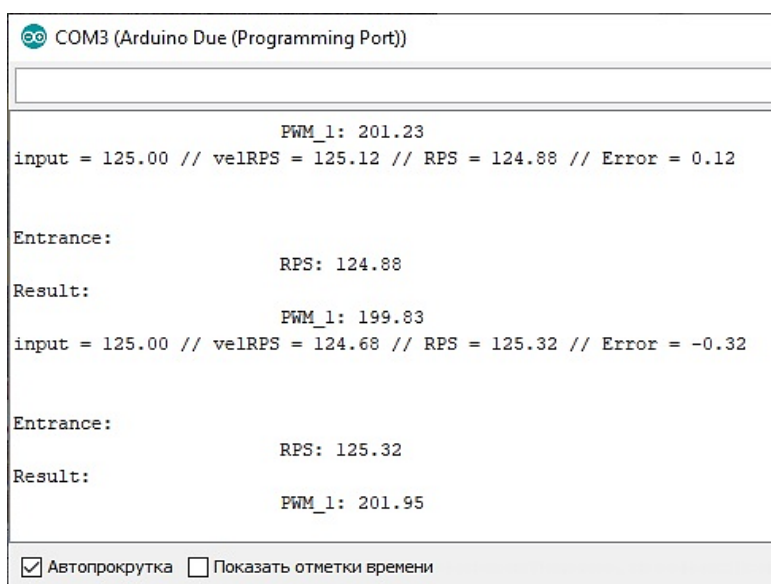


Рис. 10. Результат работы нечёткого регулятора на Arduino при входном значении 125

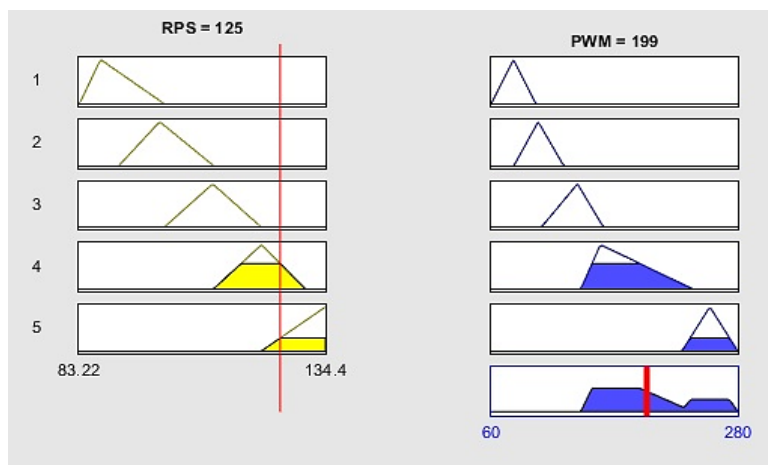


Рис. 11. Результат работы смоделированного нечёткого регулятора при входном значении 125

Заключение

Анализ результатов, полученных в ходе имитационного моделирования с применением стандартных программных платформ и экспериментальных данных, формируемых на основе программной реализации механизма нечёткого логического вывода, с использованием аппаратных средств показал минимальную разницу при дефазификации выходной лингвистической переменной. Наличие ошибки обусловлено рядом весьма существенных условий, заложенных в библиотеку eFLL, среди которых необходимо отметить ограничения, связанные с количеством и видом функций принадлежности, а также с отсутствием алгоритма нечёткого вывода Сугено. Также возможности библиотеки ограничивают реализацию более сложных структур и форм нечётких систем управления. Однако необходимо отметить, что применение такого подхода позволит выполнить элементарные интеллектуальные модули, формирующие процедуры управления для систем регулирования нижнего уровня автоматизации, с учётом отсутствия у основных производителей специализированных аппаратных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cherniy S. P., Solovyev V. A. General Principals of Building the Fuzzy Multi-Cascade Tracking Control Systems / 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. 2019. C. 8602646. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602646.
2. S. P. Cherniy, V. I. Susdorf, A. V. Buzikaeva, V. N. Khrulkov Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2020, ew 18: e19, DOI:10.4108/eai.13-7-2018.165496.
3. V. V. Trotsenko, «Technological process control Systems and information technologies» / V. V. Trotsenko [et al.]. – Moscow: Yurayt, 2017. – 160 p.
4. R. Goswami, D. Joshi, «Performance Review of Fuzzy Logic Based Controllers Employed in Brushless DC Motor», Proce-dia Computer Science, vol. 132, pp. 623-631, 2018.
5. A. M. Zaki, M. El-Bardini, F. A. S. Soliman, and M. M. Sharaf, «Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control», Ain Shams Engineering Journal, vol. 9, pp. 65-75, March 2018.
6. B. N. Kommula, and V. R. Kota, «Direct instantaneous torque control of Brushless DC motor using firefly Algorithm based fractional order PID controller», Journal of King Saud University – Engineering Sciences, vol. 32, issue 2, pp. 133-140, February 2020.
7. A. R. Ofoli, «Fuzzy-Logic Applications in Electric Drives and Power Electronics», Power Electronics Handbook (Fourth Edition), 2018, pp. 1221-1243.
8. A. de la Guerra, L. Alvarez-Icaza, Lizeth Torres, «Brushless DC motor control with unknown and variable torque load», IFAC-PapersOnLine, vol. 5, Issue 13, 2018, pp. 644-649.
9. A. Rodriguez-Molina, M. G. Villarreal-Cervantes, J. Alvarez-Gallegos, Mario Aldape-Perez, «Bio-inspired adaptive control strategy for the highly efficient speed regulation of the DC motor under parametric uncertainty», Applied Soft Computing, vol. 75, pp. 29-45, February 2019.
10. Solovyev V. A., Deryuzhkova N. E., Htet K. A. Fuzzy-Based Multi-Point Interconnected Control System of Electrical Drives for Sheet Met-Al Forming / 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. 2019. C. 8602706. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602706.
11. Пивоваров, А. И. Адаптивное управление по состоянию контуром скорости с настройкой на модульный оптимум / А. И. Пивоваров, С. В. Стельмашук // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 861-864.
12. Стельмашук, С. В. Синтез следящего электропривода с контуром скорости, настроенного на модульный оптимум / С. В. Стельмашук, В. А. Бунаков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № IV-1 (28). – С. 54-62.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Иванов С. Н., Ким К. К., Коколевский М. А., Колесник М. Б., Плотников Д. В.
S. N. Ivanov, K. K. Kim, M. A. Kokolevsky, M. B. Kolesnik, D. V. Plotnikov

УЧЁТ ОСЕВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

ACCOUNTING OF AXIAL LOADS IN THE DESIGN OF ELECTROMECHANICAL DRIVES

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

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

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., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical and Heat Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Коколевский Михаил Андреевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: MikhailAn2014@yandex.ru.

Michael A. Kokolevsky – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: MikhailAn2014@yandex.ru.

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

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

Плотников Дмитрий Витальевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: dmitriydimchez@mail.ru.

Dmitry V. Plotnikov – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: dmitriydimchez@mail.ru.

Аннотация. В статье предложен подход к учёту осевой нагрузки линейных электромеханических приводов. Получены аналитические выражения для определения тяговых усилий, обеспечиваемых такими устройствами. Приведены расчётные выражения для вероятностной оценки надёжности передаточных элементов. Обоснованы ограничивающие факторы и определены критерии работоспособности привода. Адаптирована методика анализа механических нагрузок в элементах привода, основанная на апробированных машиностроительных подходах. Показана возможность и приведены результаты использования современных программных пакетов для расчёта силовых элементов привода на прочность.

Summary. The article proposes an approach to accounting for the axial load of linear electromechanical drives. Analytical expressions are obtained to determine the traction forces provided by such devices. Calculation expressions for probabilistic estimation of reliability of transfer elements are given. The limiting factors are justified and



the criteria of drive operability are determined. The method of analyzing mechanical loads in drive elements based on proven engineering approaches has been adapted. The possibility is shown and the results of using modern software packages for calculating the strength of the drive power elements are presented.

Ключевые слова: осевая нагрузка, приводной механизм, тяговые усилия.

Key words: axial load, drive mechanism, traction force.

УДК 621.31:621.8

Введение. Обеспечение надёжной работы электромеханических приводов, преобразующих вращательное движение в поступательное по заданной траектории, является одной из задач их проектирования. При этом основной трудностью является учёт эксплуатационных факторов, которые, по статистическим данным, оказывают существенное влияние на срок службы технического оборудования. Доля отказов вследствие их действия достигает 35 % [1]. Традиционные расчёты, включающие проектную и проверочную части, в определённой степени позволяют корректировать параметры проектируемого привода с учётом основных эксплуатационных воздействий, но их точность остаётся низкой. Частично в машиностроении это компенсируется введением коэффициентов надёжности (принимаемых порядка 1,2), что приводит к ухудшению массогабаритных и экономических характеристик. Повышение эффективности проектируемого привода связано с предварительным определением реальных нагрузок, на основе которых выполняется расчёт. Такой подход может быть реализован на результатах статистических исследований, использовании аналитических выражений, визуализации состояния элементов, получаемой на основе имитационных моделей, физического эксперимента. Целесообразным является использование специальных программных пакетов, например SolidWorks, Solid Edge, NX (Siemens), CATIA, T-FLEX.

Постановка задачи. Нахождение действующих нагрузок требует знания качественных и количественных связей между элементами привода. Объект исследования – результат синтеза обобщённого электромеханического преобразователя и тяги винтовой пары, расположенной в резьбовой части ротора двигателя [2; 3]. На первом этапе составляется структурная схема, позволяющая выделить стандартные с точки зрения имеющихся методик узлы (например, вал, шестерня, подшипник и т. п.). Затем вводятся распределённые или сосредоточенные силы. В качестве примера можно рассмотреть влияние осевой нагрузки, обусловленной тяговым усилием, приложенным к валу электромеханического привода.

В машиностроительной практике используются два расчётных метода: детерминированный и вероятностный.

В первом случае принимается, что действуют циклически изменяющиеся изгибающие и крутящие моменты, при этом осевая нагрузка не учитывается. Расчёт тяги привода по сопротивлению усталости приведён в [4]. Во втором методе (вероятностном) учитывается случайный характер усталостного разрушения вала. Принимаются нормальные законы распределения пределов выносливости, амплитуд напряжений и среднеквадратических отклонений.

Теоретические основы. Осевая сила F_m , сжимающая (растягивающая) тягу, создаётся вращающим моментом $M_{вр}$ и удерживающим тягу от вращения моментом $M_{уд}$, приложенным к одному из её концов.

Уравнение равновесия для вращающего момента имеет вид

$$M_{вр} = M_{тр} + M_{уд}, \quad (1)$$

где $M_{тр}$ – момент трения в резьбе.

Первое слагаемое в выражении (1) определяется по выражению

$$M_{тр} = 0,5 F_m d_p \operatorname{tg}(\theta + \varphi), \quad (2)$$

где d_p – диаметр отверстия в месте установки тяги; θ – угол подъёма резьбы; $\varphi = \arctg f_p$ – угол трения для резьбового соединения, здесь f_p – коэффициент трения (приведённый) с учётом угла профиля.

Второй член в (1) находится с учётом того, что в резьбовой части приведённый радиус сил трения равен среднему радиусу торца тяги:

$$M_{уд} = 0,5 F_m f D_{cp}, \quad (3)$$

где $D_{cp} = 0,5(D_1 + d_p)$, здесь D_1 – наружный диаметр опорного торца тяги; f – торцевой коэффициент трения.

Подстановка формул (2) и (3) в (1) приводит к уравнению, устанавливающему связь вращающего момента привода и его тягового усилия:

$$M_{вр} = 0,5 F_m d_p \left(\frac{D_{cp}}{d_p} f + \tg(\theta + \varphi) \right). \quad (4)$$

С учётом известного в электромеханике выражения для электромагнитного момента электромеханического преобразователя [5] уравнение (4) для определяемой осевой нагрузки принимает вид

$$F_m = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\pi d_p f_1 s \left((r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 (\frac{D_{cp}}{d_p} f + \tg(\theta + \varphi)) \right)}. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет вычислить осевую нагрузку при известных параметрах электромеханического привода, которые могут быть выбраны из справочной литературы [6].

На рис. 1 показаны результаты расчёта усилий с использованием пакета Statistica 12.

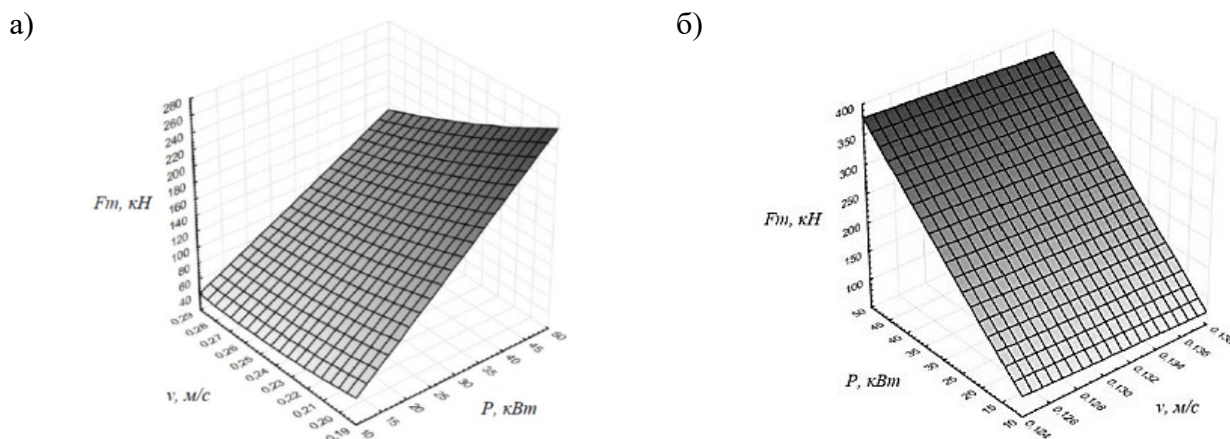


Рис. 1. Зависимость осевого усилия от мощности и линейной скорости привода: а – $2p = 2$; б – $2p = 4$

Следует отметить, что удельные тяговые характеристики электромеханического привода независимо от числа полюсов $2p$ существенно превышают аналогичные параметры традиционных пневматических и гидравлических приводов.

Определение величины осевого усилия позволяет перейти к моделированию напряжённо-деформированного состояния привода и как к одному из результатов нахождению его «слабейшего звена».

Выбор программного пакета. Среди существующих пакетов программ, позволяющих производить расчёты на прочность и тепловые расчёты, следует отметить программные пакеты MSC Nastran, Ansys и SolidWorks. Обзор данных программ привёл к выбору пакета SolidWorks Simulation. Основными достоинствами программы являются удобный интерфейс, позволяющий быстро её освоить, наличие русскоязычной версии, автоматическое и ручное создание конечного элемента сеток (3- и 6-узловые треугольники, 4- и 10-узловые тетраэдры), а её модели могут быть легко интегрированы в CAD/CAM/CAE-системы различных уровней [6].

Для проведения вычислительного эксперимента в программе SolidWorks создаётся модель конструктивно модифицированного электромеханического привода. Для осуществления операций по линейному перемещению в твёрдотельной модели предусмотрено технологическое отверстие во вращающемся элементе (роторе), в котором выполнена трапецеидальная резьба для последующей установки исполнительного элемента (тяги). Конструктивное исполнение модифицированного двигателя подробно описано в [7].

Статический анализ. Конструктивно привод представляет собой сложный механизм, и для того, чтобы оценить его способность выдерживать осевые нагрузки, необходим учёт большого количества равноценных внутренних и внешних факторов. Для повышения эффективности получения результата задача разбивается на два этапа:

1. Анализ передаточного механизма, который конструктивно представляет собой втулку ротора и тягу с нарезанной соответственно на их внутренней и внешней стороне трапецеидальной резьбой. При этом вращающий момент приложен к втулке ротора и равномерно распределён по ней.

2. Статический анализ несущих элементов привода.

Для проведения статического анализа конструкциям на обоих этапах должны быть заданы закрепления, определяющие степени свободы, соответствующие данной задаче, и приложены внешние нагрузки.

На первом этапе исследования установлено, что наиболее нагруженной частью является исполнительный элемент – тяга. На рис. 2 показано, что нагрузка по виткам резьбы распределяется неравномерно и в основном приложена к первой половине витков, там же и возникают наибольшие напряжения во всей конструкции. На рис. 3 в увеличенном масштабе показано распределение нагрузки на первых витках резьбового соединения.

Результаты второго этапа получены для случая, когда внешняя нагрузка приложена в виде равномерно распределённой силы. Её величина определяется из эпюры напряжений первого исследования.

Установлено, что максимальные напряжения наблюдаются в местах соединений, а также в местах закрепления корпуса привода, это связано с возникновением момента между областью крепления лап к корпусу и местом приложения силы.

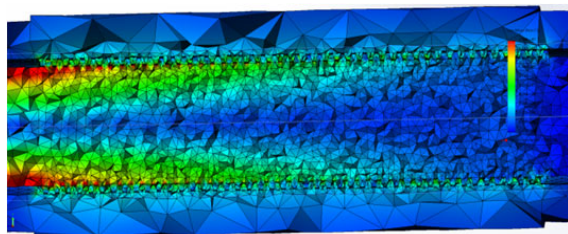


Рис. 2. Визуализация напряжений от осевой нагрузки

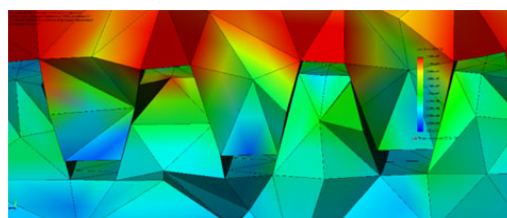


Рис. 3. Распределение нагрузки на витках резьбового соединения

В целом, проведённые вычислительные эксперименты показали, что электромеханический привод теоретически может выдерживать осевые нагрузки, но при осевом нагружении принцип равнопрочности не выполняется. Наибольший запас прочности имеет корпус привода (при использовании типового двигателя), наименьший – передаточный механизм. Для обеспечения прин-

ципа равнопрочности и повышения эффективности использования рассматриваемой конструкции электропривода, т. е. чтобы всё устройство имело примерно одинаковый запас прочности, конструкция требует внесения изменений. Следует отметить, что задача моделирования требует знания значений характеристик материалов, комплектующих изделий, особенностей технологических процессов, что существенно затрудняет, а в ряде случаев и делает невозможным проектирование привода с равнопрочными элементами, т. к. не только велико количество воздействующих факторов, но и сами по себе они достаточно противоречивы (например, повышение единичной мощности и снижение тепловых нагрузок, напрямую связанных со сроком службы привода, расширение функциональных возможностей за счёт увеличения режимов работы и обеспечение механической прочности по нормальным и касательным напряжениям).

Проектирование привода при осевых нагрузках связано не только с нахождением геометрических размеров и конфигурации резьбовой зоны, но и обмоточных данных, активных и индуктивных сопротивлений, вылета лобовых частей, формы пазов, коэффициента заполнения, электромагнитных, тепловых, механических нагрузок. Из этого становится ясным, что реально учесть влияние всех параметров, обеспечить их требуемые значения и, следовательно, получить высокие эксплуатационные показатели (коэффициенты использования, полезного действия, мощности) практически невозможно. Для качественного решения задачи необходимо проведение полного факторного эксперимента по определению возникающих напряжений в приводе, по результатам которого можно установить определяющие и второстепенные проектные параметры.

Заключение. Осевые усилия существенно влияют на работоспособность электромеханических приводов. Рассмотренный подход позволяет установить наиболее нагруженные элементы на этапе проектирования с учётом не только нормальных и касательных, но и осевых напряжений. Это позволяет разрабатывать конструкции, в которых максимально реализуется принцип равнопрочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, С. Н. Надёжность асинхронных электродвигателей: учеб. пособие / С. Н. Иванов, В. В. Пыхтин. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2003. – 108 с.
2. Иванов, С. Н. Обеспечение эксплуатационной совместимости асинхронных двигателей с линейным перемещением исполнительного элемента / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, Ю. Б. Колошенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 24-29.
3. Патент № 2736387 Российская Федерация, МПК⁷ Н 05 В 6/10. Электромеханическая система запорной арматуры: № 2020111602: заявлено 19.03.2020; опубликовано 16.11.2020 / Ким К. К., Иванов С. Н., Горбунов А. В.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2 с.
4. 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-1 (55). – С. 43-47.
5. Иванов, С. Н. Моделирование комбинированного электропривода / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
6. Постановка задачи выбора и алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 29-36.
7. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.



Рахчеев В. Г., Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г.
V. G. Rakhcheev, I. S. Maksimov, S. A. Galansky, A. G. Mustafin

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ИЗНОСА АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ РЕЛЬСОВ

ANALYSIS OF THE WEAR MECHANISM OF ABRASIVE WHEELS WHEN GRINDING RAILS

Рахчеев Валерий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(927)760-82-75.

Valery G. Rakcheev – Dr. Sc. (Technical), Professor, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara 443066, Russia; tel. +7(927)760-82-75.

Максимов Илья Сергеевич – старший преподаватель Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(927)694-36-53.

Ilya S. Maksimov – Senior Lecturer, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara 443066, Russia; tel. +7(927)694-36-53.

Галанский Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(917)111-72-82.

Sergey A. Galansky – Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara 443066, Russia; tel. +7(917)111-72-82.

Мустафин Артур Галимзянович – заведующий лабораторией Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(987)917-15-06.

Artur G. Mustafin – the Head of the Laboratory, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara 443066, Russia; tel. +7(987)917-15-06.

Аннотация. Изложены научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути, формирующей повышенные эксплуатационные свойства рельсов за счёт обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности и геометрической точности поперечного профиля с учётом условий эксплуатации рельсов.

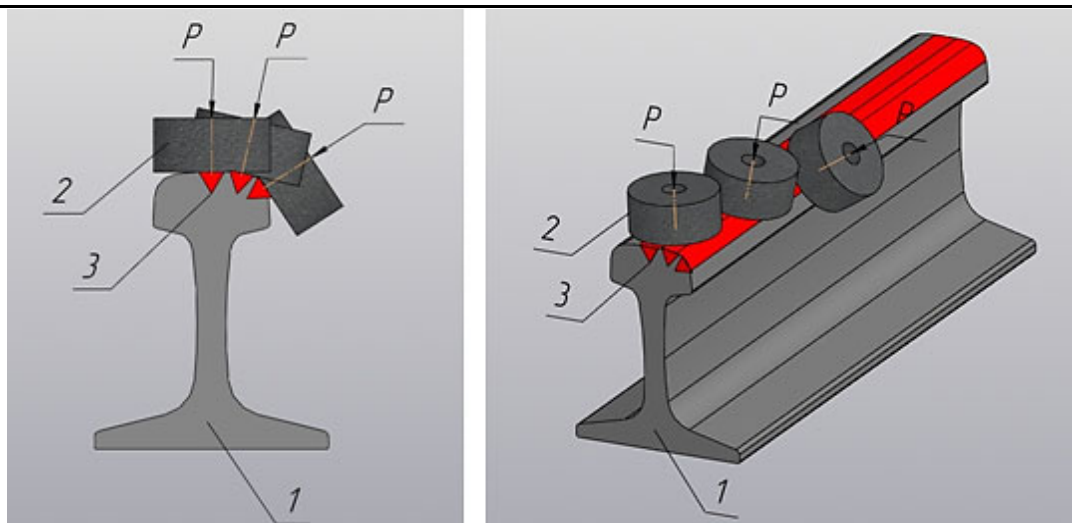
Summary. The scientific and methodological foundations of high-performance rail grinding technology in the conditions of a railway track are described. High-performance rail grinding technology forms increased operational properties of rails by ensuring the required quality of the treated surface and geometric accuracy of the transverse profile, taking into account the operating conditions of rails.

Ключевые слова: железнодорожный путь, шлифование рельсов, абразивный круг, композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования.

Key words: railway track, rail grinding, abrasive wheel, composite grinding wheel for face grinding.

УДК 625.144

Шлифование рельсов является важной технологической операцией для увеличения срока их службы: при шлифовании устраняются дефекты поверхности катания рельсов, приводящие к контактно-усталостным напряжениям, и снижается шероховатость поверхности. Шлифование производится рельсошлифовальными поездами РШП-48. При этом в работе участвует 48 абразивных кругов (см. рис. 1) [6, 113].



1 – обрабатываемый рельс; 2 – абразивный круг; 3 – выступающее абразивное зерно
Рис. 1. Шлифование рельсов

Если учесть, что абразивные круги находятся к обрабатываемой поверхности головки рельсов под разными углами, то изучение механизмов их износа является трудной задачей. Специфика износа в кругах такова, что режущие кромки зёрен и связка инструмента испытывают различное силовое воздействие. Износ инструмента протекает в условиях, обуславливающих разные по величине напряжения в объёме материала зерна, которые приводят к различному характеру разрушения зёрен [2, 15; 7, 204].

Как показывает практика, в реальных процессах шлифования рельсов существуют два вида износа абразивных кругов:

1. истирание при трении абразивного зерна об обрабатываемую поверхность рельса;
2. раскалывание как самого зерна, так и связки.

При незначительном прижатии абразивных кругов к обрабатываемой поверхности рельсов происходит первый вид износа, но при этом удаляется малый слой металла. Зачастую абразивные круги не справляются с поставленной задачей и на обработанной поверхности остаются дефекты. При этом рельсошлифовальный поезд вынужден делать несколько проходов (3-4 прохода). Это приводит к снижению производительности процесса шлифования рельсов.

При увеличении усилия прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности головки рельсов протекает второй вид износа, связанный с раскалыванием зёрен и связки. Производительность процесса шлифования значительно увеличивается. Но необходимо делать так, чтобы абразивные круги, находящиеся под разными углами к поверхности рельса, были в одинаковых условиях и выполняли равную работу резания.

Поэтому рассмотрим, как влияет механическое разрушение зёрен абразивного круга при шлифовании рельсов на износ инструмента [1, 47].

Анализ механизма износа абразивных кругов при шлифовании рельсов проведён при следующих допущениях:

- форма зерна принята в виде прямого кругового конуса, ось которого расположена перпендикулярно к обрабатываемой поверхности;
- зерно и связка круга обладают абсолютной жёсткостью.

Аналитические исследования разрушения зёрен обычно основываются на предельном состоянии упруго-напряжённого тела и сводятся к задаче теории упругости. Наиболее распространённым является метод расчёта по допускаемым напряжениям, при котором определяются главные и эквивалентные напряжения в различных точках тела. Максимальные эквивалентные напряжения сопоставляются с допускаемыми.

Для хрупких и малопластичных материалов в качестве предельного напряжения для данного материала принимают предел прочности на растяжение или сжатие. Перед шлифованием выступающая часть зерна обычно имеет форму конуса, соответственно, абразивное зерно нагружено сосредоточенными силами [3, 60].

При шлифовании профильной поверхности головки рельсов условия резания абразивных кругов различны. Роль разрушения зёрен круга в шлифовании рабочего профиля, а следовательно, и профиля головки рельсов остаётся нераскрытой. Эти нерешённые вопросы механизмов износа абразивных кругов при шлифовании рельсов требуют своих специальных исследований.

Выступающая часть зерна моделировалась прямым круговым конусом (см. рис. 2).

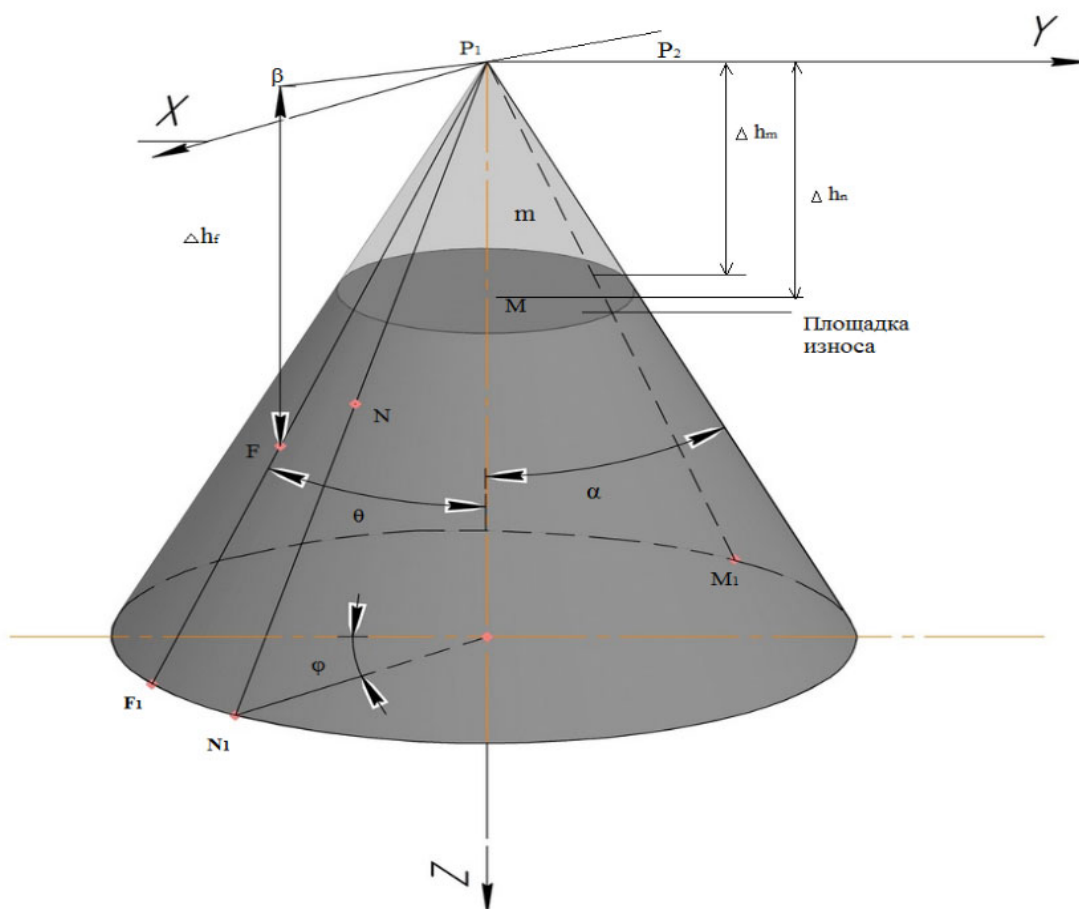


Рис. 2. Модель выступающей части абразивного зерна

Рассмотрим напряжённое состояние конуса от действия усилий, прилагаемых вдоль оси конуса P_1 и перпендикулярно к ней P_2 . Для компонент нормальных σ и касательных τ напряжений от силы P_1 можно записать

$$\sigma_Y = \frac{P_1[M(1 + \cos\alpha) - (3\lambda + 4M)\cos\theta]}{2\pi r^2[\lambda(1 - \cos^3\alpha) + M(1 - \cos\alpha)(1 + \cos^2\alpha)]};$$

$$\sigma_\alpha = \frac{P_1 M \cos\theta (\cos\theta - \cos\alpha)}{2\pi r^2[\lambda(1 - \cos^3\alpha) + M(1 - \cos\alpha)(1 + \cos^2\alpha)](1 + \cos\theta)};$$

$$\sigma_\beta = \frac{P_1 M (\cos\theta - \frac{1 + \cos\alpha}{1 + \cos\theta})}{2\pi r^2[\lambda(1 - \cos^3\alpha) + M(1 - \cos\alpha)(1 + \cos^2\alpha)]};$$

$$\tau_{\alpha\gamma} = \frac{P_1 M \sin\theta (\cos\theta - \frac{1 + \cos\alpha}{1 + \cos\theta})}{2\pi r^2 [\lambda(1 - \cos^3\alpha) + M(1 - \cos\alpha)(1 + \cos^2\alpha)]};$$

$$\tau_{\alpha\beta} = 0;$$

$$\tau_{\gamma\beta} = 0,$$

где M – модуль упругости второго рода; λ – постоянная Ламе; θ, r – сферические координаты точки разрушения зерна.

Углы θ и φ характеризуют соответствующую широту и долготу фиксированной точки F , взятой на поверхности конуса. Следовательно, $\theta = \alpha$ (α – угол при вершине конуса), поскольку лучи фиксированной точки расположены также на поверхности конуса. Угол φ равен 0 или π , т. к. разрушение зерна происходит от усилия P_1 , действующего в направлении оси OZ , и усилия P_2 , действующего в направлении оси OX , т.е. разрушение происходит в плоскости XOZ , а точка, находящаяся в этой плоскости, имеет координату $\varphi = 0$ или $\varphi = \pi$.

Выражения для компонент напряжения от силы P_2 , действующие перпендикулярно оси конуса, имеют вид

$$\sigma_{\gamma} = \frac{P_2 \sin\theta \cos\varphi [2M \frac{1 + \cos\alpha}{1 - \cos\theta} - (3\lambda + 4M)]}{\pi r^2 [(2 + \cos\alpha)\lambda + 2M](1 - \cos\alpha)^2};$$

$$\sigma_{\alpha} = \frac{P_2 M \sin\theta \cos\theta [1 + \frac{(1 + \cos\alpha)^2 (1 - \cos\theta)}{\sin^2\theta (1 + \cos\alpha)} - \frac{2(1 + \cos\alpha)}{1 + \cos\theta}]}{\pi r^2 [(2 + \cos\alpha)\lambda + 2M](1 - \cos\alpha)^2};$$

$$\sigma_{\beta} = \frac{P_2 M \sin\theta \cos\varphi [1 - \frac{(1 + \cos\alpha)^2 (1 - \cos\theta)}{\sin^2\theta (1 + \cos\theta)}]}{\pi r^2 [(2 + \cos\alpha)\lambda + 2M](1 - \cos\alpha)^2};$$

$$\tau_{\alpha\gamma} = \frac{P_2 \cos\varphi (\cos\theta - \cos\alpha)(1 - \cos\alpha - \cos\theta)}{\pi r^2 [(2 + \cos\alpha)\lambda + 2M](1 - \cos\alpha)^2 (1 + \cos\theta)};$$

$$\tau_{\alpha\beta} = \frac{P_2 M \sin\varphi (1 + \cos\alpha)(\cos\theta - \cos\alpha)(1 - \cos\theta)}{\pi r^2 [(2 + \cos\alpha)\lambda + 2M](1 - \cos\alpha)^2 (1 + \cos\theta) \sin\theta};$$

$$\tau_{\beta\gamma} = \frac{P_2 M \sin\varphi [1 - \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{1 + \cos\theta} - \frac{(1 + 2\cos\theta)(1 + \cos\alpha)}{1 + \cos\theta}]}{\pi r^2 [(2 + \cos\alpha)\lambda + 2M](1 - \cos\alpha)^2}.$$

Результирующие компоненты напряжений от действия сил P_1 и P_2 определяются из выражений

$$\sigma_{\gamma} = \frac{1}{\pi r^2} \left\{ \frac{P_1 [M(1 + \cos\alpha) - (3\lambda + 4M)\cos\theta]}{2[\lambda(1 - \cos^3\alpha) + M(1 - \cos\alpha)(1 + \cos^2\alpha)]} + \frac{P_2 \sin\theta \cos\varphi (2M \frac{1 + \cos\alpha}{1 + \cos\theta} - 3\lambda - 4M)}{[(2 + \cos\alpha)\lambda + 2M](1 - \cos\alpha)^2} \right\};$$

$$\sigma_{\alpha} = \frac{M}{\pi r^2} \left\{ \frac{P_1 \cos\theta (\cos\theta - \cos\alpha)}{2[\lambda(1 - \cos^3\alpha) + M(1 - \cos\alpha)(1 + \cos^2\alpha)](1 + \cos\theta)} + \right.$$

$$\left. + \frac{P_2 \sin\theta \cos\varphi [1 + \frac{(1 + \cos\alpha)^2 (1 - \cos\theta)}{\sin^2\theta (1 + \cos\theta)} - \frac{2(1 + \cos\alpha)}{1 + \cos\theta}]}{[(2 + \cos\alpha)\lambda + 2M](1 - \cos\alpha)^2} \right\};$$

$$\begin{aligned} \sigma_\beta &= \frac{M}{\pi r^2} \left\{ \frac{P_1(\cos\theta - \frac{1+\cos a}{1+\cos\theta})}{2[\lambda(1-\cos^3 a) + M(1-\cos a)(1+\cos^2 a)]} \right. \\ &\quad \left. + \frac{P_2 \sin\theta \cos\varphi [1 - \frac{(1+\cos a)^2(1-\cos\theta)}{\sin^2\theta(1+\cos\theta)}]}{[(2+\cos a)\lambda + 2M](1-\cos a)^2} \right\}; \\ \tau_{\alpha\gamma} &= \frac{M}{\pi r^2(1+\cos\theta)} \left\{ \frac{P_1 \sin\theta(\cos\theta - \cos a)}{2[\lambda(1-\cos^3 a) + M(1-\cos a)(1+\cos^2 a)]} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{P_2 \cos\varphi(\cos\theta - \cos a)(1 - \cos a - \cos\theta)}{[(2+\cos a)\lambda + 2M](1-\cos a)^2} \right\}; \\ \tau_{\alpha\beta} &= \frac{M}{\pi r^2} \left\{ \frac{P_2 \sin\varphi(1+\cos a)(1-\cos\theta)(\cos\theta - \cos a)}{[(2+\cos a)\lambda + 2M](1-\cos a)^2(1+\cos\theta)\sin\theta} \right\}; \\ \tau_{\beta\gamma} &= \frac{MP_2 \sin\varphi [1 + \frac{(1+\cos a)^2}{1+\cos\theta} - \frac{(1+2\cos\theta)(1+\cos a)}{1+\cos\theta}]}{\pi r^2 [(2+\cos a)\lambda + 2M](1-\cos a)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Согласно пятой теории прочности, разрушение в точке наступит при достижении октаэдрическими касательными напряжениями $\tau_{\text{окт}}$ предельных значений, соответствующих простому растяжению материала:

$$\tau_{\text{окт}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_b,$$

или

$$(\sigma_\gamma - \sigma_\alpha)^2 + (\sigma_\alpha - \sigma_\beta)^2 + (\sigma_\beta - \sigma_\gamma)^2 + 6(\tau_{\alpha\beta}^2 + \tau_{\beta\gamma}^2 + \tau_{\alpha\gamma}^2) = 2\sigma_b^2, \quad (2)$$

где σ_b – предел прочности материала.

Подставляя (1) в (2), получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{\pi^2 r^4} \{ [P_1(A_1 - B_1) + P_2(A_2 - B_2)]^2 + [P_1(B_1 - C_1) + P_2(B_2 - C_2) + [P_1(C_1 - A_1) + \\ + P_2(C_2 - A_2)]^2 + 6[(P_1 D_1 + P_2 D_2)^2 + P_2^2(E_1^2 + G_1^2)] \} = 2\sigma_b^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Разрешив уравнение (3) относительно r , получим уравнение поверхности разрушения зерна в сферических координатах:

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{1}{\pi \sigma_b \sqrt{2}} \{ [P_1(A_1 - B_1) + P_2(A_2 - B_2)]^2 + [P_1(B_1 - C_1) + P_2(B_2 - C_2)]^2 + \\ &\quad + [P_1(C_1 - A_1) + P_2(C_2 - A_2)]^2 + 6[(P_1 D_1 + P_2 D_2)^2 + P_2^2(E_1^2 + G_1^2)] \}^{\frac{1}{2}}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{M(1+\cos a) - (3\lambda + 4M)\cos\theta}{2\lambda(1-\cos^3 a) + M(1-\cos a)(1+\cos^2 a)}; \\ A_2 &= \frac{\sin\theta \cos\varphi (2M \frac{1+\cos a}{1+\cos\theta} - 3\lambda - 4M)}{[(2+\cos a)\lambda + 2M](1-\cos a)^2}; \\ B_1 &= \frac{M \cos\theta (\cos\theta - \cos a)}{2[\lambda(1-\cos^3 a) + M(1-\cos a)(1+\cos^2 a)](1+\cos\theta)}; \end{aligned}$$

$$B_2 = \frac{M \sin \theta \cos \varphi \left[1 + \frac{(1 + \cos a)^2 (1 - \cos \theta)}{\sin^2 \theta (1 + \cos \theta)} - 2 \frac{1 + \cos a}{1 + \cos \theta} \right]}{[(2 + \cos a) \lambda + 2M] (1 - \cos a)^2};$$

$$C_1 = \frac{M (\cos \theta - \frac{1 + \cos a}{1 + \cos \theta})}{2[\lambda (1 - \cos^3 a) + M (1 - \cos a) (1 + \cos^2 a)]};$$

$$C_2 = \frac{M \sin \theta \cos \varphi \left[1 - \frac{(1 + \cos a)^2 (1 - \cos \theta)}{\sin^2 \theta (1 + \cos \theta)} \right]}{[(2 + \cos a) \lambda + 2M] (1 - \cos a)^2};$$

$$D_1 = \frac{M \sin \theta (\cos \theta - \cos a)}{2[\lambda (1 - \cos^3 a) + M (1 - \cos a) (1 + \cos^2 a)] (1 + \cos \theta)};$$

$$D_2 = \frac{M \cos \varphi (1 - \cos a - \cos \theta) (\cos \theta - \cos a)}{[(2 + \cos a) \lambda + 2M] (1 - \cos a)^2 (1 + \cos \theta)};$$

$$E_1 = \frac{M \sin \varphi (1 + \cos a) (1 - \cos \theta) (\cos \theta - \cos a)}{[(2 + \cos a) \lambda + 2M] (1 - \cos a)^2 (1 + \cos \theta) \sin \theta};$$

$$G_1 = \frac{M \sin \varphi \left[1 + \frac{(1 + \cos a)^2}{1 + \cos \theta} - \frac{(1 + 2 \cos \theta) (1 + \cos a)}{1 + \cos \theta} \right]}{[(2 + \cos a) \lambda + 2M] (1 - \cos a)^2}.$$

В приведённых выражениях P_1 и P_2 – соответственно осевая и тангенциальная нагрузки на единичное зерно.

Пусть r_m – наименьшее из расстояний от начала координат до поверхности разрушения (точка M на рис. 2). Тогда износ зерна в направлении оси конуса будет равен

$$\Delta h_m = r_m \cos a.$$

Разрушение зёрен при скалывании сопровождается образованием площадок износа, которые увеличиваются при циклическом нагружении зёрен (см. рис. 2). Это происходит до тех пор, пока возрастающая сила микрорезания не разрушит связку и в работу не вступят новые островершинные зёрна [4, 77; 5, 7].

Отсюда следует, что величина площадок износа зёрен и интенсивность её роста являются важнейшим фактором, который характеризует износ инструмента, вызванный разрушением и выпадением зёрен из связки. Величина площадок определяет также физико-механические и режущие свойства материала зёрен.

Для определения площадок поверхности износа зёрен (см. рис. 2) будем считать, что скол зерна происходит по плоскости, проходящей через точки $M (-r_m \sin a, 0, r_m \cos a)$ и $N (r_n \sin a, 0, r_n \cos a)$ параллельно оси OY . Уравнение прямой MN , а следовательно, и указанной плоскости имеет вид

$$Z - r_n \cos a = \operatorname{tg} \gamma (x - r_n \sin a), \quad (4)$$

где $\operatorname{tg} \gamma = \frac{r_n \cos a - r_m \cos a}{r_n \sin a + r_m \sin a} = \frac{r_n - r_m}{r_n + r_m} \operatorname{ctg} \alpha$.

Введём замену:

$$\frac{r_n - r_m}{r_n + r_m} = r_0. \quad (5)$$

Тогда

$$\operatorname{tg} \gamma = r_0 \operatorname{ctg} \alpha.$$

Плоскость, содержащая прямую MN , пересекает конус зерна, уравнение которого

$$X^2 + Y^2 = Z^2 \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

по эллипсу \mathcal{E}_1 с площадью S_0 .

Указанный эллипс проецируется на плоскость XOZ в эллипс \mathcal{E}_2 с площадью

$$S = \pi ab, \quad (7)$$

где a, b – полуоси эллипса.

Соотношение площадей S и S_0 равно

$$\frac{S}{S_0} = \cos \gamma. \quad (8)$$

Выразив Z из (4) и подставив полученный результат в соотношение (6), получим уравнение эллипса \mathcal{E}_2 :

$$X^2 + Y^2 = [r_n \cos \alpha + \operatorname{tg} \gamma (x - r_n \sin \alpha)]^2 \operatorname{tg} \alpha,$$

или в каноническом виде:

$$\frac{(X - \frac{r_n r_0 \sin \alpha}{1 + r_0})^2}{(\frac{r_n}{1 + r_0} \sin \alpha)^2} + \frac{Y^2}{r_n^2 \sqrt{\frac{1 - r_0}{1 + r_0}} \sin \alpha^2} = 1.$$

Тогда площадь эллипса \mathcal{E}_2 в соответствии с (7) определится по формуле

$$S = \pi \frac{r_n^2}{1 + r_0} \sqrt{\frac{1 - r_0}{1 + r_0}} \sin^2 \alpha, \quad (9)$$

или, подставив (5) в (9), получим

$$S = \pi \frac{(r_n + r_m) \sqrt{r_n r_m}}{2} \sin^2 \alpha.$$

В силу (8) имеем

$$S_0 = \frac{S}{\cos \gamma} = S \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma} = S \sqrt{1 + r_0^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha} = \frac{S}{\sin \alpha} \sqrt{\sin^2 \alpha + r_0^2 \cos^2 \alpha}.$$

Следовательно, площадь сечения скола зерна равна

$$S_0 = \frac{\pi}{2} (r_n + r_m) \sqrt{r_m r_n (\sin^2 \alpha + r_0^2 \cos^2 \alpha)} \sin \alpha.$$

Результаты анализа напряжённого состояния зерна показали, что механизм износа абразивных кругов при шлифовании рельсов возможно прогнозировать. При этом управление усилием прижатия кругов к обрабатываемой поверхности головки рельсов увеличивает производительность процесса шлифования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумячер, В. М. Влияние внешних факторов на микромеханические свойства абразивных зёрен / В. М. Шумячер, С. А. Крюков, О. Г. Кулик // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара, посвящённого памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почётного профессора ДГТУ А. П. Бабицева, 28 февраля 2020 г., Ростов-на-Дону. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2020. – С. 399-404.
2. Постановка задачи выбора и алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, Ю. Б. Коло-

- шенко, А. А. Просолович, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 29-36.
3. Галанский, С. А. К методике разработки абразивного инструмента для шлифования рельсов в пути / С. А. Галанский, И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 2. – С. 105-107.
4. Патент № 2697542 Российская Федерация, МПК В24D 7/00(2006.01), В24D 7/18(2006.01). Композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования: № 2019104680; заявлено 19.02.2019; опубликовано 15.08.2019 / Рахчеев В. Г., Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г., Денисов В. В., Прусов М. В. – 9 с.
5. Шумячер, В. М. Повышение надёжности и эффективности рельсошлифовальных инструментов на бакелитовой связке. Теория шлифования. Физико-химические основы: моногр. / В. М. Шумячер, С. А. Крюков, И. Ю. Орлов. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – 160 с.
6. Рахчеев, В. Г. Повышение эффективности шлифования рельсов на основе применения модернизированных композиционных и лепестковых кругов и оптимизации системы измерения рельсошлифовального поезда / В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, И. С. Максимов // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 4 (70). – С. 52-58.
7. Теоретические особенности формирования поверхности катания головок рельсов при шлифовании / В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, И. С. Максимов, А. Г. Мустафин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 65-69.



Самар Е. В., Мокрицкий Б. Я.
E. V. Samar, B. Ya. Mokriskii

НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ

A NEW APPROACH TO MANAGING TECHNOLOGICAL CUTTING SYSTEM PARAMETERS

Самар Елизавета Владимировна – ассистент кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Elizaveta V. Samar – Assistant Lecturer, Materials Science and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: boris@knastu.ru.

B. Ya. Mokriskii – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: boris@knastu.ru.

Аннотация. Технологическая система резания является многопараметрической открытой термодинамической и диссипативной системой. Под влиянием внешних воздействий она постоянно находится в неравновесном состоянии, переходя от состояния «хаос» в состояние «порядок» и наоборот. Для обеспечения высокого качества обработанной поверхности детали и высокой производительности обработки необходимо найти параметры, способствующие поддержанию системы в состоянии «порядок». В работе предложены такие параметры и оценена их роль в повышении периода стойкости режущего инструмента, в управлении микротвёрдостью поверхностных слоёв обработанной поверхности, в управлении шероховатостью этой поверхности.

Summary. The technological cutting system is a multiparametric open thermodynamic and dissipative system. Under the influence of external influences, it is constantly in a non-equilibrium state, moving from a state of «chaos» to a state of «order» and vice versa. To ensure the high quality of the treated surface of the part and high processing performance, it is necessary to find parameters that contribute to keeping the system in the «order» state. The paper proposes such parameters and evaluates their role in increasing the durability period of the cutting tool, in controlling the microhardness of the surface layers of the treated surface, in controlling the roughness of this surface.

Ключевые слова: технологическая система резания, критерии поддержания постоянства её состояния, управление процессом точения.

Key words: technological cutting system, criteria for maintaining the constancy of its condition, control of the turning process.

Авторы выражают признательность за консультации и помощь В. А. Киму, О. В. Башкову, Е. Б. Щелкунову, А. Г. Серебренниковой.

УДК 621.9

Введение

В данной работе принято, что основные процессы происходят в зоне резания. Поэтому рассматриваются возможности управления системой СПИД для обеспечения её устойчивого (квазиустойчивого, квазистационарного) состояния. Это позволит повысить характеристики выходных параметров системы СПИД, например, качества обработанной поверхности заготовки детали, периода стойкости. Уровень и последовательность процессов, протекающих в зоне резания, пре-

допределяются условиями контактно-фрикционного взаимодействия агрегаций, а именно: поверхностных слоёв режущего инструмента, образующейся стружки и тех продуктов взаимодействия, которые образуются между ними [1].

Методология решения задачи управления системой СПИД

В работе принято, что стружкообразование совокупно отображает состояние технологической системы резания. Постоянство процесса стружкообразования, по существу, является свидетельством постоянства протекания процессов в зонах первичной и вторичной деформации и может быть использовано для прогнозирования работоспособности инструмента и оценки надёжности выходных параметров технологической системы резания.

В основу выполненного исследования поставлена задача выявить те частные случаи, когда процессы контактного взаимодействия в зоне резания не укладываются в генеральную концепцию образования диссипативных структур при резании, изложенную в работе [1], либо, наоборот, подтверждают её. Резюме этой работы может быть выражено фразой: «В период устойчивого (квазистационарного) протекания процесса резания диссипация в зоне вторичных пластических деформаций реализуется за счёт разных режимов фрикционных процессов между сходящей стружкой и наружными поверхностями наростов. Влияя на характер фрикционного процесса, можно управлять стойкостью режущего инструмента и качеством механической обработки».

Работа В. А. Кима и Ч. Ф. Якубова [1] в качестве генеральной авторами данной статьи выбрана потому, что она использует современные представления о диссипативных структурах [2–7], с помощью которых в неравновесных деформационных системах и процессах поглощённая внутренняя энергия трансформируется в тепловые источники и другие диссипативные потоки, при которых минимизируется влияние внешних воздействий. Это определяет конкретный механизм их функционирования и носит индивидуальный характер [2–7] в зависимости от природы неравновесного процесса.

Обсуждение полученных результатов

Результаты настоящей статьи получены с использованием экспериментальных исследований и имитационного моделирования. Для имитационного моделирования использована программная среда DEFORM, а иногда и ANSYS. Исследование выполнено применительно к процессу точения разных материалов разным режущим инструментом при разных параметрах режима резания. Выбор обрабатываемых материалов, режущего материала обоснован в работах [8–14].

На рис. 1 показаны примеры скриншотов для различных условий резания.

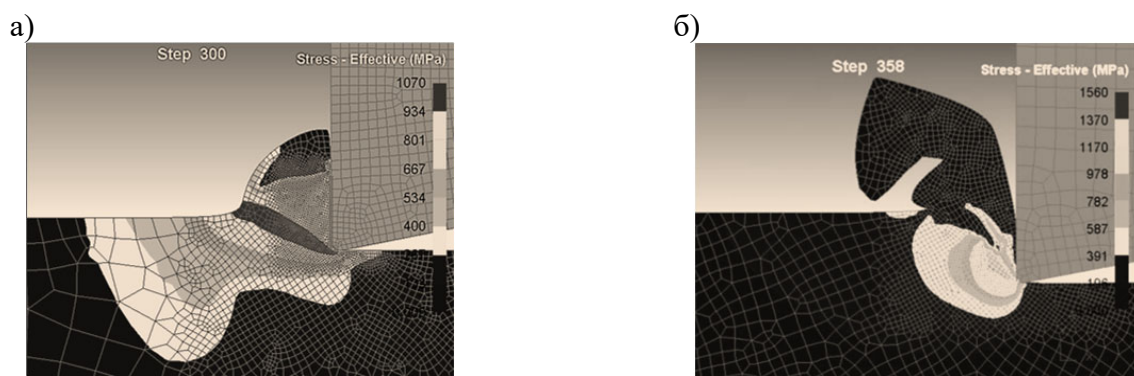


Рис. 1. Примеры скриншотов при моделировании процесса точения (расчёт максимальных напряжений, МПа) для конструкционной труднообрабатываемой стали марки 12X18H10T (а) и для определения полей напряжений при точении титанового сплава марки BT22 (б)

Анализ данных скриншотов показывает, насколько индивидуальны параметры процесса резания при изменении обрабатываемого материала. Это позволяет прогнозировать, что при точении титанового сплава угол плоскости сдвига существенно выше, чем при точении стали. Соответ-

ственно, следует ожидать у них совершенно иные условия стружкообразования, разное качество обработанной поверхности и разные периоды стойкости инструмента.

В. А. Ким и Ч. Ф. Якубов в работе [1] акцентируют внимание на то, что процессы контактно-фрикционного взаимодействия в зоне резания влияют на процесс стружкообразования через угол наклона плоскости сдвига, который оказывает влияние на мощность резания через силу резания. В настоящей статье это проверено следующим образом. Имитационным моделированием спрогнозировали ожидаемую величину силы резания. Провели экспериментальную проверку этой величины силы резания. Установили, что и результирующая сила резания, и её составляющие подтвердили прогнозную величину. Это подтвердило правомерность используемого подхода. В качестве примера на рис. 2 показаны значения составляющих силы резания при точении стали марки 12Х18Н10Т твёрдосплавным инструментом марки ВК8.

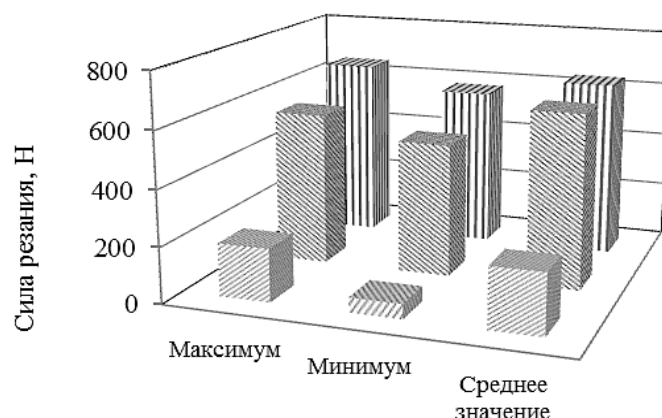


Рис. 2. Величины составляющих силы резания (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача заготовки 0,21 мм/об).
Точение стали марки 12Х18Н10Т твёрдосплавным инструментом марки ВК8

На рис. 3 показана аналогичная информация, но для значительно более широкого диапазона обрабатываемых материалов.

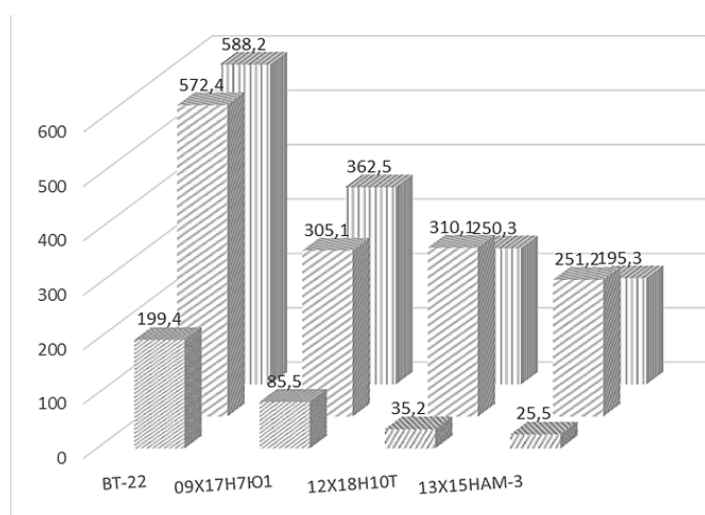


Рис. 3. Величины составляющих сил резания при точении заготовок деталей, выполненных из существенно разных труднообрабатываемых материалов (по вертикальной оси отложена величина силы резания в ньютонах): 1-й ряд – продольная составляющая силы резания; 2-й ряд – радиальная составляющая силы резания; 3-й ряд – вертикальная составляющая силы резания

Анализ данных, приведённых на рис. 2 и 3, позволяет заключить:

1. Результирующая сила резания и её составляющие адекватно отображают процесс стружкообразования в зоне резания. По сути, они являются «лакмусовой бумажкой», позволяющей идентифицировать устойчивость технологической системы СПИД.

2. Марка обрабатываемого материала (физико-механические характеристики материала и трибологические явления в контактной зоне) существенно влияет на величины силы резания.

3. Вышесказанное позволяет определить наиболее рациональные пути управления состоянием системы СПИД для минимизации сил резания; наиболее простыми из них являются применение покрытий для инструментального материала и применение смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС). Это позволит изменить условия резания и тем самым снизить силы резания, что напрямую приведёт к приросту периода стойкости и улучшению качества обработанной поверхности заготовки детали.

На рис. 4 приведён пример влияния покрытия инструмента на составляющие силы резания. Из него следует, что применение покрытия (Ti + TiCN + (TiZrNb)N) на твёрдосплавной основе марки ВК8 снизило максимальные значения составляющих сил резания с 630 до 400 Н. Это снижение в 1,6 раза. Дальнейшие исследования показали соответствующее повышение периода стойкости инструмента и качества обработанной поверхности (по шероховатости поверхности и микротвёрдости поверхностного слоя детали).

Измерение сил резания выполняли на специально созданном токарном стенде со специализированным токарным динамометром марки STD201-2. Стенд имел два варианта исполнения: на базе станка модели 16K25 и на базе станка модели СТ16K25Б/1000 как более современного станка.

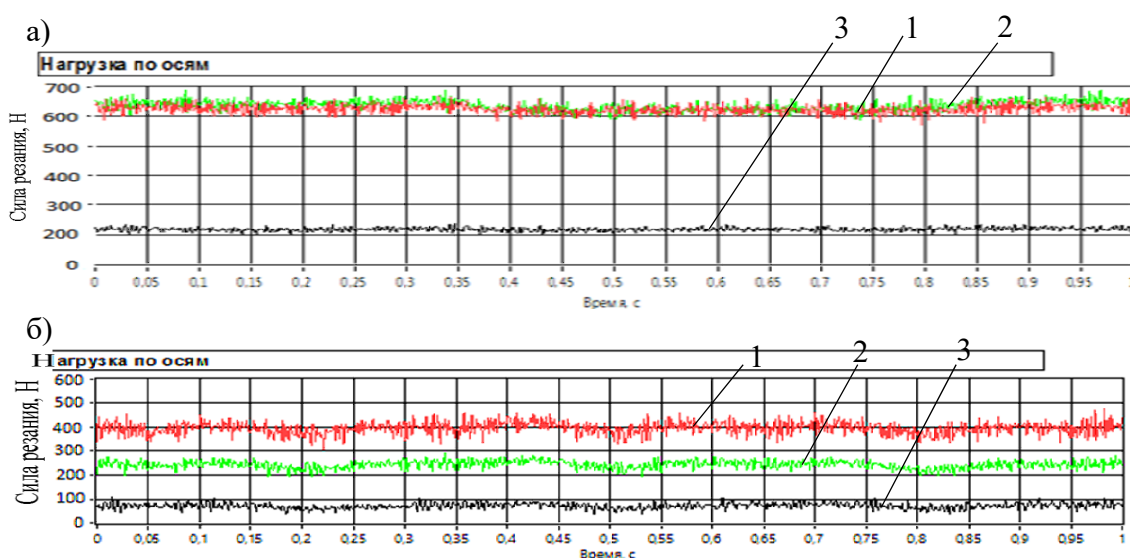


Рис. 4. Примеры записей составляющих сил резания при точении стали марки 12Х18Н10Т твёрдосплавным инструментом марки ВК8 без покрытия (а) и со специально разработанным покрытием (б) (Ti + TiCN + (TiZrNb)N): 1 – вертикальная составляющая силы резания; 2 – радиальная составляющая силы резания; 3 – продольная составляющая силы резания

Характеристикой качества обработанной поверхности принята микротвёрдость поверхностного слоя обработанной поверхности детали. Картина её распределения по глубине поверхностного слоя показана на рис. 5.

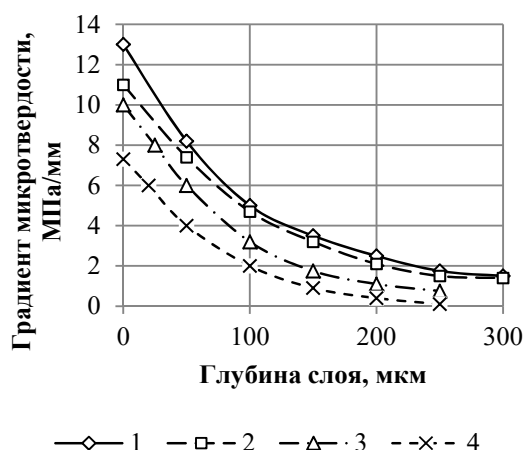


Рис. 5. Распределение величины градиента микротвёрдости, МПа/мм, по глубине поверхностного слоя детали:

- 1 – при резании инструментом BK8;
2 – при резании инструментом BK8 с покрытием TiN; 3 – при резании инструментом BK8 с покрытием TiN + TiCN; 4 – при резании инструментом BK8 с покрытием Ti + TiCN + (TiZrNb)N

инструмента со стружкой и с продуктами, образовавшимися между ними в процессе резания. Эти продукты могут иметь естественное происхождение (нарост) и диссипативно-структурное происхождение (наличие СОТС, состав СОТС и т.д.).

Подтверждение фактов самоорганизации диссипативных структур выполнено выявлением (при содействии В. А. Кима) на передней поверхности режущего инструмента участков со сплошными и островковыми наростами. Объяснения и описание этих типов наростов даны в работах [4; 8; 9; 11]. Пример таких наростов показан на рис. 6 для случая применения режущего инструмента Р6М5, при эксплуатации которого наиболее просто выявляются сами наросты и их тип.

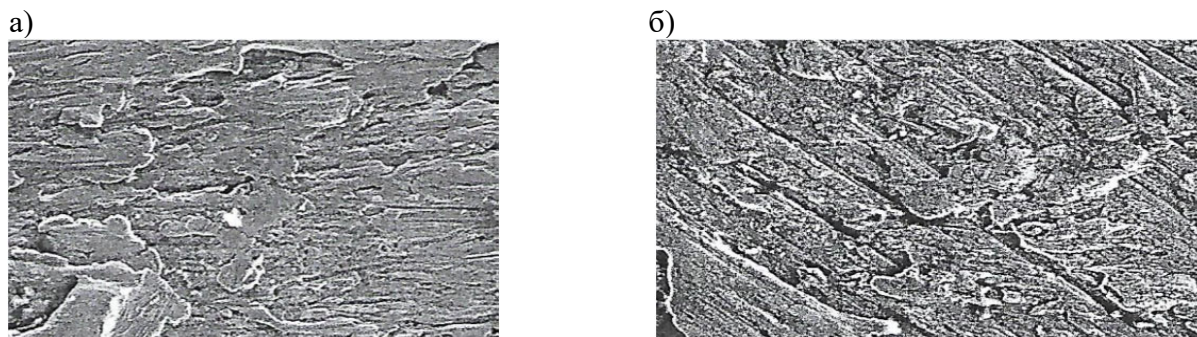


Рис. 6. Наросты, образовавшиеся на передней поверхности резца, выполненного из быстрорежущей стали марки Р6М5, при точении стали 12Х18Н10Т:

а – островкового типа; б – сплошного типа

На этих фото, полученных на электронном микроскопе при специальной подготовке исследуемой поверхности, светлые участки выявлены за счёт их высокого электростатического заряда.

Данные на рис. 5 позволяют заключить:

1. Выявленное изменение микротвёрдости (градиента микротвёрдости) по глубине упрочнённого слоя не противоречит сложившимся представлениям. Полученный характер изменения микротвёрдости согласуется с эпюрами нормальных сжимающих напряжений в материале детали.

2. Применение покрытий снижает величину силы резания, что, соответственно, снижает величины напряжений в материале детали и выражается в снижении микротвёрдости в сравнении с резанием инструментом без покрытия. Среди рассмотренных вариантов наиболее рационально наноструктурированное многослойное покрытие Ti + TiCN + (TiZrNb)N, содержащее слой титана толщиной 1-2 мкм на основе BK8, затем содержащее слой карбонитрида титана толщиной 2-3 мкм и наверху слой покрытия нитрида титана с цирконием и ниобием толщиной 3 мкм.

3. Этим подтверждена возможность управления микротвёрдостью за счёт применения разных покрытий. В том числе это позволяет оптимизировать требуемую микротвёрдость соответствующим подбором (моделированием) конструкции с составом покрытия, обеспечивающим наиболее рациональный коэффициент трения на контактных поверхностях

Это участки со стабильными адсорбционными плёнками и аморфной фазой. Они обладают высокими диэлектрическими свойствами. Тёмные участки являются заторможенными на инструменте микроагрегациями сходящей стружки. Их текстура и упорядоченность этой структурой обусловлены температурно-силовыми и адгезионными явлениями.

Анализ полученных результатов позволил сформулировать следующие выводы:

1. При применении инструмента с покрытием система СПИД устойчива, её переход в хаотичное состояние маловероятен. При применении инструмента без покрытия переход системы СПИД с устойчивого состояния в состояние хаоса может происходить более вероятно и быстро.

2. Шероховатость обработанной поверхности является чувствительным параметром и для случая применения покрытия, и для случая применения СОТС. При хаотичном состоянии системы СПИД изменение шероховатости ещё более значимо.

3. Микротвёрдость обработанной поверхности детали чётко реагирует на применение покрытия и СОТС. При хаотичном состоянии системы СПИД изменение микротвёрдости ещё более значимо.

4. Параметр «суммарный счёт (число) сигналов акустической эмиссии, излучаемой зоной резания» чувствителен к применению покрытия на инструменте и к применению СОТС. При хаотичном состоянии технологической системы резания это проявляется ещё более значимо.

5. Разработанный комплексный подход к управлению состоянием технологической системы резания обоснованно доказал свою состоятельность при использовании выбранных входных и выходных параметров системы СПИД за счёт обеспечения устойчивого состояния диссипативных систем на примере применения покрытия на инструменте и применения СОТС.

Выдвинутая в работе [1] гипотеза о том, что, влияя на характер фрикционного процесса, можно управлять качеством обработанной поверхности и периодом стойкости инструмента, подтверждена приведёнными в данной статье результатами исследования. Приведённые в данной статье результаты являются частными случаями этой гипотезы, они развивают и дополняют эту гипотезу.

Заключение

Предложенный в статье подход и полученные результаты показали возможность управления процессами самоорганизации диссипативных структур в системе СПИД с целью обеспечения необходимых значений выходных параметров системы резания. Предложены наиболее простые пути такого обеспечения: применение покрытий на инструментальных материалах и применение СОТС.

Научная новизна приведённых в статье результатов состоит в применении и адаптации математического имитационного моделирования выходных процессов системы СПИД, в полученных зависимостях параметров качества обработанной поверхности (шероховатость и микротвёрдость) от обеспечения условий самоорганизации диссипативных структур, в обеспечении прироста периода стойкости металлорежущего инструмента и в управлении процессами стружкообразования. Каждая из этих решённых задач важна, совокупность этих решённых задач важна чрезвычайно. По сути, частными примерами реализации генеральной концепции В. А. Кима и Ч. Ф. Якубова создана новая методология управления технологической системой резания для обеспечения устойчивого состояния диссипативных процессов в зоне резания, которая постоянно подвержена внешним воздействиям, стремящимся вывести систему СПИД в состояние хаоса. Эта методология при её последующем развитии приведёт к формированию условий обеспечения изготовления высокоточных деталей с высокой производительностью обработки.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что выработаны критерии выходных параметров системы резания, обеспечивающие стабилизацию состояния системы СПИД, разработаны рекомендации по обеспечению качества (шероховатость, микротвёрдость) обработанной поверхности детали, показана роль покрытий инструмента в обеспечении самоорганизации системы СПИД, обеспечен прирост периода стойкости металлорежущих инструментов. Это всё достигнуто за счёт обеспечения стабилизации диссипативных структур процесса резания на примере точения труднообрабатываемых материалов и простых конструкционных материалов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, В. А. Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия при резании металлов / В. А. Ким, Ч. Ф. Якубов // Вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22. – № 12. – С. 35-45.
2. Воронцов, А. Л. Разработка новой теории резания. 1. Введение / А. Л. Воронцов, Н. М. Султан-Заде, А. Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 1. – С. 57-67.
3. Заковоротный, В. Л. Самоорганизация и бифуркация динамической системы обработки металлов резанием / В. Л. Заковоротный, Фан Динь Тунг, В. С. Быкадор // Известия высших учебных заведений. Прикладная неравновесная динамика. – 2014. – Т. 22. – № 3. – С. 26-39.
4. Ким, В. А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента / В. А. Ким. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 203 с.
5. Ким, В. А. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при трении и резании металлов / В. А. Ким, Ф. Я. Якубов, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоёмкие технологии», 2017. – 244 с.
6. Мигранов, М. Ш. Особенности термодинамических процессов на контактных поверхностях режущего инструмента / М. Ш. Мигранов, Л. Ш. Шустер // Известия Самарского центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4-3. – С. 1126-1129.
7. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогов. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
8. Ким, В. А. Деформационно-структурный анализ процесса резания металлов / В. А. Ким, Т. А. Отряскина, Е. В. Самар // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – № 8 (61). – С. 10-15.
9. Управление триботехническими процессами контактного взаимодействия / В. А. Ким, Б. Я. Мокрицкий, Е. В. Самар, Ч. Ф. Якубов // Металлообработка. – 2017. – № 3 (99). – С. 2-9.
10. Ким, В. А. Математическое моделирование стружкообразования при точении титанового сплава / В. А. Ким, Е. В. Самар, Ч. Ф. Якубов // Технология машиностроения. – 2017. – № 12. – С. 42-48.
11. Адгезионные процессы контактного взаимодействия при резании материалов / В. А. Ким, Б. Я. Мокрицкий, Е. В. Самар, Ч. Ф. Якубов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 66-75.
12. Исследование адгезионно-активных поверхностных структур в быстрорежущей стали Р6М5 / В. А. Ким, Ч. Ф. Якубов, Е. Б. Щелкунов, Е. В. Самар // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84. – № 12. – С. 40-44.
13. Влияние СОТС на деформационные процессы формирования поверхностных структур при резании / В. А. Ким, Ч. Ф. Якубов, Е. В. Самар, И. В. Белова // Металлообработка. – 2019. – № 6 (114). – С. 3-10.
14. Математическое моделирование деформационно-динамических процессов резания металлов / В. А. Ким, Е. Б. Щелкунов, Е. В. Самар, Ч. Ф. Якубов // Технология машиностроения. – 2019. – № 6. – С. 50-57.
15. Мокрицкий, Б. Я. Имитационное моделирование процесса токарной обработки / Б. Я. Мокрицкий, Э. С. Ситамов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 2. – С. 77-81.

Отряскина Т. А., Павловская Д. А.
T. A. Otryaskina, D. A. Pavlovskaya

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ
НА ОСНОВАНИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ РЕЗАНИИ**

**PREDICTION OF THE PROCESSED SURFACE ROUGHNESS ON THE BASIS
OF THE STUDY OF DEFORMATION PROCESSES DURING CUTTING**

Отряскина Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: knastu2000@mail.ru.

Tatyana A. Otryaskina – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: knastu2000@mail.ru.

Павловская Дарья Алексеевна – бакалавр кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: pavlovskay.2000@mail.ru.

Daria A. Pavlovskaya – Bachelor's Degree Student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: pavlovskay.2000@mail.ru.

Аннотация. Рассмотрен процесс формирования шероховатости обработанной поверхности как результат процесса деформации разномасштабных уровней, что является новым подходом к рассмотрению шероховатости. Для анализа профилограмм было использовано преобразование Фурье, с помощью которого были получены амплитудные спектры, позволяющие определить частотные диапазоны, соответствующие основным факторам, влияющим на формирование шероховатости. Полученные результаты исследования позволили сделать вывод: форма неровностей поверхности зависит не только от формы режущего клина и параметров резания, но и от деформационных процессов при разрушении материала и от вибрации всей технологической системы.

Summary. The process of forming the roughness of the treated surface because of the deformation process of various scale levels is considered. It is a new approach to the consideration of roughness. To analyze the profilograms, Fourier transforms were used to obtain amplitude spectra, which made it possible to determine the frequency ranges corresponding to the main factors affecting the formation of roughness. The results of the study allowed us to conclude that the shape of the surface irregularities depends not only on the shape of the cutting edge and the cutting parameters, but also on the deformation processes during the expansion of the material, as well as on the vibration of the entire technological system.

Ключевые слова: шероховатость, качество поверхности, пластическая деформация.

Key words: roughness, surface quality, plastic deformation.

УДК 621.7.015

Введение

При современных технологиях изготовления деталей ключевой задачей остаётся достижение качества получаемых деталей. При различных процессах обработки достижение качества осуществляется различными методами. Одним из самых востребованных способов обработки и самым технологичным методом для получения качественных деталей является лезвийная обработка резанием. К основным параметрам качества обработанной поверхности относится шероховатость. Требуемые параметры шероховатости обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики детали и увеличивают срок эксплуатации изделия, поскольку механизмы разрушений зарождаются в поверхностных микротрещинах, зависящих от шероховатости.



Параметры шероховатости зависят от свойств материала и режимов обработки; также на параметры шероховатости влияют деформационные процессы, формирующиеся при разрушении металлов в процессе резания.

При исследовании причины формирования неровностей на обработанной поверхности традиционно интерпретируют как копирование на поверхность геометрии кромки режущего инструмента, движущегося по определённой траектории. Поэтому профиль неровности должен быть чётким отпечатком врезавшегося клина, а расположение неровности полностью должно зависеть от режимов резания (эти факторы определяют шероховатость поверхности [1; 2]), что на самом деле не наблюдается, т. к. пластическая деформация при разрушении материала и автоколебания технологической системы воздействуют на образование шероховатости, а во многих случаях носят преобладающий характер.

Шероховатость поверхности имеет сложную форму, лишённую чётко выявленных закономерностей. Поэтому имеющиеся методы прогнозирования шероховатости обработанной поверхности оказываются неэффективными с точки зрения выявления закономерностей. Часто применяемым способом измерения шероховатости является метод получения профилограмм на профилометре. Профилограммы представляют собой малоинформативные отображения рельефа поверхности, но совместно со средствами обработки сигнала могут определять новые закономерности процесса образования шероховатости.

Методика исследования

Эксперименты осуществлялись на универсальном токарном станке на стали 40Х, титановом сплаве ВТ20 и алюминиевом сплаве Д16 при режимах: глубина резания $t = 1,0$ мм, подача $S = 0,13$ мм/об, частота вращения 200 об/мин.

Профилограмма шероховатости снималась на профилометре, в котором показания преобразовывались в электрический сигнал и в оцифрованном виде обрабатывались с помощью программы DynAnalyzer. В таком виде профилограмма будет выглядеть как динамический колебательный процесс, к которому применим Фурье-анализ. Преобразование Фурье осуществлялось с помощью программы MATLAB, в результате чего были получены амплитудные спектры.

Результаты исследования и их анализ

Шероховатость отображает рельеф обработанной поверхности, на которой фиксируются разноуровневые структурные механизмы разрушения. Рельеф поверхности от кинематических составляющих процесса резания образует периодические неровности со сравнительно высоким шагом [2; 3]. Неровности при разрушениях по разделам мезоструктур воспроизводят шероховатость со средним шагом, а участки поверхности, проходящие по границам зёрен и появляющиеся при разрушении внутри зёрен, образуют шероховатость с малым шагом. Таким образом, можно сделать заключение, что между структурной организацией поверхностного слоя и шероховатостью происходит взаимосвязь.

На рис. 1 представлены профилограммы обработанных поверхностей при обработке точением на следующих режимах резания: глубина резания 1 мм, подача 0,11 мм/об, частота вращения 250 об/мин. По данным профилограммам сложно проанализировать роль основных факторов, оказывающих влияние на шероховатость поверхности, но можно выделить ряд закономерностей:

- на профилограммах явно видны три масштабных уровня неровностей (мезо-, микро- и субмикрошероховатость), которые соотносятся с масштабными уровнями структуры поверхности;
- при продвижении с минимального уровня к высшему структурному уровню стохастичность шероховатости увеличивается;
- мезошероховатость описывается её периодичностью, определяющей численные значения типовых показателей шероховатости R_z и R_a ;
- с увеличением прочностных свойств обработанной поверхности шероховатость понижается;
- вид шероховатости на мезомасштабном уровне напрямую зависит от материала детали, при этом для алюминиевого сплава и стали 40Х характерны скруглённые вершины и острые впадины, а для титанового сплава – острые вершины и впадины.

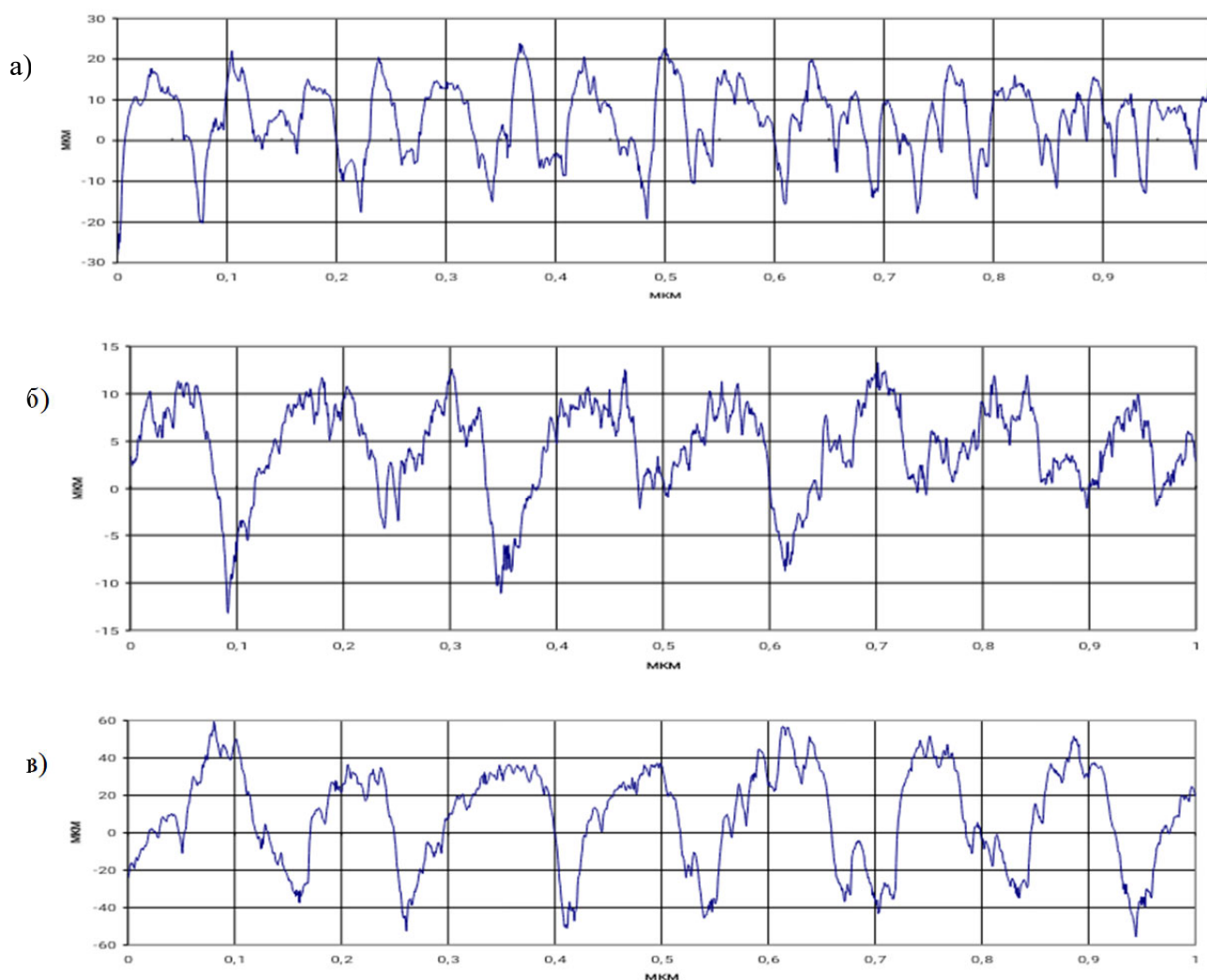


Рис. 1. Профилограмма шероховатости поверхности:
а – титановый сплав; б – алюминиевый сплав; в – сталь 40Х

Для титанового сплава профиль шероховатости отображает малую поверхность фактического контакта. Этим в какой-то мере можно описать значительную адгезионную схватываемость титановых сплавов во фрикционном процессе.

При использовании преобразования Фурье были получены амплитудные спектры, с помощью которых были установлены частоты и амплитуды различных гармоник профилограмм, позволяющие определить частотные диапазоны, соответствующие основным факторам, влияющим на формирование шероховатости [3; 4].

Определяющее значение на образование неровностей поверхности при обработке оказывает, как правило, одна из трёх указанных составляющих, которая и определяет профиль и размер шероховатости. Однако в отдельных случаях профиль шероховатости формируется в результате одновременного и почти равнозначного воздействия всех указанных составляющих и вследствие этого не имеет чётко выраженных закономерностей.

На рис. 2 представлены графики спектра мощности, полученные из представленных выше профилограмм. На графиках отчётливо виден приоритет кинематической составляющей шероховатости, зависящей от режимов обработки для стали 40Х и алюминиевого сплава. На это указывает максимальное значение второго пика на частоте от 7 до 9 Гц. Первый пик на частоте от 3 до 4 Гц описывает геометрию режущего клина и в данном случае менее выражен, т. к. глубина реза-

ния мала. Третий пик на частоте от 10 до 14 Гц описывает пластическую деформацию материала при резании, и, как видно из графика, её влияние на рост шероховатости незначительно. В интервале частот от 15 до 19 Гц наблюдается четвёртый пик, который характеризует вибрационную составляющую процесса резания (динамическую систему станок-инструмент-заготовка). В нашем случае идёт большой всплеск в этом диапазоне частот у титанового сплава. Это объясняется тем, что обрабатывалась нежесткая деталь малого диаметра, что привело к повышению вибрация детали.

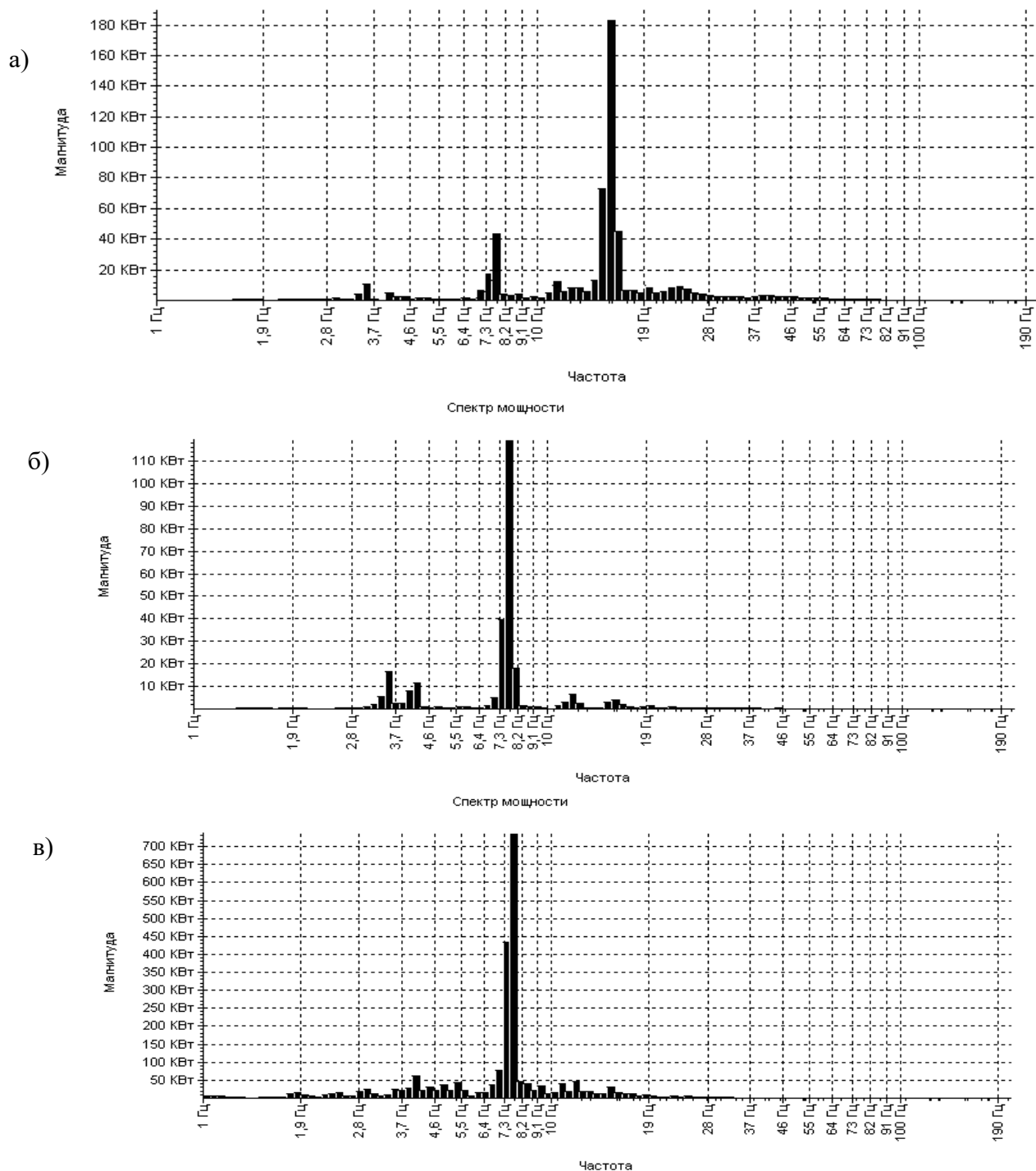


Рис. 2. Спектр мощности профилограммы: а – титановый сплав;
б – алюминиевый сплав; в – сталь 40Х

Заключение

На основе полученных данных делаем выводы:

- шероховатость можно сравнить со структурой материала и разбить на три масштабных уровня, при этом с увеличением масштаба стохастичность процесса возрастает;
- Фурье-анализ профилограмм непосредственно связан с частотными диапазонами ключевых факторов, оказывающих воздействие на образование неровностей обработанной поверхности, и даёт количественную оценку степени их проявления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, В. А. Структурно-количественные соотношения процесса стружкообразования / В. А. Ким, Т. А. Отряскина // Технология машиностроения. – 2014. – № 11. – С. 16-20.
2. Саблин, П. А. Высота микронеровностей и параметры шероховатости – комплексная оценка качества обработанной поверхности / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 90-94.
3. Ким, В. А. Деформационно-структурный анализ процесса резания металлов / В. А. Ким, Т. А. Отряскина, Е. В. Самар // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17. – № 8 (61). – С. 10-15.
4. Ким, В. А. Шероховатость обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании / В. А. Ким, Е. Б. Щетинин, С. В. Бреев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1 (1). – С. 62-66.
5. Космынин, А. В. Обеспечение качества обработки материалов резанием посредством внедрения трансформируемых управляемых звеньев в систему станочных систем / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, П. А. Саблин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 115-118.



Усанов Г. И., Усанов М. Г., Усанов И. Г.
G. I. Usanov, M. G. Usanov, I. G. Usanov

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ: МЕТОДОЛОГИЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

MECHANICAL ENGINEERING TECHNOLOGY: RESOURCE SAVING METHODOLOGY

Усанов Геннадий Иванович – доктор экономических наук, профессор кафедры «Менеджмент, маркетинг и государственное управление» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Usanov_G@mail.ru.

Gennadii I. Usanov – Doctor of Economics, Professor, «Management, Marketing and Government Administration Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Usanov_G@mail.ru.

Усанов Максим Геннадьевич – CEM, CMVP, MBA, управляющий перформанс контрактами строительных решений Johnson Controls International (США, Трентон). E-mail: Max.G.Usanov@Jci.com. www.johnsoncontrols.com.

Maxim G. Usanov – CEM, CMVP, MBA, Performance Assurance of Principal Building Solution, Johnson Controls International (USA, Trenton). E-mail: Max.G.Usanov@Jci.com. www.johnsoncontrols.com.

Усанов Илья Геннадьевич – кандидат экономических наук, доцент, зав. кафедрой «Менеджмент, маркетинг и государственное управление» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: usanov.ig@email.knastu.ru.

Илья Г. Usanov – PhD in Economics, Associate Professor, Head of Management, Marketing and Government Administration Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: usanov.ig@email.knastu.ru.

Аннотация. Данная работа посвящена изложению глобальных тенденций развития мировой экономики и технико-технологических систем жизнеобеспечения человечества. Глобализация создаёт новые вызовы для реализации национальных экономических политик и стратегий деятельности предприятий машиностроения. Ресурсосбережение является одним из прогрессивных направлений решения глобальных проблем человечества. Исследованы гносеологические корни и история становления метода, изложены основные его принципы, установлена взаимосвязь с последними достижениями науки управления, приведена авторская формулировка известных и новых принципов реализации метода в современных условиях хозяйствования.

Summary. This work is devoted to the presentation of global trends in the development of the world economy and technical and technological life support system for mankind. Globalization creates new challenges for the implementation of national economic policies and strategies for the activities of machine-building enterprise. Recycling technology is one of the progressive directions for solving the global problems of mankind. The authors investigate the epistemological roots and the history of the formation of the method, outline its basic principles and establish relationship with recent advances in management. The authors' wording of known and new principals of the method implementation in modern economic conditions is given.

Ключевые слова: глобализация, декарбонизация, рециклинг, методология ресурсосбережения.

Key words: globalization, decarbonization, recycling, resource saving methodology.

УДК 621

У машиностроительного комплекса России, объединяющего более 70 отраслей, в настоящее время существуют две основные проблемы: значительное сокращение производства и негативное влияние на окружающую среду.

Первая проблема связана с низким качеством выпускаемых машин, устаревшими технологиями и оборудованием машиностроительных предприятий, низкими темпами обновления про-

дукции, слабым научно-исследовательским и конструкторско-технологическим обеспечением и низкой эффективностью управленческих решений, принимаемых на государственном и отраслевом уровне, а также на уровне менеджмента машиностроительных предприятий.

Доля машиностроительного комплекса России в структуре промышленности, достигавшая 40 % в начале 90-х годов, сегодня сократилась более чем в 2 раза. Более 60 % металлообрабатывающих станков на машиностроительных предприятиях имеют возраст более 10 лет [4].

На международном рынке лишь энергетическое машиностроение занимает сколь-нибудь значимые позиции с долей в 2,5 %. Доля же остальных машиностроительных отраслей, а это станко- и приборостроение, электротехника и инструментальная промышленность, судо-, авиа-, автомобилестроение, в мировой торговле машиностроительной продукцией составляет менее 0,1 % [9].

подавляющая часть отечественного оборудования и машин не соответствует современному уровню мировых стандартов. Вследствие низкого качества в первый год эксплуатации выходит из строя от 20 до 30 % продукции машиностроения.

Причин столь плачевного состояния машиностроительного комплекса России великое множество. По мнению большинства исследователей, это и смещение приоритета государственной политики в сторону добывающих отраслей промышленности и топливно-энергетического комплекса, нехватка собственного и заёмного капитала, избыточное бремя налоговых платежей и непомерная дороговизна ресурсной базы. В машиностроении расход сырья на 1 т готовой продукции в среднем составляет от 1,3 до 1,5 т.

Перечисленные проблемы машиностроения России в ближайшей перспективе возрастут ещё в большей степени по мере усиления процессов глобализации и борьбы мирового сообщества с загрязнением окружающей среды.

Экологическая проблема обусловлена истощением сырьевых ресурсов земли и усилением вертикали глобального управления охраной окружающей среды. По данным экологов, предприятия машиностроительного комплекса России выбрасывают в атмосферу 32 % промышленных загрязнений. При этом, по разным данным, очистными сооружениями оснащено от 30 до 50 % производств.

Актуализация экологических проблем жизнедеятельности мирового сообщества обусловила принятие в 2016 году Организацией Объединённых Наций Парижского соглашения о реализации глобальной политики в области охраны окружающей среды. Тем самым мировое сообщество признало, что «декарбонизация» жизнедеятельности человечества и «рециклинг» производственных и бытовых отходов выдвинулись в число наиболее приоритетных задач мировой и национальных экономик, включая технико-технологическое обеспечение функционирования мирового сообщества.

Организационно-управленческий механизм глобальной политики предусматривает достижение целевых показателей «углеродной нейтральности» и «нулевых выбросов» к 2050 году [8].

Великобритания, США, Россия, Япония, Республика Корея и ещё более 110 стран обязались достичь уровня углеродной нейтральности и нулевых выбросов к 2050 году, а КНР – к 2060 году. На сегодняшний день Парижское соглашение ратифицировало уже 186 государств.

По данным ООН, выбросы CO₂ в 2018 году во всём мире составили 33,9 млрд т. При этом больше всего выбросов приходится на Китай (9,4 млрд т), США (5,1 млрд т), Индию (около 2,5 млрд т), Россию (около 1,6 млрд т) и Японию (более 1,1 млрд т).

Понятия «углеродная нейтральность» и «нулевые выбросы» глобального управления декарбонизацией предполагают, что суммарный объём выбросов в атмосферу углекислого газа страны не превышает объёмы углерода, поглощаемого её лесами и водными ресурсами.

Глобальная политика обязывает правительства всех стран разрабатывать национальные, отраслевые и корпоративные ресурсосберегающие программы и проекты. Таким образом, современные вызовы времени задают стратегические ориентиры для развития большинства отраслей, включая технологию машиностроения.

Для стимулирования этого вида деятельности международными и национальными финансовыми организациями предусматривается выделение льготных кредитов и субсидий на проведе-



ние научных исследований, опытно-конструкторскую разработку и технико-технологическую подготовку реализации экологически чистых проектов.

Данная тематика программ и проектов в области ресурсосбережения открывает благоприятные возможности для организаций научно-исследовательского и проектно-технологического типа, в том числе университетов, прежде всего в сфере совершенствования технико-технологического обеспечения жизнедеятельности общества в средне- и долгосрочной перспективе.

Негативные последствия жизнедеятельности человечества от года к году будут только нарастать, побуждая общество переходить на ресурсосберегающие технологии производственной деятельности и жизнеобеспечения, среди которых сегодня ведущее положение в США занимает рециклинг.

Рециклинг (от англ. Recycling – рециркуляция, переработка, повторное использование, утилизация и т.д.) сегодня выделился в самостоятельную область исследований и разработок в области ресурсосбережения и утилизации продуктов жизнедеятельности практически во всех науках, включая управленческие, социально-экономические, технические и др.

Швеция достигла 99 % переработки мусора, Германия – 80 %. В США переработка алюминиевых банок экономит 95 % энергии, стальных – 67 %, пластика и стекла – более 30 %. В США и других странах 15 ноября отмечается всемирный день рециклинга. В Японии на искусственных островах из строительного мусора построили 2 международных аэропорта.

Экономически развитые страны и их ведущие компании, в том числе Johnson Controls International (США), в которой вот уже более 20 лет работает один из авторов этой статьи, давно разрабатывают и реализуют эффективные программы и проекты рециклинга.

Данное направление научной и проектной деятельности может стать ещё одной продуктивной областью приложения сил исследователей и разработчиков специальности «Технология машиностроения», что явилось побудительным мотивом написания авторами этой статьи.

При этом свой посильный вклад в развитие методологии ресурсосбережения могут внести и студенты, выполняя в рамках учебного процесса курсовые работы и проекты, в том числе по такой тематике, как разработка технико-технологических и организационно-управленческих решений ресурсосбережения в машиностроительной отрасли.

История возникновения методов ресурсосбережения, как и менеджмента в целом, насчитывает многие тысячи лет. Достаточно вспомнить начало использования человеком фекалий животных. Уже тогда отходы животноводства использовались человеком для повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

Этот метод применения навоза в качестве органических удобрений практикуется в сельском хозяйстве и по сей день. Таким образом, уже на этапе простого товарного производства человечество реализовало один из основополагающих принципов методологии ресурсосбережения, который в современных условиях хозяйствования можно сформулировать так: «Любые отходы – это упущенные доходы».

Другим примечательным примером использования рециклинга в прошлом и отчасти эффективности его использования в будущем является купля-продажа подержанной одежды, ныне именуемой «секонд-хенд», что означает «вторые руки». Именно этим видом деятельности в XVII веке, будучи «старьевщиком», в Германии занимался отец М. А. Ротшильда – основателя ныне самого богатого клана европейских банкиров.

Нынче этот вид рециклинга готовых изделий превратился в самостоятельную область предпринимательской деятельности – комиссионную торговлю. Благодаря развитию этого вида бизнеса, сменив владельца, во всём мире сегодня вторую жизнь обретают многие предметы не только потребительского обихода, будь то автомобили или подвенечные платья, но и производственное оборудование и инструменты.

В истории эволюции методов ресурсосбережения в целом и рециклинга в частности можно выделить три этапа, хронологически совпадающих со сменой общественно-экономических формаций: доиндустриальный уклад экономики, индустриальный и постиндустриальный.

Первый – это различные философские учения о культуре поведения в быту, регламентирующие бережливое отношение членов общества к потребительским продуктам, которых в то время всегда не хватало для удовлетворения абсолютного спроса. Бережливое отношение к домашней утвари в доиндустриальный период было свойственно всем народам, но наиболее яркое выражение оно получило в японской философии «Моттаинай» [1; 2].

Истоки философии моттаинай берут начало в глубокой древности, во времена формирования фундаментальных понятий японской философии, этики и эстетики. Во многом это было связано с географическим расположением государства, его оторванностью от материка и неблагоприятными климатическими условиями.

В Японии лишь третья часть суши пригодна для проживания, а остальное – горы. Япония как островное государство одной из первых среди цивилизованных стран столкнулась с проблемами нехватки собственных природных ресурсов, необходимых для развития и жизнедеятельности, что не помешало ей впоследствии выйти в число стран – лидеров мировой экономики, в том числе по производству машиностроительной продукции.

Япония подвержена многочисленным катаклизмам больше, чем другие развитые страны. Многочисленные извержения вулканов, землетрясения, тайфуны, ураганы и цунами периодически разрушали города и домохозяйства, которые затем необходимо было восстанавливать.

Философия моттаинай, культивируя смирение перед природой, готовность принять удар судьбы, выработала у японцев исключительное трудолюбие и мотивацию к рационализму везде и во всём, как и стремление к непрерывному улучшению собственных процессов функционирования на всех уровнях – от директора до уборщицы.

Возникновение философии изначально связано с необходимостью обеспечения в быту бережливого и рационального использования привычных предметов домашнего обихода, стремлением дать вторую жизнь любой вещи. Поэтому понятие моттаинай первоначально означало сожаление об утрате старой вещи или невозможности её использования посредством ремонта или приспособления для нового вида деятельности.

Помимо этого моттаинай – это ещё и сожаление по поводу нанесения вреда окружающей среде в связи с необходимостью повторного использования ограниченных ресурсов для изготовления новой утвари взамен старой.

В соответствии с японской культурой потребления в обществе вызывает осуждение любая расточительность, будь то недоеденная еда в тарелке, горящий свет в пустом помещении, непрерывно текущая вода из крана во время чистки зубов или бритья и всё то, что нарушает правила бережного и экономного отношения к природным и человеческим ресурсам.

Основы философии моттаинай первоначально базировались на соблюдении в личной жизни, а впоследствии и любом виде хозяйственной деятельности (бизнесе) постулатов «трёх R»:

1. Reduce – сокращай использование, экономь.
2. Reuse – используй повторно и многократно.
3. Recycle – перерабатывай.

Впоследствии к ним был добавлен четвёртый постулат «R» – Repair, в переводе с английского означающий «чинить».

Второй этап эволюции рециклинга можно связать с проникновением философии моттаинай в сферу управления и организации производства, что характерно для индустриального периода развития общества. Именно тогда в менеджменте впервые появились понятия «жизненный цикл продукта», «жизненный цикл технологии», «жизненный цикл предприятия», использование которых позволило расширить сферу применения принципов моттаинай от экономного поведения индивидуумов в быту до организации рациональных производственных процессов в любом виде деятельности, в том числе производстве машин и механизмов.

При этом рециклинг продукта или технологии предполагает необходимость постоянного совершенствования как продукта с целью совершенствования его потребительских свойств, так и технологии его изготовления. Вследствие этого в менеджменте обособилось отдельное направление, названное «Инновационный менеджмент».



На третьем – постиндустриальном – этапе развития человечества, для которого характерно превышение предложения над спросом и доминирование рыночной модели хозяйствования, общественное ресурсосбережение, по существу рециклинг, можно связать с эффективностью и конкурентоспособностью хозяйствующих субъектов. Право на жизнь и новый цикл функционирования сохраняют только наиболее эффективные субъекты рынка.

В индустриальный период развития человечества рециклинг-ресурсосбережение в менеджменте наряду с отходами большей частью ассоциируется с необходимостью сокращения сырьевых, материальных или энергетических ресурсов, а соответственно, и затрат на отдельных технологически переделах. Поэтому 2-й основополагающий принцип ресурсосбережения на современном этапе развития общества в целом и машиностроения в частности может быть сформулирован так: «Снижай затраты, расти доходы».

Благодаря использованию второго и четвертого постулатов моттаинай в структуре национальных экономик передовых стран возросла доля хозяйствующих субъектов, специализирующихся на ремонте буквально всего, начиная от одежды и обуви и заканчивая сложной бытовой и производственной техникой, такой как автомобили, появление которых свидетельствует о проникновении рециклинга в сферу эксплуатации продукции. В современных условиях хозяйствования и производства машиностроительной продукции эти принципы могут быть сформулированы так: «Используя повторно, продлеваешь жизнь».

В постиндустриальный период постулаты философии ресурсосбережения, перейдя с бытового уровня индивидуального потребления в производственную сферу и сферу функционирования национальной экономики, затем переходят на межнациональный уровень, формируя геоэкономику как хозяйственный уклад жизнедеятельности человечества в целом и отрасли машиностроения в частности, требующий рационального использования всех общественных ресурсов, включая природные и человеческие.

В это время происходит формирование новых направлений менеджмента, расширивших области использования и методологический инструментарий как менеджмента, так и ресурсосбережения. В этот период производственный менеджмент обогатился маркетинговым, инновационным, инвестиционным, ситуационным, системным, нормативным, комплексным, логистическим, стратегическим, трансформационным и другими подходами.

Каждый из перечисленных подходов преследует одну и ту же цель – повышение эффективности функционирования бизнеса, что априори предполагает необходимость реализации главного принципа ресурсосбережения – рационального использования всех видов необходимых ресурсов, включая сырьевые, материально-технические, энергетические, трудовые, административно-управленческие и финансовые. Последнее позволяет сформулировать четвертый принцип ресурсосбережения или рециклинга бизнеса в целом и машиностроения в частности: «Эффективные решения – источник жизнедеятельности любого бизнеса».

Однако эффективность функционирования бизнеса в рыночных условиях хозяйствования изменяется даже в краткосрочные промежутки времени под действием многочисленных факторов изменений внешней или внутренней среды. При неблагоприятных изменениях бизнес нужно трансформировать, адекватно изменяя комбинацию используемых ресурсов для поддержания либо повышения эффективности деятельности в новых условиях хозяйствования.

Необходимость преобразований бизнеса в условиях динамичной внешней среды позволяет предложить 5-й принцип рециклинга бизнеса в целом и машиностроения в частности: «Совершенство деятельности, продлеваешь жизнь бизнеса». Методы разработки адаптационных стратегий трансформации бизнеса подробно освещаются в работе [5].

Эффективность и адаптационные способности дают право хозяйствующему субъекту использовать природные и общественные ресурсы, продлевая собственный жизненный цикл практически до бесконечности, и получать соответствующее вознаграждение – доход. На достижение этой цели направлена методология «перфоманс контрактинга» (эффективных контрактов), концептуальные основы которой изложены в работе [6].

При сокращении спроса право на продление собственного жизненного цикла (рециклинг бизнеса) имеют только наиболее конкурентоспособные организационные структуры, что явилось основой формулирования 6-го принципа рециклинга: «Лидерство – залог успеха бизнеса».

Реализация любой трансформационной стратегии, будь то повышение конкурентоспособности, рост или сокращение масштабов деятельности, продуктовых или технико-технологических инноваций, территориальной экспансии или диверсификации деятельности, должна сопровождаться проектом реструктуризации активов хозяйствующего субъекта. Для этого необходимо решить ряд специфических задач по преобразованию старого формата бизнеса в новый. На решение этих задач направлена методология реинжиниринга бизнес-процессов, формы, методы и инструментарий которой изложены в фундаментальной работе [7].

Заключение. Методология ресурсосбережения прошла долгий путь развития. Начав с философского учения бережливого отношения в быту к домашней утвари, она перешла в сферу производства (микроэкономика предприятий), затем вышла на уровень отраслевого и государственного управления (макроэкономика) и в настоящее время выходит на межнациональный уровень, формируя новый экономический уклад – геоэкономику.

На каждом эволюционном переходе осуществлялся прирост знаний в области ресурсосбережения, изменялись и дополнялись формы, методы и инструментарий методологии. Ресурсосбережение стало предметом деятельности многочисленных наук, включая технико-технологические, социально-экономические, управленческие и экологические.

Машиностроительный комплекс России, отличаясь высокими показателями металло-, материало-, энерго- и трудоёмкости, сегодня как ни какая другая отрасль нуждается в решении проблем его функционирования. Знание основ методологии ресурсосбережения будет весьма полезно руководителям машиностроительных предприятий, исследователям и разработчикам в области технологии машиностроения, обременённым поиском решения насущных проблем отечественного машиностроения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молодякова, Э. В. Японское общество: книга перемен / Э. В. Молодякова, С. Б. Маркарьян. – М.: Институт востоковедения РАН, 1996. – 256 с.
2. Пронников, В. А. Японцы (этнопсихологические очерки) / В. А. Пронников, И. Д. Ладанов. – М.: Наука, 1985. – 348 с.
3. Российский статистический ежегодник, 2017: стат. сб. / Росстат. – М., 2017. – 86 с.
4. Сысоева, А. В. Управление внеоборотными активами предприятия / А. В. Сысоева, О. Р. Кузнецова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2018. – № I-2 (33). – С. 111-115.
5. Усанов, Г. И. Рыночный потенциал предприятия: диагностика состояния, стратегия адаптации и развития / Г. И. Усанов. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного ун-та, 2002. – 250 с.
6. Усанов, М. Г. Методологические основы и опыт реализации перфоманс контрактинга / М. Г. Усанов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 487-492.
7. Усанов, И. Г. Реинжиниринг бизнес-процессов: методология, формы, инструментарий / И. Г. Усанов. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 259 с.
8. Официальный сайт Организации Объединённых Наций. – URL: <https://www.un.org/ru/>.
9. Перспективы и проблемы развития машиностроения // Энциклопедия экономиста. – URL: www.Grandars.ru (дата обращения: 10.11.2021). – Текст: электронный.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

METALLURGY AND MATERIALS

Ри Хосен, Живетьев А. С., Ким Е. Д., Дорошенко К. В., Попова В. С.
Hosen Ri, A. S. Zhivetev, E. D. Kim, K. V. Doroshenko, V. S. Popova

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ АЛЮМИНИДОМ НИКЕЛЯ

INFLUENCE OF ISOTHERMAL HOLDING ON THE STRUCTURE FORMATION OF TIN BRONZE MODIFIED WITH NICKEL ALUMINIDE

Ри Хосен – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)404-88-77. E-mail: ri@mail.khstu.ru.

Ri Hosen – Dr. of Engineering, Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel. 8(914)404-88-77. E-mail: ri@mail.khstu.ru.

Живетьев Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); тел. 8(914)196-55-49.

Andrei S. Zhivetev – PhD, Assistant Professor, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(914)196-55-49.

Ким Евгений Давидович – кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)202-27-52.

Eugenie D. Kim – PhD, Lecturer, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 136, Tikhookeanskaya str.; tel. 8(914)202-27-52.

Дорошенко Кирилл Владимирович – аспирант кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(924)312-39-46.

Kirill V. Doroshenko – Post-graduate Student, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 136, Tikhookeanskaya str.; tel. 8(924)312-39-46.

Попова Виктория Сергеевна – магистрант кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(924)208-60-80.

Victoria S. Popova – Master's Degree Student, Foundry Engineering and Metal Technology Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 136, Tikhookeanskaya str.; tel. 8(924)208-60-80.

Аннотация. Оловянные бронзы являются хорошим антифрикционным материалом. Область их применения ограничена из-за низких прочностных свойств. Улучшить прочностные свойства можно путём изменения их структуры с помощью термообработки. В данной статье представлены данные о влиянии изотермической выдержки на структуру литой бронзы. Показано, что даже небольшие добавки модификатора (0,05 %) на основе алюминидов никеля позволяют измельчить литейное зерно, уменьшить средний размер электронного соединения и сформировать дисперсную сетку эвтектидных включений.

Summary. Tin bronzes are a good anti-friction material. The scope of their application is limited due to low strength properties. Strength properties can be improved by changing their structure using heat treatment. This article presents data on the effect of isothermal holding on the structure of cast bronze. It is shown that even small additions of a modifier (0.05 %) based on nickel aluminides make it possible to refine the casting grain, reduce the average size of the electronic compound, and form a dispersed network of eutectoid inclusions.

Ключевые слова: модифицирование, микротвёрдость, медь, олово, бронзовые сплавы, мелкозернистая микроструктура, изотермическая выдержка.

Key words: modification, microhardness, copper, tin, bronze alloys, fine-grained microstructure, isothermal holding.

УДК 669.2

Введение

Известно, что эксплуатация бронзовых деталей, изнашивающихся при знакопеременных и циклических нагрузках, значительно сокращает срок их службы [1; 2]. Важная роль в таких деталях принадлежит концентраторам напряжений, которые являются следствием как конструктивных особенностей, так и особенностей гетерофазного материала деталей [3]. И если концентраторы напряжений, вызванные конструктивными особенностями, часто можно быстро устранить, то концентраторы напряжений, вызванные структурой материала, устраняются гораздо труднее. Повышение усталостной долговечности может быть достигнуто заменой бронзы на материал с повышенными прочностными свойствами или на аналогичную бронзу без концентраторов напряжений – свинцовых включений [4–7]. Но самым важным практическим свойством таких свинецсодержащих оловянных бронз является их очень низкий коэффициент трения по закалённой стали. В то же время низкие прочностные характеристики этих бронз во многом ограничивают их применение. Одним из перспективных направлений повышения комплекса служебных свойств металлов в настоящее время является их легирование нанопорошками. Введение в расплав их небольшого количества перед процессом кристаллизации позволяет существенно повысить прочностные свойства отливок [8–11]. Такое модифицирование медных сплавов перспективно одновременно с нескольких точек зрения. Во-первых, частицы нанопорошков, введённые в расплав, будут служить центрами кристаллизации. В результате микроструктура отливок будет более мелкозернистой. Такая мелкозернистая структура будет иметь более высокие прочностные характеристики по сравнению с обычной микроструктурой. Во-вторых, введение дополнительных частиц нанопорошка – зародышей зёрен – позволяет сузить размер температурного интервала кристаллизации сплава. Тем самым снижается усадочная пористость отливки. Отливка становится более плотной с меньшим количеством дефектов. Это приводит к повышению прочностных свойств за счёт изменения структуры. В-третьих, нанопорошки частиц оксидов и нитридов металлов имеют высокую температуру плавления и высокую твёрдость. Они не растворяются в объёме отливки и остаются в виде наноразмерных включений. В процессе пластической деформации такие включения будут препятствовать скольжению дислокаций. Таким образом, равномерно распределённые частицы создадут дисперсионное твердение отливки. Кроме того, в данной работе исследовалось влияние термовременной обработки на структурообразование оловянистой бронзы, что является весьма актуальным для формирования свойств отливок.

Методика и материалы

В качестве исходного сырья для получения лигатуры использовали оксид никеля NiO – 98,7, порошок алюминия ПА4-99,4 (средний размер частиц 50 мкм), термитную добавку NaNO₃ – 99,0 (средний размер частиц 100 мкм), флюс CaF₂ квалификации «ч». Металлотермический синтез композиционного сплава проводили в жаропрочных металлических тиглях, футерованных огнеупорным материалом. Реакцию горения инициировали электрозапалом сверху.

В качестве исходного сплава применяли оловянную бронзу следующего состава, мас. %: 87,4 Cu; 7,23 Sn; 4,92 Al; 0,261 P; 0,102 S; 0,105 Fe.

Оловянистую бронзу перегревали до температуры 1300 °С, после 5-минутной выдержки вводили лигатуру в расплав. В связи с высокой температурой плавления лигатуры исследовалось влияние продолжительности изотермической выдержки при температуре 1300 °С после модифицирования.

Для определения элементного состава продуктов синтеза использовали рентгенофлуорисцентный анализатор «Спектроскан Макс-GV». Микроструктуру сплавов исследовали с помощью электронного микроскопа Hitachi SU-70 с ЭДС-приставкой.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим более подробно результаты локального анализа элементов в фазах – в α-твёрдом растворе и электронном соединении δ-фазы (Cu₃₁Sn₈) при различных продолжительностях изотермической выдержки – 5, 10 и 15 минут.

Изотермическая выдержка 5 минут (0,05 мас. % лигатуры).

В модифицированной (0,05 мас. % лигатуры) оловянной бронзе (см. рис. 1) вдали от электронного соединения (точки 1-3) в α_2 -твёрдом растворе содержание Sn составляет 1,51 ат. %, а концентрация алюминия – 0,7 ат. % (см. табл. 1).

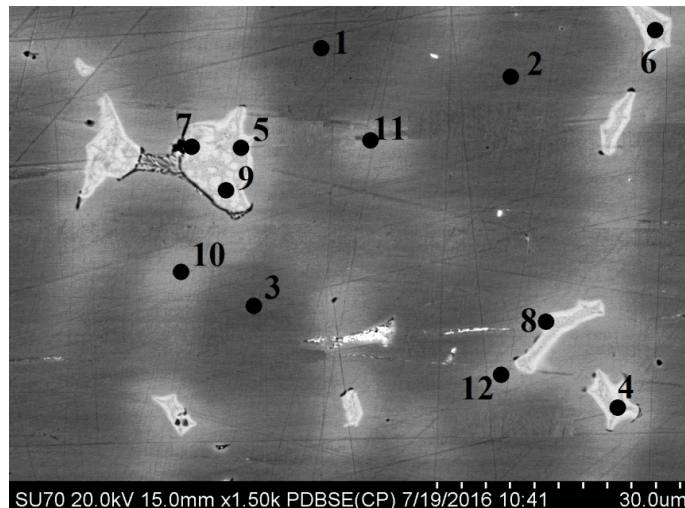


Рис. 1. Точки анализа элементов в структурных составляющих сплава с 0,05 мас. % лигатуры при изотермической выдержке в течение 5 минут, x1500

Таблица 1

Распределение элементов в структурных составляющих сплава с 0,05 мас. % лигатуры при изотермической выдержке в течение 5 минут

Точки анализа элементов	Структурные составляющие	Содержание элементов, ат.%			
		Cu	Sn	Al	P
1-3	α_2 -твёрдый раствор Sn и Al в меди вдали от электронного соединения $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$	97,79	1,51	0,7	-
4-9	Электронное соединение $\text{Al}_3(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_8$ с примесями 0,77 ат. % Al и 0,515 ат. % P	80,37	18,34	0,77	0,515
		$\text{Cu}_{31}\text{Sn}_{7,08} \approx \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ или $\text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_{7,6} \approx \text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_8$			
10-12	α_1 -твёрдый раствор Sn, Al, P в меди вблизи электронного соединения	90,18	8,27	0,703	0,84

Стехиометрия электронного соединения соответствует $\text{Cu}_{80,37}\text{Sn}_{18,34} = \text{Cu}_{31}\text{Sn}_{7,08}$ или $\text{Cu}_{80,37}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_{19,63} = \text{Al}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_{7,58} \approx \text{Al}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})$.

В светлой зоне на фоне тёмного поля α_2 -твёрдого раствора концентрируется большое количество Sn и P (0,84 ат. %). По-видимому, эти включения представляют α_1 -твёрдые растворы Sn, Al, P в меди.

Изотермическая выдержка 10 мин. (0,05 мас. % лигатуры).

С увеличением времени выдержки до 10 минут после модифицирования получены следующие результаты по структурным составляющим (см. рис. 2 и табл. 2):

- в α_2 -твёрдом растворе Sn, Al, P в меди (точки 5-7) вдали от электронного соединения растворяются, ат. %: 97,14 Cu; 2,28 Sn; 0,58 Al;

- в электронном соединении (точки 1-4, 12) концентрируются ат. %: 82,17 Cu; 16,97 Sn; 0,41 Al и 0,445 P; стехиометрия данного электронного соединения $\text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})$;

- в светлой зоне на фоне тёмного поля α_2 -твёрдого раствора сосредоточены, ат. %: 92,91 Cu; 6,54 Sn; 0,18 Al и 0,123 P (точки 8-11).

Следовательно, при увеличении времени изотермической выдержки до 10 минут:

1. в α_2 -твёрдом растворе увеличивается растворимость олова с 1,81 до 2,28 ат. %, а содержание алюминия уменьшается с 0,7 до 0,58 ат. % Al;

2. в электронном соединении олово растворяется в меньшей степени (от 17,6-18,24 до 16,97 ат. % Sn), а содержание Al также уменьшается (от 0,72-0,77 до 0,58 ат. % Al); концентрация фосфора практически не изменяется (от 0,52 до 0,445 ат. % P);

3. в светлой зоне на фоне тёмного поля α_1 -твёрдого раствора содержание компонентов изменяется:

- при 5-минутной выдержке, ат. %: 90,18 Cu; 8,27 Sn; 0,703 Al; 0,84 P;

- при 10-минутной выдержке, ат. %: 92,91 Cu; 6,54 Sn; 0,18 Al; 0,123 P.



Рис. 2. Точки анализа элементов в структурных составляющих сплава с 0,05 мас. % лигатуры при изотермической выдержке 10 минут, x1500

Таблица 2

Распределение элементов в структурных составляющих сплава с 0,05 мас. % лигатуры при изотермической выдержке 10 минут

Точки анализа элементов	Структурные составляющие	Содержание элементов, ат. %			
		Cu	Sn	Al	P
1-4, 12	Электронное соединение $\text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_8$	82,17	16,97	0,41	0,445
		$\text{Cu}_{82,17}\text{Sn}_{16,97} = \text{Cu}_{31}\text{Sn}_{6,4}$ или $\text{Cu}_{82,17}(\text{Sn}, \text{P}, \text{Al})_{17,83} = \text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_{9,26} \approx \text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{P}, \text{Al})_8$			
5-7	α_2 -твёрдый раствор Sn и Al в меди вдали от электронного соединения	97,14	2,28	0,58	-
8-11	α_1 -твёрдый раствор вблизи электронного соединения	92,91	6,54	0,18	0,123

Следовательно, содержание Sn, Al и P уменьшается, а концентрация Cu возрастает.

Изотермическая выдержка 15 минут (0,05 мас. % лигатуры).

При длительной выдержке в течение 15 минут в α_2 -твёрдом растворе вдали от электронного соединения растворяются в ат. %: 98 Cu; 1,3 Sn; 0,687 Al (см. рис. 3 и табл. 3). Следовательно, содержание олова в нём уменьшается с 2,28 до 1,3 ат. % Sn по сравнению с выдержкой в течение

10 минут. При этом содержание Al возрастает с 0,58 до 0,69 ат. %, а фосфор практически не растворим в α_2 -твёрдом растворе. В электронном соединении стехиометрия соответствует $\text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_8$. По сравнению с 10-минутной выдержкой при выдержке в течение 15 минут наблюдается тенденция возрастания содержания Sn и Al в электронном соединении при постоянной концентрации фосфора (0,4-0,45 ат. %).

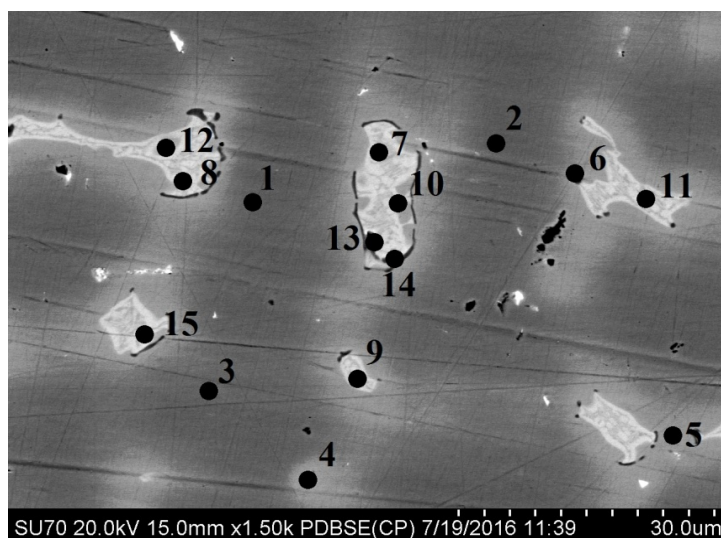


Рис. 3. Точки анализа элементов в структурных составляющих сплава с 0,05 мас. % лигатуры, время выдержки 15 минут, $\times 1500$

Таблица 3

Распределение элементов в структурных составляющих сплава с 0,05 мас. % лигатуры при изотермической выдержке 15 минут

Точки анализа элементов	Структурные составляющие	Содержание элементов, ат. %				
		Cu	Sn	Al	Ni	P
1-3	α_2 -твёрдый раствор Sn и Al в меди вдали от электронного соединения	98,0	1,3	0,687	-	-
7-9	Электронное соединение $\text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_8$	78,63	20,39	0,59	-	0,4
		$\text{Cu}_{78,63}\text{Sn}_{20,39} = \text{Cu}_{31}\text{Sn}_{8,03} \approx \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ или $\text{Cu}_{78,63}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_{21,37} = \text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_{9,1} \approx \text{Cu}_{31}(\text{Sn}, \text{Al}, \text{P})_8$				
13-15	α_2 -твёрдый раствор + Cu_3P	75,54	4,8	0,46	0,25	18,95
4-6, 10, 11	α_1 -твёрдый раствор вблизи электронного соединения	89,73	9,21	0,542	-	0,528

На рис. 4 представлены результаты влияния продолжительности изотермической выдержки на распределение олова и алюминия в α_2 -твёрдом растворе и алюминия, олова и фосфора в электронном соединении. В модифицированном 0,05 мас. % лигатуры сплаве в α_2 -твёрдом растворе содержание олова и алюминия изменяется по экстремальной зависимости с максимумом концентрации олова и минимумом содержания алюминия при выдержке расплава, равной 10 минутам. В электронном соединении при 10-минутной выдержке наблюдаются минимумы содержания олова и алюминия. Содержание фосфора изменяется незначительно от времени выдержки расплава, модифицированного 0,05 мас. % лигатуры.

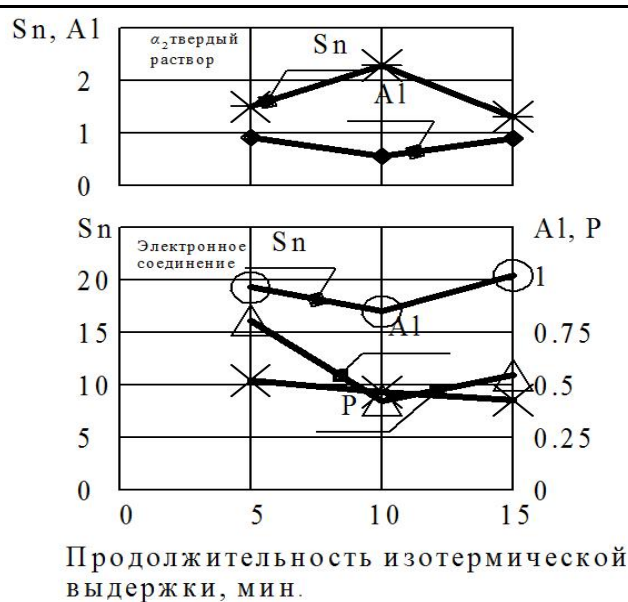


Рис. 4. Зависимость соотношения элементов от продолжительности изотермической выдержки

Выводы

10-минутная изотермическая выдержка оловянистой бронзы при температуре 1300 °С после модифицирования 0,05 мас. % лигатурой алюминидов никеля способствует измельчению электронного соединения, снижению содержания алюминия в α_2 -твёрдом растворе и повышению содержания олова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jun Z. Tensile and friction properties of tin bronze matrix composites reinforced by carbon fibers // Tribology letters. – 2010. – Т. 40. – № 3. – P. 311-317.
2. Lykov Y. V., Gorelikov V. G., Gantulga B. Analytical research and classification of mechanism of diamond drilling-bits contact with rocks during well sinking // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2017. – Т. 87. – № 2. – P. 022012.
3. Martyushev N. V., Mamadaliev R. A., Skeebe V. Y. Influence of modification by superdispersed powder of aluminum oxide on lead-tin bronze structure // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1118. – № 1. – P. 012062.
4. Paul C., Sellamuthu R. Effect of nickel content on hardness and wear behavior of surface modified functionally graded Cu-Sn bronze alloy // International Journal of Materials Engineering Innovation. – 2016. – Т. 7. – № 1. – P. 43-55.
5. Gupta R. et al. High leaded tin bronze processing during multi-directional forging: Effect on microstructure and mechanical properties // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Т. 654. – P. 282-291.
6. Bharatish A. et al. Effect of scanning speed and tin content on the tribological behavior of femtosecond laser textured tin-bronze alloy // Optics & Laser Technology. – 2018. – Т. 108. – P. 17-25.
7. Petrov S. V., Sidorov N. S., Vorohov A. A. The influence of modification by superdispersed powders on the lead-tin-base bronze structure. URL: https://www.researchgate.net/publication/301571148_The_influence_of_modification_by_superdispersed_powders_on_the_lead-tin-base_bronze_structure.
8. Huttunen-Saarivirta E. et al. Tribocorrosion behaviour of tin bronze CuSn12 under a sliding motion in NaCl containing environment: Contact to inert vs. reactive counterbody // Tribology International. – 2020. – Т. 151. – P. 106389.
9. Bartocha D., Baron C. Influence of tin bronze melting and pouring parameters on its properties and bells' tone // Archives of Foundry Engineering. – 2016. – Т. 16.
10. Kozana J. et al. Experimental Investigation and Thermodynamic Modeling of Influence of Nickel and Titanium Content on the Structure and Selected Properties of Tin Bronzes // Materials. – 2021. – Т. 14. – № 20. – P. 5944.
11. Li Y. K. et al. Microstructures formation, distribution of tin element and properties of CuSn10P1 alloy during controlled by melt cooling // Materials Research Express. – 2018. – Т. 5. – № 6. – P. 066517.

Коротеева Л. И., Ливицина Л. О.
L. I. Koroteeva, L. O. Livitsina

**АНАЛИЗ НЕГАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМЕЛЬНЫХ
РЕСУРСОВ НА ТЕРРИТОРИИ КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА ХАБАРОВСКОГО КРАЯ**

**ANALYSIS OF NEGATIVE PROCESSES AFFECTING THE STATE OF LAND RESOURCES
IN THE TERRITORY OF KOMSOMOLSKY DISTRICT OF Khabarovsk Krai**

Коротеева Любовь Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и техносферной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на Амуре); тел. 8(914)187-87-14. E-mail: Lkoroteewa@yandex.ru.

Lubov I. Koroteyeva – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)187-87-14. E-mail: Lkoroteewa@yandex.ru.

Ливицина Любовь Олеговна – магистр кафедры кадастра и техносферной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)174-45-65. E-mail: love-20@list.ru.

Lyubov O. Livitsina – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Krai, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave, 27; tel. 8(914)174-45-65. E-mail: love-20@list.ru.

Аннотация. В статье проанализированы негативные процессы, влияющие на состояние почвенно-растительного покрова на территории Комсомольского района Хабаровского края, и рассмотрены изменения типов развития негативных процессов и их степеней. Даны рекомендации по устранению последствий негативных процессов.

Summary. The article analyzes the negative processes affecting the state of the soil and vegetation cover on the territory of Komsomolsky district of Khabarovsk Krai and examines changes in the types of development of negative processes and their degrees. Recommendations for eliminating the consequences of negative processes are given.

Ключевые слова: негативные процессы, водная эрозия, переувлажнение, подтопление, заболачивание, затопление, абразионные процессы.

Key words: negative processes, water erosion, overwatering, waterlogging, waterlogging, flooding, abrasion processes.

УДК 332.3

Полная и объективная оценка эффективного управления земельными ресурсами нашего региона может определяться созданием и практической реализацией системы государственного управления гражданским оборотом земель в целом. Данная система включает в себя земельные угодья и прочно связанные с ними объекты капитального строительства, месторождения полезных ископаемых, лесные угодья и территории водных объектов.

Управление земельными ресурсами (УЗР) является действенным и эффективным, если информация о земельном фонде актуальна и достоверна. Такие требования достигаются в результате земельно-кадастровой деятельности, мониторинга, охраны и контроля земельных ресурсов, которые, как известно, являются основополагающими методами в управлении земельными ресурсами (см. рис. 1).

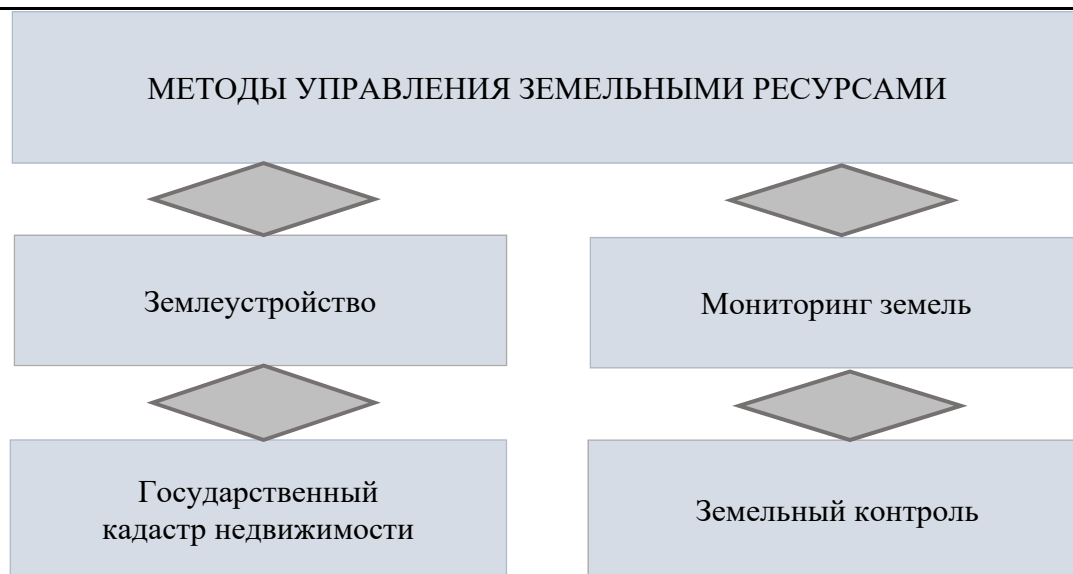


Рис. 1. Основные методы управления земельными ресурсами

В показатели эффективности земельно-кадастровых работ на территории Комсомольского района входят:

- значения фактических земельных платежей, р./га;
- значения расчётных земельных платежей, р./га;
- коэффициент, определяющий эффективность земельно-кадастровых работ;
- резервы поступления земельных платежей, тыс. р.

Полная и объективная оценка эффективного управления земельными ресурсами нашего региона должна определяться совокупностью следующих функций:

- экологической и ресурсной, т. к. земля является объективно существующим природным объектом;
- социальной, т. к. земля определяет место и комфортность жизни человека;
- экономической, т. к. земля является прежде всего объектом хозяйственной деятельности;
- информационной, т. к. внедрение прогрессивных информационных технологий в процесс УЗР на современном этапе неизбежно;
- общественно-политической, т. к. земля – это территория государства с правовым обеспечением и государственными законами в сфере УЗР.

Явления, которые приводят к отрицательным изменениям состояния земельных территорий, и в том числе деградации плодородного слоя почвы, относятся к негативным процессам. Интенсивность их распространения зависит от ряда факторов, например:

- от существующих ландшафтно-климатических условий рассматриваемой территории;
- антропогенных или техногенных нагрузок.

Процессы природного и антропогенного воздействия имеют между собой тесную взаимосвязь, и, как следствие, накопление антропогенных воздействий влечёт природные негативные изменения. Поэтому можно выделить ещё одну группу нагрузок – природно-антропогенные.

Специфика развития негативных процессов в Комсомольском районе Хабаровского края представлена на рис. 2.

На территории Комсомольского района Хабаровского края выявлен ряд негативных процессов, которые можно разделить на две категории.

К первой категории следует отнести природное происхождение данных процессов. Они представлены на рис. 3.

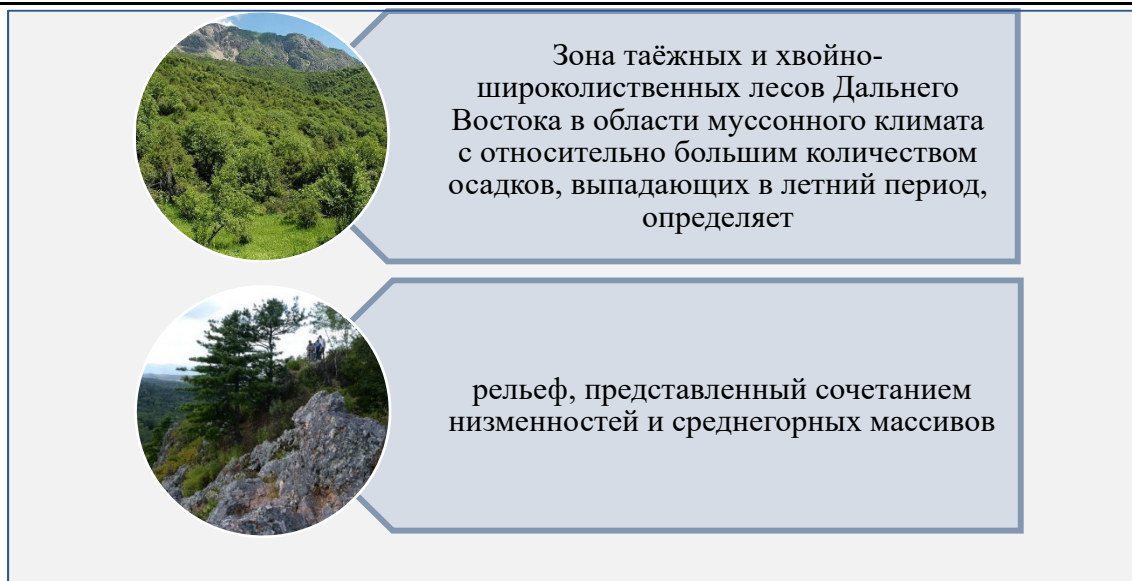


Рис. 2. Специфические условия развития негативных процессов в Комсомольском районе Хабаровского края

Вторая категория обусловлена антропогенными или техногенными воздействиями. В Комсомольском районе Хабаровского края к таким процессам следует отнести воздействия, представленные на рис. 4.

На территории Комсомольского района негативные процессы природного и антропогенного происхождения (см. рис. 4) занимают 2432,76 тыс. га земель.

Земельные территории, подверженные процессам водной эрозии, образуют самые большие ареалы нарушенных земель: выявлено 1313,5 тыс. га земель, которые подвержены водно-эрозионным процессам.

Водная эрозия – эродированные земли, потерявшие в результате частично или полностью плодородный слой

Подтопление – подъём уровня грунтовых вод к дневной поверхности, приводящий к водонасыщению грунтов

Переувлажнение – содержание влаги, превышающее предельную полевую влагоёмкость

Заболачивание – изменение водного режима в результате длительного переувлажнения, подтопления и затопления почв

Затопление – образование свободной поверхности воды на участке территории в результате повышения уровня водотока или подземных вод

Абразионные процессы – размываемые участки берегов р. Амур с фрагментарным или сплошным выходом коренных пород

Рис. 3. Негативные процессы природного происхождения

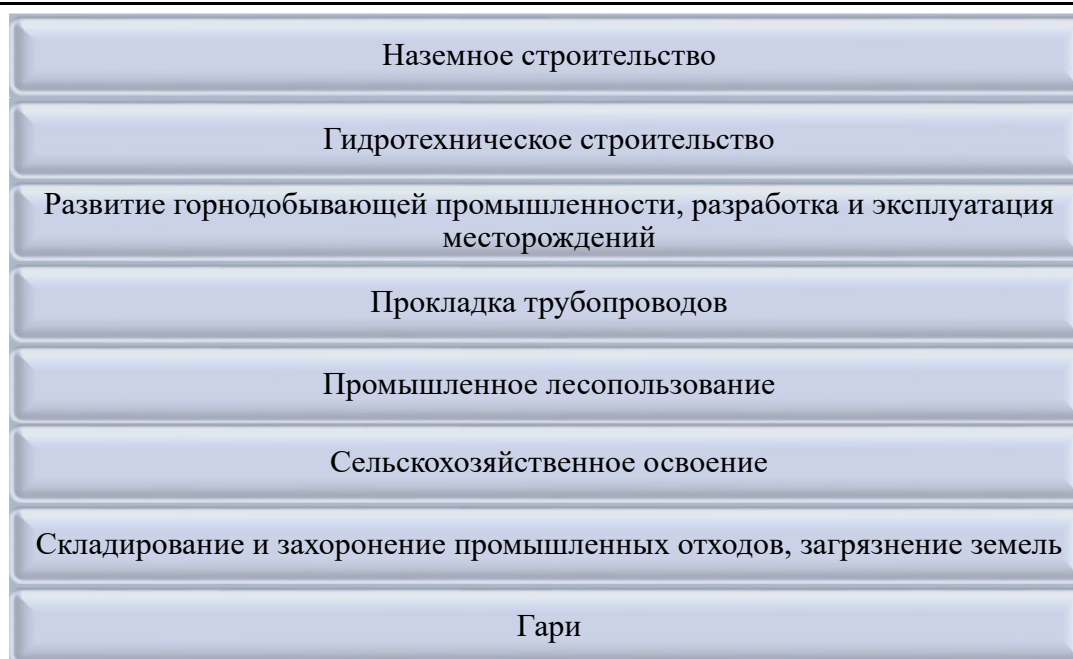


Рис. 4. Категории, обусловленные антропогенными условиями воздействия

По результатам проведённого мониторинга был выполнен анализ состояния и развития первой категории негативных факторов воздействия на земельные ресурсы в Комсомольском районе. Установлено, что 124,12 тыс. га земель подвержено заболачиванию, что составляет 4,93 % всей площади земель данного района. Затопление речных пойм составляет 114,01 тыс. га (4,53 % от всех земельных угодий района). Процессы подтопления в районах карьерных разработок, вблизи водоотливов и на отдельных пойменных террасах занимают сравнительно небольшие площади в пределах 0,033 % от общей площади земель района.

Абразия по берегам реки Амур в Комсомольском районе встречается фрагментами, которые занимают 242,5 га или 0,01 % от рассматриваемой территории.

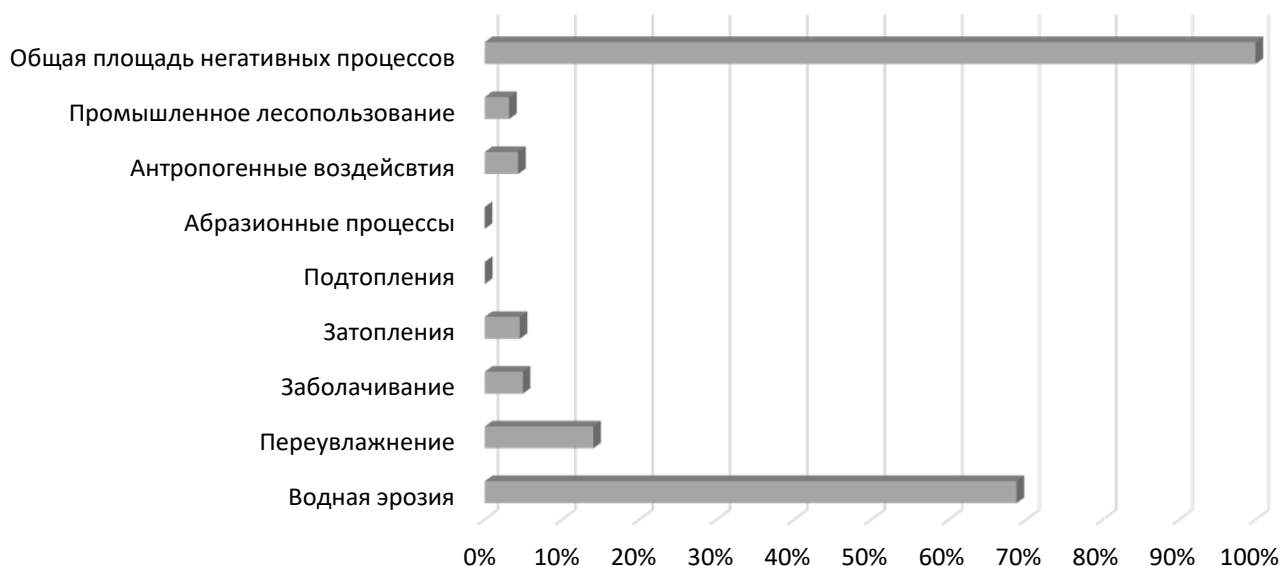


Рис. 5. Негативные процессы природного и антропогенного происхождения



Площади земельных угодий Комсомольского района, преобразованные в результате антропогенно-техногенной деятельности, составили 108,84 тыс. га (4,32 % от общей площади земель). Из них 79,88 тыс. га (3,17 %) приходится на промышленное лесопользование всех лесных богатств района.

По результатам наблюдений за развитием негативных процессов как природного, так и антропогенного характера следует отметить, что существенные изменения происходят во внутренней структуре данных явлений, а именно в той или иной степени идёт изменение типов развития данных процессов, добавляются негативные процессы антропогенного происхождения, обусловленные добычей полезных ископаемых и активным лесопользованием. В цифрах это составляет 86,20 тыс. га (3,43 % от всех земель района).

Появление новых негативных процессов первой категории, т. е. обусловленных природными явлениями, наблюдается в основном на территориях, которые подвержены процессам водной эрозии и переувлажнению, вследствие чего площади заболачивания увеличены на 9,18 тыс. га (0,36 %).

Вывод. На территориях, подверженных процессам водной эрозии, необходимо регулярно проводить мероприятия, которые направлены на снижение последствий негативных природных и антропогенных явлений, уменьшающих эффективность управления земельными ресурсами в Комсомольском районе Хабаровского края:

- контролировать эрозионные процессы в динамике;
- сохранять естественный растительный покров и в обязательном порядке восстанавливать его, если он нарушен. Например, такие нарушения происходят чаще всего по склонам эрозионной сети.

Переувлажнённым участкам требуются мероприятия по улучшению существующих дренажных систем и созданию новых. К таким мероприятиям относится устройство водоотводных канав, устранение объектов или изменение форм рельефа, препятствующих оттоку воды.

Мероприятия мелиоративного назначения необходимо проводить на участках, подверженных заболачиванию, т. к. данный процесс развивается в положительной динамике.

Абразия берегов реки Амур требует мониторинга в сочетании с берегоукрепительными работами. Инженерно-технические мероприятия проводятся на участках затоплений: дамбах, противопаводковых водохранилищах.

Участки, занятые промышленным лесопользованием, требуют для предупреждения распространения лесных насекомых и вредителей уборки «мёртвой» древесины. Для того чтобы минимизировать процессы переувлажнения и заболачивания, необходимо проводить дренажные работы на участках вырубок. Обязательно проводить работы по лесовосстановлению насаждений эксплуатационного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайдельман, Ф. Р. Мелиорация почв: учеб. / Ф. Р. Зайдельман. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – 448 с.
2. Официальный сайт администрации Комсомольского муниципального района. – URL: <https://raion-kms.khabkrai.ru/> (дата обращения: 14.11.2021). – Текст: электронный.
3. Костецкий, В. А. Оценка земельных ресурсов в России: учебное пособие / В. А. Костецкий. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2012. – 345 с.
4. Хабаровский край. Официальный информационный портал. – URL: <https://www.khabkrai.ru/khabarovsk-krai/Razvitie-kрая/197> (дата обращения: 14.11.2021). – Текст: электронный.

Ким К. К., Иванов С. Н., Спичкин Г. Л.

K. K. Kim, S. N. Ivanov, G. L. Spichkin

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОКЛИМАТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ОФИСНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ НА ТРАНСПОРТЕ

MICROCLIMATE ENSURING IN INDUSTRIAL AND OFFICE PREMISES IN TRANSPORT

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

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical and Heat Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

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

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

Спичкин Георгий Леонидович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры электротехники и теплоэнергетики Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(921)742-89-74. E-mail: spich@mail.ru.

Georgy L. Spichkin – PhD in Engineering, Leading Researcher, Electrical and Heat Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(921)742-89-74. E-mail: spich@mail.ru.

Аннотация. Приведены результаты разработки новых подходов к обеспечению оптимального микроклимата в производственных и офисных помещениях на транспорте. Изложены подходы для определения микробиологической обсеменённости воды на основе титрационного (бродильного) метода, для определения увлажнения воздуха с использованием метода дистилляции (Дина-Старка). Получен опытный образец устройства, сочетающего в себе функции «мокрой» очистки воздуха от аэрозольных загрязнителей, экологически чистого увлажнения и биполярной ионизации. Практическая значимость результатов предложенного принципа регулирования температуры, относительной влажности и подвижности воздуха заключается в обеспечении комфортного микроклимата в замкнутых помещениях. Сформулированы технико-гигиенические требования к «идеальному» устройству с заявленными функциями очистки, увлажнения и ионизации воздуха.

Summary. The results of the development of new approaches to ensuring an optimal microclimate in industrial and office premises in transport are presented. Approaches for determining the microbiological contamination of water based on the titration (fermentation) method, for determining the humidity of the air using the distillation method (Dean-Stark) are described. A prototype of a device combining the functions of «wet» air purification from aerosol pollutants, environmentally friendly humidification and bipolar ionization has been studied. The practical significance of the results of the proposed principle of regulating temperature, relative humidity and air mobility is to ensure a comfortable microclimate in confined spaces. Technical and hygienic requirements for an «ideal» device with the declared functions of air purification, humidification and ionization are formulated.

Ключевые слова: воздушная среда, ионизация, озонирование, очищение, комфорт, кондиционирование, аэроионы отрицательной или отрицательной и положительной полярности.

Key words: air environment, ionization, ozonation, purification comfort, conditioning, aeroions of negative or negative and positive polarity.

УДК 615.8

Введение. Реалии настоящего времени предъявляют к разработчикам и производителям транспортной техники жёсткие требования относительно комфортности условий перевозки пассажиров и работы обслуживающего персонала. Транспортные средства должны соответствовать стандартам, относящимся к вопросам создания микроклимата в замкнутых помещениях. В директивных документах отмечается, что конструкция и способ эксплуатации каждого технического средства должны обеспечивать соответствие изделия европейским стандартам, относящимся к электромагнитной совместимости. Это должно быть отмечено в декларации производителя или же в протоколе испытаний, проведённых компетентным органом, аккредитованным в установленном порядке, в случае, когда при изготовлении изделия не использованы соответствующие стандарты, либо такие стандарты отсутствуют.

В настоящее время техника кондиционирования достигла высокого уровня развития, но использование этой техники без чёткого понимания всех составляющих микроклимата и их взаимного влияния друг на друга не обеспечивает создания комфортных условий для пассажиров и обслуживающего персонала.

Основными показателями комфортности микроклимата в помещении, например в купе железнодорожного вагона или в салоне самолёта, являются: температура воздуха, влажность воздуха, подвижность воздуха, качество воздуха, его физико-химический состав [1–5].

Для того чтобы человек чувствовал себя в помещении комфортно, необходимо, чтобы параметры микроклимата были близки к вполне определённым показателям. Большинство людей чувствуют себя комфортно при температуре около 20 °С, относительной влажности 50-60 %, подвижности воздуха на уровне 0,5 м/с. Индивидуальное ощущение комфортности может несколько отличаться от средних показателей в ту или иную сторону, поэтому одной из инженерных задач в области кондиционирования воздуха является обеспечение возможности варьирования параметров микроклимата в определённых пределах. Если с перечисленными параметрами всё более или менее понятно, то с качеством воздуха всё обстоит сложнее.

Природный воздух представляет собой сложную смесь газов и аэрозолей. Сохранение природных показателей воздуха при его транспортировке по воздуховодам, при прохождении воздуха через системы очистки практически невозможно, т. к. воздух теряет свои «природные» качества, становится деионизированным и деозонированным. Использование такого воздуха для дыхания нельзя назвать комфортным. Ситуацию можно улучшить, если вблизи человека расположить комнатные ионизаторы, очистители, увлажнители [6; 7].

В настоящее время выпускается огромное количество устройств, предназначенных для очищения воздуха от аэрозолей, его увлажнения, насыщения активными формами кислорода (озон и ионы кислорода). Казалось бы, конкуренция огромная и трудно занять достойное место с аналогичной продукцией среди известных фирм-производителей. И тем не менее давайте попробуем.

Попытаемся проанализировать предлагаемую продукцию глазами профессионала, которому знакомы не только методы решения тех или иных технических задач, но и проблемы гигиены, с которыми приходится сталкиваться при эксплуатации бытовых устройств. Посмотрим, какие технические характеристики приводит производитель в паспорте, прилагаемом к устройству, заявленному как «очиститель, увлажнитель, ионизатор».

В паспорте устройств, предназначенных для увлажнения воздуха, кроме обязательных характеристик (потребляемая мощность, гарантированный срок службы и т.д.), производителем обычно указываются следующие характеристики:

- тип устройства (например, ультразвуковой увлажнитель или увлажнитель испарительного типа);
- производительность увлажнителя (количество испаряемой воды в единицу времени, г/ч);
- объём помещения (м^3), в котором рекомендуется установка данного увлажнителя.

Как правило, не сообщается, как часто следует менять воду в накопительном резервуаре при продолжительных паузах в работе увлажнителей, какой степени очистки от минеральных загрязнителей должна быть вода, не разъясняется, к чему может привести использование воды с большим содержанием солей [8–15].

В подавляющем большинстве бытовых увлажнителей, в которых используется механизм испарения капельной влаги, не предусматривается деминерализация воды. Во время работы таких увлажнителей в воздухе помещения происходит увеличение концентрации сухого аэрозоля, получающегося при испарении водного аэрозоля во время его гравитационного падения. При характерной для бытовых увлажнителей производительности испарения 300–500 г воды в час даже в случае использования обычной «мягкой» водопроводной воды с относительно небольшим содержанием солей (100–200 мг/л) интенсивность насыщения воздуха помещения сухим аэрозолем составляет 30–100 мг в час. Таким образом, в помещении объёмом 30–100 м³, на которые рассчитаны такие увлажнители, концентрация аэрозольного загрязнения только за 1 час работы такого увлажнителя увеличивается примерно на 1 мг/м³, что существенно превышает усреднённую максимально допустимую разовую концентрацию аэрозолей для офисных и жилых помещений 0,1 мг/м³. Данная величина аэрозольной загрязнённости воздуха 1 мг/м³ крайне отрицательно сказывается на состоянии аэроионного фона: концентрация лёгких аэроионов в помещении в данном случае падает практически до нуля, при этом возрастает концентрация тяжёлых аэроионов.

При использовании относительно «жёсткой» воды, характерной, например, для центральных регионов России, с большим содержанием минеральных солей на уровне 1–10 г/л концентрация аэрозольного загрязнения при работе такого увлажнителя многократно превышает все допустимые концентрации по аэрозольной загрязнённости.

Особо следует отметить, что высушенный солевой аэрозоль является вредным для здоровья сильным аллергеном.

В случае испарения деминерализованной воды содержание высушенного остатка несколько ниже. Однако повышение микробиологической обсеменённости воды происходит в деминерализованной воде гораздо более быстрыми темпами, чем в водопроводной воде, содержащей консерванты. Поэтому содержание микроорганизмов, поступающих с испаряемой водой в воздух помещения, в том числе патогенных, в некоторых случаях может достигать критических концентраций. К сожалению, в инструкциях по эксплуатации бытовых увлажнителей во многих случаях не упоминаются перечисленные негативные последствия работы увлажнителей и не даётся чётких рекомендаций по их возможному учёту.

Теперь попытаемся разобраться с ионизаторами.

В паспорте устройств, предназначенных для ионизации, кроме общих выражений рекламного характера типа «нормализация аэроионного состава», «оживление воздуха», а также значений потребляемой мощности, габаритов, массы и т. д., в лучшем случае приводится лишь следующая информация:

- значение концентрации аэроионов отрицательной или отрицательной и положительной полярности на некотором фиксированном расстоянии, ионов/см³;
- объём обслуживаемого помещения, м³.

Большинство представленных на российском рынке ионизаторов генерируют только аэроионы отрицательной полярности, т. к. предполагается, что отрицательные аэроионы более полезны для человека, чем положительные аэроионы. Однако в естественных, природных условиях в воздухе присутствуют ионы обеих полярностей примерно в одинаковых концентрациях. Именно биполярная, а не униполярная ионизация воздуха в помещении необходима во избежание накопления униполярных электростатических зарядов, не только окончательно деформирующих аэроионный фон в воздухе помещения, но и приводящих к возникновению устойчивых электростатических полей, оказывающих негативное влияние на организм человека.

«Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений» (СанПиН 2.2.4.1294-03), введённые в Российской Федерации в 2003 году, в отличие от действовавших с 1980 года «Санитарно-гигиенических норм допустимых уровней



ионизации воздуха производственных и общественных помещений» (СГН 2152-80), хотя имеют определённые преимущества, однако, по существу, остаются недоработанными.

Новые требования к нормируемым показателям ионизации воздуха приведены в табл. 1.

Таблица 1

Новые нормируемые показатели ионизации воздуха

Нормируемые показатели	Концентрация аэроионов ρ , ион/см ³		Коэффициент униполярности Y
	положительной полярности	отрицательной полярности	
Минимально допустимые значения	$\rho^+ \geq 400$	$\rho^- > 600$	$0,4 \leq Y < 1,0$
Максимально допустимые значения	$\rho^+ < 50\,000$	$\rho^- \leq 50\,000$	

Для сравнения ниже приведены аналогичные критерии предыдущих санитарных норм (СГН 2152-80) (см. табл. 2).

Таблица 2

Старые нормируемые показатели ионизации воздуха

Уровни	Количество ионов в 1 см ³ воздуха		Показатель полярности P
	n^+	n^-	
Минимально необходимый уровень	400	600	-0,2
Оптимальный уровень	1500-3000	3000-5000	от -0,5 до 0
Максимально допустимый уровень	50 000	50 000	от -0,5 до +0,5

Для ионов обеих полярностей максимально и минимально допустимые уровни ионизации не изменились. Оптимальный уровень, который являлся определённым ориентиром для нормализации аэроионного режима помещений, отсутствует в новых требованиях. Значительно упростилась система расчёта соотношений количества аэроионов разного знака заряда. Коэффициент полярности заменён в СанПиН 2.2.4.1294-03 на коэффициент униполярности, который представляет собой простое отношение числа положительных ионов к числу отрицательных. Диапазон Y от 0,4 до 1,0 означает, что отрицательных ионов в помещении должно быть больше, чем положительных, при этом данная разница может достигать 2,5 крат. Более того, п. 2.6 СанПиН 2.2.4.1294-03 разрешает «...отсутствие аэроионов положительной полярности ... на рабочих местах, где имеются источники электростатических полей», т.е. например, у мониторов персональных компьютеров. Таким образом, отпадает необходимость расчёта коэффициентов соотношения для персонала, работающего с компьютерами, на данных рабочих местах основное внимание требуется уделять определению концентрации отрицательных ионов.

Однако в природе униполярности не существует, воздух всегда содержит ионы обоих знаков заряда примерно в равных пропорциях, и человек эволюционно адаптирован к вдыханию биополярно заряженного воздуха.

«Чистый» воздух насыщен лёгкими ионами кислорода каждого знака в концентрациях 1000-5000 ионов/см³ (для морского и лесного воздуха), 5000-10 000 ионов/см³ (для воздуха горных курортов).

В устройствах искусственной ионизации поток насыщенного ионами воздуха имеет достаточно узкую диаграмму направленности. По мере удаления от ионизатора концентрация ионов снижается довольно быстро. Удаление от ионизатора, при котором концентрация ионов соответствует оптимальным («природным») значениям, составляет 0,5-1,5 м. Для получения максимальной пользы от ионизатора человек должен находиться в достаточно ограниченной области поме-

щения, по существу, быть в стеснённом статичном положении, что существенно ограничивает комфортность условий пребывания в помещении.

Строго говоря, человек может периодически появляться в области «оптимального ионного» воздействия, однако эффективность ионного воздействия на организм при этом не поддаётся контролю и существенно снижается.

Чрезвычайно важным моментом работы ионизаторов является тот факт, что функционирование ионизаторов в присутствии человека должно осуществляться только в чистом воздухе, свободном от газовых и аэрозольных загрязнений. В противном случае активные формы кислорода, к которым относятся лёгкие аэроионы кислорода, активизируя дыхательные процессы в организме, способствуют усилению проникновения в организм вышеуказанных загрязнителей, что неизменно неблагоприятно сказывается на самочувствии человека. В связи с этим вызывают, мягко говоря, недоумение рекомендации некоторых производителей ионизаторов очищать воздух помещения, например от табачного дыма, путём ионизации воздуха, заряжая дымные аэрозоли с последующим их осаждением на поверхности помещения. При этом, как правило, в инструкции по эксплуатации не отмечается, что находиться рядом с работающим ионизатором вредно.

Понятие «объём обслуживаемого помещения», как правило, плохо применимо к ионизаторам, т. к. область помещения, заполненная насыщенным ионами воздухом, ограничивается, как уже отмечалось, весьма узкой диаграммой направленности распространения ионизованного воздуха.

О функции очистки воздуха. Обычно в паспорте на устройство очистки воздуха декларируются:

- эффективность очистки воздуха, например 90-98 %;
- дисперсность задерживаемых частиц, например 0,1-10 мкм;
- объём обслуживаемого помещения.

К сожалению, не указывается, что высокая степень очистки достигается по массовому показателю, при этом умалчивается, что наиболее «вредные» фракции загрязнителей с дисперсностью 0,3-1 мкм имеют гораздо более низкую эффективность удержания на фильтрах. Для повышения эффективности очистки воздуха и снижения вероятности «залповых» выбросов из фильтрующих элементов, целесообразно использовать так называемые «мокрые» фильтры.

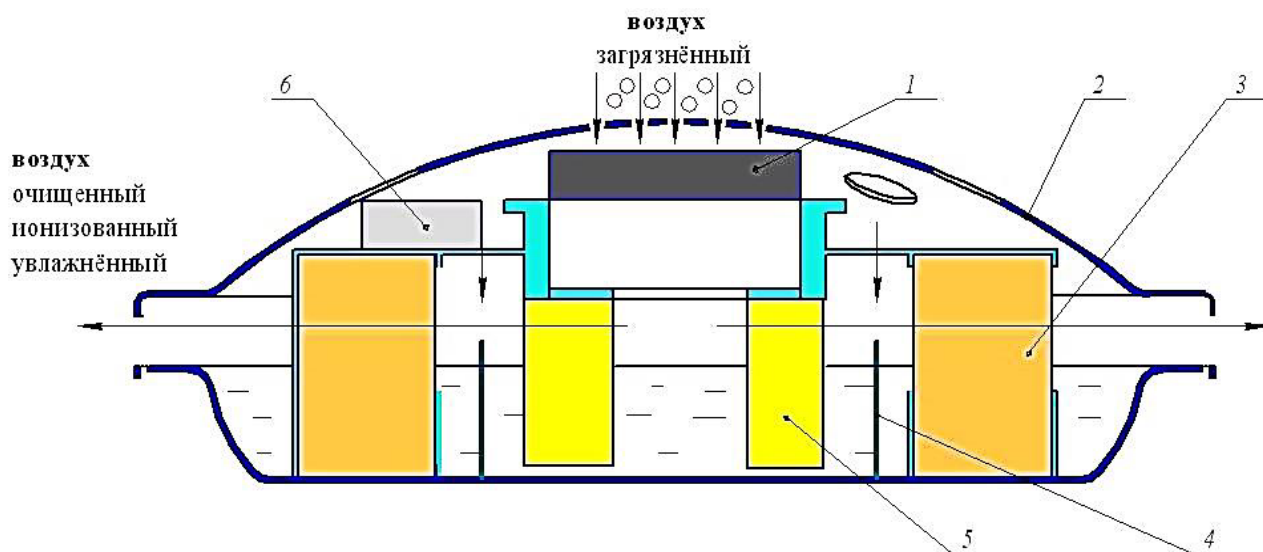
Проанализировав ситуацию на рынке и отметив некоторые общие «слабые» места конкурентов, сформулируем технико-гигиенические требования к «идеальному» устройству (см. рис. 1) с заявленными функциями *очистки, увлажнения и ионизации воздуха*. Итак:

1. Ионизацию необходимо выполнять только в «чистом» воздухе. Так как основным загрязнителем в производственных и служебных помещениях на транспорте являются аэрозольные загрязнители, в частности табачный дым, в состав устройства требуется ввести датчик аэрозольного загрязнения, не препятствующий включению очистителя воздуха, но не допускающий включения ионизатора до момента очистки воздуха от аэрозолей как минимум до уровня ПДК. Таким образом, функции очистки воздуха и ионизации воздуха должны быть автономны.

2. Ионизация воздуха должна быть биполярной.

3. Область «оптимального ионного» воздействия должна быть максимально большой и удобной для потребителя. Для получения максимальной пользы от работы ионизатора устройство ионизации должно быть снабжено датчиком, определяющим расстояние от потребителя до ионизатора. По команде датчика должна изменяться интенсивность генерации ионов таким образом, чтобы в зоне дыхания потребителя концентрация аэроионов соответствовала оптимальным значениям.

4. Процесс увлажнения воздуха должен быть экологически чистым, т. е. увлажнение не должно приводить к дополнительному аэрозольному загрязнению.



1 – вентилятор, 2 – корпус, 3 – пластины увлажнителя, 4 – узел биполярной ионизации, 5 – «мокрый» фильтр, 6 – блок электроники

Рис. 1. Функциональная схема устройства

Реализовать указанные требования в опытном образце устройства, сочетающего в себе функции «мокрой» очистки воздуха от аэрозольных загрязнителей, экологически чистого увлажнения и биполярной ионизации, удалось научным сотрудникам двух петербургских университетов: университета путей сообщения и политехнического университета.

Данное устройство «Очиститель – увлажнитель – ионизатор» относится к классу бытовых устройств кондиционирования воздуха и может быть использовано для повышения качества воздуха в производственных помещениях и офисах, а также в гермозонах, кабинах и пассажирских салонах транспортных средств и т. д.

Основные принципы, положенные в основу работы устройства:

- для увлажнения воздуха используется экологически чистый метод плёночного (холодного) испарения воды, при котором съём влаги с испарительных пластин осуществляется на молекулярном уровне, при этом испаряемая влага одновременно очищается от солевых загрязнений за счёт осмотической очистки;
- фильтрация аэрозольных загрязнителей осуществляется с помощью «мокрых» фильтров;
- очищенный увлажнённый воздух заряжается ионами разной полярности в концентрациях, рекомендованных санитарными нормами;
- раздача очищенного увлажнённого ионизованного воздуха в помещение осуществляется равномерно во все направления, обеспечивая подвижность очищенного, увлажнённого и ионизованного воздуха на уровне оптимальных значений.

Состав, назначение и основные технические характеристики элементов и узлов устройства. Малошумный вентилятор осевого типа обеспечивает расход воздуха через устройство около $100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Увлажнитель повышает относительную влажность в воздухе помещения с производительностью 250-400 г/ч, удельный съём влаги зависит от скорости движения воздуха вдоль испарительных пластин и составляет от 5 г/дм^2 в час при скорости воздуха 0,5 м/с до 10 г/дм^2 в час при скорости воздуха 1,5 м/с.

Система очистки воздуха от аэрозолей снижает массовую концентрацию аэрозольных загрязнителей на выходе устройства на 90-98 %.



Рис. 2. Генератор биполярных ионов

Генератор биполярных ионов (см. рис. 2) обеспечивает концентрацию отрицательных и положительных аэроионов кислорода в пределах наиболее оптимальных значений 1000-3000 ионов в 1 см^3 на различных расстояниях от устройства. Максимальное расстояние от ионизатора, при котором обеспечиваются оптимальные значения концентрации аэроионов, составляет 2,5 м. При наличии в помещении техногенных объектов (мониторов телевизоров и ПК, синтетических покрытий и т.д.), способных образовывать и длительное время сохранять электростатические заряды, искажающие аэроионный фон, устройство генерации биполярных ионов обеспечивает нейтрализацию данных зарядов, снижает уровень сопутствующих им электростатических полей и в конечном итоге корректирует аэроионный фон в помещении.

Блок ионизации и озонирования (см. рис. 3) включается автономно за счёт периодического озонирования воздуха с концентрацией озона не более 10 мкг/км^2 (0,1 ПДК) и придаёт воздуху ощущение свежести.

Система раздачи воздуха в помещение осуществляет равномерное по всем направлениям распространение высоко кондиционного очищенного увлажнённого ионизованного воздуха. Скорость выхода воздуха из устройства не превышает 0,5 м/с.

Блок автоматики и управления обеспечивает контроль наличия и оптимального уровня воды в накопительном резервуаре объёмом 3 л.



Рис. 3. Блок ионизации и озонирования

Энергопотребление устройством – не более 25 Вт.

Отличительные особенности и достоинства устройства:

- экономичный режим получения кондиционного воздуха;
- отсутствие расходных материалов, требующих периодической замены;
- использование экологически безопасного увлажнителя плёночного типа, не требующего применения сложных (ультразвуковых или механических) технологий;



- наличие принципиальной возможности варьировать скорость плёночного испарения за счёт изменения поверхностного натяжения вследствие контакта аэроионных потоков с испарительными пластинами;
- возможность использования ароматизаторов;
- значения концентраций отрицательных и положительных аэроионов и их соотношение в потоке кондиционного воздуха соответствуют значениям, рекомендованным санитарными нормами;
- обеспечение оптимальной (с точки зрения комфортности) скорости воздуха на выходе устройств;
- распространение кондиционного воздуха осуществляется во все направления равномерно.

Заключение. Для обеспечения комфортного микроклимата в производственных и офисных помещениях на транспорте необходимо одновременно использовать экологически чистый метод плёночного (холодного) испарения воды, фильтрацию аэрозольных загрязнителей, осуществляемую с помощью «мокрых» фильтров, насыщение очищенного увлажнённого воздуха ионами разной полярности в концентрациях, рекомендованных санитарными нормами. Необходимо использовать датчики, реагирующие на аэрозольные загрязнения и предназначенные для запрещения включения ионизатора вплоть до снижения аэрозольного загрязнения до уровня ПДК, а также датчики, определяющие расстояние от пользователя до устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Применение озона в технологиях санитарной обработки / К. К. Ким, Г. Л. Спичкин, Е. Я. Быстров // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 8. – С. 54-55.
2. Иванов, С. Н. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы / С. Н. Иванов, К. К. Ким, В. М. Кузьмин. – СПб.: ООО «ОМ-Пресс», 2009. – 348 с.
3. Анализ влияния конструкционных факторов на надёжность герметичных электромеханических преобразователей / Д. А. Голоколос [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1 (16). – С. 29-34.
4. Антистрессорные реакции и активационная терапия / Л. Х. Гаркави [и др.]. – Екатеринбург: РИА «Филантроп», 2002. – 196 с.
5. Ксендзов, В. О. Релаксация как метод реабилитации спортсменов / В. О. Ксендзов // Теория и практика физической культуры. – 2005. – № 12. – С. 33.
6. Душков, Б. А. Энциклопедический словарь: психология труда, управления, инженерная психология и эргономика / Б. А. Душков, А. В. Королёв, Б. А. Смирнов. – М.: Академический проект; Деловая книга, 2005. – 848 с.
7. Парцерняк, С. А. Стресс, вегетозы, психосоматика / С. А. Парцерняк. – СПб.: А.В.К., 2002. – 382 с.
8. Шилов, Ю. И. Модуляция пропранололом стресс-индуцированных изменений иммунных реакций / Ю. И. Шилов, С. В. Гейн // V Российский национальный конгресс «Человек и лекарство». – М.: РЦ Фармдинфо, 1998. – С. 330.
9. Карандашов, В. И. Фототерапия / В. И. Карандашов, Е. Б. Петухов, В. С. Зродников; под ред. Н. Р. Палеева. – М.: Медицина, 2001. – 388 с.
10. Использование природных факторов для реабилитации условно здоровых людей / К. К. Ким [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2019. – № 3. – С. 15-20.
11. Ким, К. К. Использование озонированных растворов для решения задач дезинфекции в системе РЖД / К. К. Ким, Г. Л. Спичкин, Е. К. Чистов // Материалы V международной научно-практической конференции «Техносферная и экологическая безопасность на транспорте. ТЭБТРАНС-2016», Санкт-Петербург, 26-28 сентября 2016 г. – СПб.: ПГУПС, 2016. – С. 81-87.
12. Использование природных факторов для задач релаксации / К. К. Ким [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 5. – С. 9-14.
13. Вашков, В. И. Антимикробные средства и методы дезинфекции при инфекционных заболеваниях / В. И. Вашков. – М.: Медицина, 1977. – 296 с.
14. Russel A. D. Fundamental Aspects of Microbial Resistance to Chemical and Physical Agents / Sterilization of Medical Products. – Canada, Johnson & Johnson, 1991. – 426 p.
15. Вашков, В. И. Средства и методы стерилизации, применяемые в медицине / А. И. Вашков. – М.: Медицина, 1973. – 368 с.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

Сохацкая Д. Г., Ефимова К. С.
D. G. Sokhatskaya, K. S. Efimova

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННОГО ОБЛИКА ПЕШЕХОДНОЙ УЛИЦЫ

PRINCIPLES OF ARCHITECTURAL AND ARTISTIC APPEARANCE ORGANIZATION OF A PEDESTRIAN STREET

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.

Daria G. Sokhatskaya – Associate Professor, Design of Architectural Environment 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.

Ефимова Ксения Сергеевна – магистр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(924)312-66-99. E-mail: Glazatkin1@yandex.ru.

Ksenia S. Efimova – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(924)312-66-99. E-mail: Glazatkin1@yandex.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются основные факторы влияния среды на архитектурно-художественный облик города, выявляются общие принципы организации высококомфортной предметно-пространственной среды пешеходной улицы. Общество и правительство придавали дизайну улицы большое значение из-за высокого роста населения и городских территорий, вызванного процессом городского строительства. В этой статье проводится всестороннее исследование развития дизайна городских улиц и описываются методы организации архитектурно-художественного облика пешеходной среды, на основе которых предлагается комплексный подход к проектированию улиц в будущем. Приведено 6 принципов организации при проектировании архитектурно-художественного облика пешеходной улицы, таких как дихотомический облик, интерьерность, фирменный стиль, безбарьерность и мобильность среды, а также принцип визуализации. Все эти принципы в той или иной степени используются при проектировании высококомфортных городских пространств XXI века.

Summary. The article examines main factors of influence in the environment on the architectural and artistic appearance of the city and identifies general principles of the organization of a high-quality subject-spatial environment of a pedestrian street. The design of the street was given great importance by the society and the government due to the large population growth and urban areas caused by the process of urban construction. This article provides a comprehensive study of the development of urban street design and describes methods of organizing the architectural and artistic appearance of the pedestrian environment, based on which an integrated approach to street design in the future is proposed. There are 6 principles of organization in the design of the architectural and artistic appearance of a pedestrian street, such as dichotomous appearance, interior design, firm style, barrier-free and mobility of the environment, as well as the principle of visualization. All these principles are more or less used in the design of high-comfort urban spaces of the 21st century.

Ключевые слова: проектирование, микрорайон, пешеходная улица, благоустройство, общественное пространство, застройка, безопасность.

Key words: design, microdistrict, pedestrian street, landscaping, public space, building, security.

УДК 72:711.4

Общий архитектурно-художественный облик города формируется в результате сочетания, взаимного влияния и взаимного дополнения всех компонентов развития и жизнедеятельности городского пространства – от организации планировочной структуры, архитектурных решений, зданий, инженерных и транспортных сооружений до эмоционального восприятия элементов средового дизайна и художественного оформления (см. рис. 1).

Качество самой среды, её комфорт, современное благоустройство, доступность для всех групп населения, безопасность и экологическая сбалансированность – всё это оказывает непосредственное влияние на формирование гостеприимного, привлекательного, яркого, самобытного облика города и городских улиц. Также особое значение имеет и художественное наполнение.

Различные объекты дизайна зачастую становились деталью архитектурного фасада, в то же время являясь компонентом предметно-пространственного ансамбля улицы. Таким образом, эти видоизменённые объекты позволяют включать архитектурный фасад в общий художественно-дизайнерский образ улицы [2].

К примеру, элементы среды или малые архитектурные формы (фонари, остановочные пункты, кондиционеры, клумбы и т.п.) на сегодняшний день наделены функцией, которая подразумевает изменение расположения по вертикали и горизонтали, а также несут декоративную функцию (см. рис. 2).

Кроме этого, при проектировании и формировании комфортной пешеходной среды в большинстве случаев используются принципы и методы промышленного дизайна. Основой в данном проектировании является эргономика. Обычно уличная мебель, спроектированная с учётом данного подхода, ничем не уступает аналогичным интерьерным решениям.



Рис. 1. Пример восприятия общего архитектурно-художественного облика городской улицы



Рис. 2. Пример влияния фасадных объектов (фонари и конструкция защиты от погодных условий) на восприятие облика пешеходной среды

Выбор цветовых решений, форм и шрифтов, а также графических знаков при проектировании визуальных коммуникационных систем в городе осуществлялся также на основе принципов эргономики.

Конструкции различного назначения (рекламные стенды, вывески, навигация и др.), которые размещают на фасадах зданий, не только влияют на эксплуатацию фасада, но и формируют его внешний облик и общее восприятие городской среды (см. рис. 3).



Рис. 3. Пример схемы размещения информационных конструкций на фасадах зданий

Для создания благоприятной визуальной среды с эстетической точки зрения при проектировании рекламно-информационных продуктов дизайнеры должны следовать соответствующим документам, которые в данном случае формируют муниципальные власти. В рамках подготовки и

(или) действия нормативно-правового акта утверждаются схемы размещения конструкций на фасадах зданий [5].

В современных городских условиях отчётливо читается дефицит ландшафта. Так появились новые формы компактного расположения в пешеходной среде озеленения и водных устройств, такие как вазоны, поднятые над пешеходами, или вода, стекающая по стене или ступеням (см. рис. 4).

Важными факторами влияния на комфортное и достоверное восприятие городского пространства в целом и его отдельных объектов являются освещение и времена года (см. рис. 5). Так, одна и та же среда под разным освещением может восприниматься иначе. А то пространство, что зимой может быть катком, летом может являться небольшим фонтаном.



Рис. 4. Пример размещения вазонов в пешеходной среде



Рис. 5. Пример влияния освещения на восприятие городской среды

Характерными особенностями художественного, стилового формирования архитектурного пространства с позиции рассмотрения пешеходной улицы являются:

- объединение объектов разных стилей как отдельных элементов, так и архитектурных комплексов в целостный ансамбль в одном стилевом образе;
- локальный архитектурно-художественный стиль, подчёркивающий выразительность и индивидуальность определённой городской среды, носит субъективный характер.

Метод фирменных стилей представляется неким «коннектором», который объединяет современные тенденции с исторически сложившимся обликом городского ансамбля, тем самым увеличивая востребованность таких подходов при дальнейшем развитии городского облика [3].

Принцип «визуализации» функциональной и композиционной структуры заключается в том, что на хаотичное, на первый взгляд, перемещение пешеходов можно влиять путём визуальных коммуникаций, останавливая их перед объектами, которые носят исторический или художественный характер или ускоряя в зонах повышенной опасности, например, светофор на пешеходном переходе.

Суть концепции «интерьерности» состоит в том, что на смену классическим громоздким архитектурным формам всё чаще приходят современные объекты, характерные для интерьерных решений, обладающие повышенной эргономичностью. Таким образом, концепция представляет собой комплекс принципов, с помощью которых можно проектировать различные сценарии городского пространства. Рассмотрим некоторые из них.

Принцип «мобильности и периодической обновляемости» заключается в том, что при проектировании городских улиц используются простые в монтаже модульные элементы, которые позволяют оперативно видоизменять городской облик в зависимости от потребностей. Таким образом, городская среда превращается в постоянно меняющийся «организм».

Принцип «безбарьерности» предметно-пространственной среды улицы. Вся городская среда в эру гуманизма должна быть доступна любой группе населения, будь то маломобильная группа, группа детей дошкольного возраста или группа людей пожилого возраста (см. рис. 6).

Принцип «фирменного стиля» архитектурного ансамбля. Выбор стилистики архитектурного объёма при проектировании может провоцировать передачу выбранного стиля соседствующим



Рис. 6. Пример безбарьерной среды для всех групп населения

объектам. В таких случаях можно говорить об архитектурно-художественном ансамбле зданий и сооружений. При этом архитектурные объёмы различные по габаритам, но целостные по стилю могут стать новыми доминантами среди уже сложившейся застройки.

Принцип «дихотомического облика». Облик пешеходной улицы отличается в дневное и ночное время, это раскрывает новые возможности для дизайнера при проектировании городской среды.

Принцип «мизансцен». В основе этого принципа лежит идея театра, где организация пространства ведётся под задачи разработанного сценария [1, 4].

Таким образом, для создания высококомфортных городских пространств закладывается шесть принципов организации архитектурно-художественного облика среды, таких как «интерьерность», «дихотомический облик»,

«фирменный стиль», «безбарьерность» и «мобильность» среды, а также метод «визуализации». Все эти принципы необходимо учитывать при проектировании городских пешеходных улиц для создания эстетически привлекательного, комфортного и доступного пространства для всех жителей и гостей города.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, С. М. Дизайн пешеходной улицы: учебное пособие для студентов специальности «Дизайн архитектурной среды» // С. М. Михайлов, М. И. Белов, А. С. Михайлова. – Казань: Дизайн-квартал, 2012. – 150 с.
2. Дембич, Н. Д. Локальное художественное стилирование как проектный метод в дизайне города: дис. ... канд. искусствоведения: 17.00.06 / Дембич Наталья Дмитриевна. – М., 2013. – 274 с.
3. Дизайн архитектурной среды: учебник для вузов / Г. Б. Минервин [и др.]. – М.: Архитектура-С, 2006. – 504 с.
4. Михайлов, С. М. Дизайн современного города: комплексная организация предметно-пространственной среды: дис. ... д-ра искусствоведения: 17.00.06 // Михайлов Сергей Михайлович. – М., 2011. – 361 с.
5. СП 82.13330.2016. Благоустройство территорий. Актуализированная редакция. – Взамен СНиП III-10-75; введ. 16-12-2016 // Техэксперт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054208> (дата обращения: 07.09.2021). – Текст: электронный.
6. Сохацкая, Д. Г. Символический код как компонент дизайн-кода культурного пространства города Комсомольска-на-Амуре / Д. Г. Сохацкая // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2020. – № VIII-2 (48). – С. 52-57.
7. Димитриади, Е. М. Анализ архитектурно-колористической образности городов Дальнего Востока / Е. М. Димитриади // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № II-2 (50). – С. 4-10.
8. Сохацкая, Д. Г. Предметно-функциональный код как компонент дизайн-кода / Д. Г. Сохацкая // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2019. – № IV-2 (40). – С. 62-66.
9. Сохацкая, Д. Г. Влияние политической идеологии на предметно-пространственную среду российского города (на примере г. Комсомольска-на-Амуре) / Д. Г. Сохацкая, Т. М. Михайлова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № VIII-2 (56). – С. 60-65.
10. Галкина, Е. Г. Анализ успешного опыта организации современных жилых кварталов в России / Е. Г. Галкина, К. С. Зубкова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 96-102.
11. Гринкруг, Н. В. Современные тенденции в панельном домостроении / Н. В. Гринкруг, Т. М. Михайлова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 110-115.

Гринкруг Н. В., Михайлова Т. М.
ГЕОПЛАСТИКА КАК СПОСОБ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТСКИХ ПЛОЩАДОК
(НА ПРИМЕРЕ Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ)

Гринкруг Н. В., Михайлова Т. М.
N. V. Grinkrug, T. M. Mikhailova

**ГЕОПЛАСТИКА КАК СПОСОБ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТСКИХ ПЛОЩАДОК
(НА ПРИМЕРЕ Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ)**

**GEOPLASTICS AS A WAY OF DESIGNING PLAYGROUNDS (ON THE EXAMPLE
OF KOMSOMOLSK-ON-AMUR)**

Гринкруг Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: das@knastu.ru.

Natalia V. Grinkrug – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str, 27. E-mail: das@knastu.ru.

Михайлова Тамара Михайловна – студентка кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)177-15-89. E-mail: m.miesha97@mail.ru.

Tamara M. Mikhailova – Student, Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str, 27; тел. 8(914)177-15-89. E-mail: m.miesha97@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены современные тенденции в геопластике детских площадок, конструкции, материалы. Приводятся сравнение и анализ дворовых пространств и детских площадок на примере постсоветского города Комсомольска-на-Амуре. Сущность проблемы, приведённой в статье, сводится к тому, что используемые материалы и методы сварки постсоветских игровых элементов во дворах устарели и на данный момент существуют более экологичные, удобные и, главное, безопасные материалы для детских площадок. Основной целью и задачей является разбор ранее используемых методов сборки конструкций малых архитектурных форм (МАФ) и изготовление современных детских игровых элементов с применением SBR (предварительно окрашенной) и ЭПДМ-крошки. Также не были оставлены без внимания высадки деревьев и кустов с учётом рельефа местности и погодных условий.

Summary. The article considers current trends in the geoplastics of playgrounds, structures and materials. The comparison and analysis of yard spaces and playgrounds is given on the example of the post-Soviet city of Komsomolsk-on-Amur. The essence of the problem presented in the article boils down to the fact that the materials and methods used for welding post-Soviet game elements in courtyards are outdated, and at the moment there are more environmentally friendly, convenient, and most importantly safe materials for playgrounds. The main goal and objective is to analyze the previously used methods of assembling MAF structures and manufacturing modern children's game elements using SBR (pre-painted) and EPDM crumbs. Planting of trees and bushes was not ignored, taking into account the terrain and weather conditions.

Ключевые слова: геопластика, детская площадка, рельеф, МАФ.

Key words: geoplastics, playground, relief, MAF.

УДК 712

Геопластика – это один из способов преобразования, создания или изменения рельефа пластикой с применением различных материалов и форм [1]. Этот метод используется в архитектуре при проектировании общественных пространств, рекреационных территорий и в тех случаях, где требуется преобразить существующий рельеф территории.

Специалисты в области геопластики имеют возможность изменить её формы и рельефы. Искусственно созданные холмы, горы, валы, террасы, насыпи, лестницы и стенки должны гармонизировать с окружающей природой. Цели преобразования и благоустройства могут быть эстетиче-

скими (разрушение рельефа из-за его монотонности или погружение в природу) и утилитарными (создать иллюзию «скрытости» здания, хозяйственной постройки и т. д.). Применение геопластики может быть различным: парки, бульвары и скверы, остановочные пункты, а также дворовые пространства, одним из элементов которых являются детские площадки.

При анализе дворовых пространств следует отметить, что изменение рельефа и организация дворового пространства с помощью геопластики имеют влияние на горожан и детей, организующих свой досуг на данной территории. Архитектурная среда дворового пространства становится более гибкой в тех случаях, когда имеет ряд характеристик, приближенных к природным, естественным. В такой среде ребёнок развивается интеллектуально и эмоционально. Интерес, который вызывает у ребёнка гармонично организованная окружающая среда, позволяет развивать физический потенциал.

Типичные городские площадки можно рассмотреть на примере постсоветского города Комсомольска-на-Амуре. Советские дворы представляют собой зелёную зону (пустырь) с элементами среды, созданными из металла, скамьями для пенсионеров, беседками и стоянками для автомобилей. Подробнее о благоустройстве и организации дворовых пространств г. Комсомольска-на-Амуре можно прочитать в статье Д. Г. Сохацкой и Т. М. Михайловой [2].

В 1990-е годы все дворовые игровые элементы представляли собой конструкции, сваренные из металла и окрашенные в различные цвета, колористика которых осталась до сих пор. Эстетический вид элементов качели представляет собой две вертикальные трубы с плоскостью для катания и не отвечает современным требованиям. Одним из нынешних объектов благоустройства детской площадки является «самодел» – шины от автомобильных колёс. Первый вариант использования данных объектов – прыжки и активная игра. При этом колесо наполовину покрывается грунтом и закрепляется [2]. Второй вариант использования автошин – это «клумба» для цветов [2].

Большое внимание можно уделить использованию внешних стен панельных домов для игры в мяч. Почти каждая площадка не снабжена специализированными устройствами для игры с мячом [4]. Поэтому важным этапом в проектировании детской площадки является функциональное зонирование, которое обеспечивает распределение зон тихого и активного отдыха.

Одним из запоминающихся элементов детской площадки постсоветского города являются уменьшенные копии объектов, символизирующих советские достижения в науке. К примеру, игровой элемент «Ракета». Эта форма играла декоративную роль. В некоторых случаях «Ракета» имела игровые функции. К типовым объектам советской детской площадки можно отнести игровой элемент «Паутинка». Этот элемент представляет собой полусферу из пересечённых между собой металлических прутьев, напоминающих паутину. Достоинством игрового элемента «Паутинка» являлось развитие детского воображения. Она была сварена из труб, так же как и остальные игровые элементы на детских площадках в постсоветских городах.

Конструкции

На сегодняшний день дворовое пространство и его элементы претерпевают отрицательные изменения. Материалы, внешний вид и функциональность не отвечают современным требованиям потребителя (см. рис. 1). К основным характеристикам конструкций, состоящих из железа и бетона, можно отнести: опасность игровых элементов; бетонные основания, торчащие из земли, которые также являются опасными; ржавое железо; деформированные развалины и т. п. [2].

Обратим внимание на конструкцию игрового элемента «Карусель». Предпочитают строить дисковые карусели. Выбор обуславливается низкой стоимостью и скоростью выполнения работ [2].

Как правило, перед строительством делают чертежи, которые отражают весь спектр элементов, играющих большую роль в организации пространства детской площадки. Такие чертежи показывают размеры и высоты объектов и аттракционов. Для устройства детской карусели необходимы следующие материалы: бетон, подшипники, труба с круглым сечением; прямоугольные трубы, шпильки, отрезки влагостойкой фанеры, полоса из стали и втулки (центральная и стопорная).

При сборке элемента поворотной площадки необходим узел вращения, полоса из стали, крышка и фанерный материал (см. рис. 2).



Рис. 1. Пример советской металлической конструкции, игровой элемент

Узел вращения проектируется из трубы, которая становится подшипниковым корпусом прямоугольной трубки с параметрами, и ручки. Данные детали образуют целостную конструкцию с помощью сварки (см. рис. 3).

Современные площадки с применением геопластики, в отличие от типовых постсоветских площадок, оказываются более безопасными. Они не предполагают контакта играющих детей с острыми камнями, песком и ржавым металлом. Их функциональность менее широка и в первую очередь заключается в рельефности и сюжетности. Важно отметить, что основная задача – предоставить городскому ребёнку возможность набегаться по рельефной местности, развить свои способности к воображению [3].

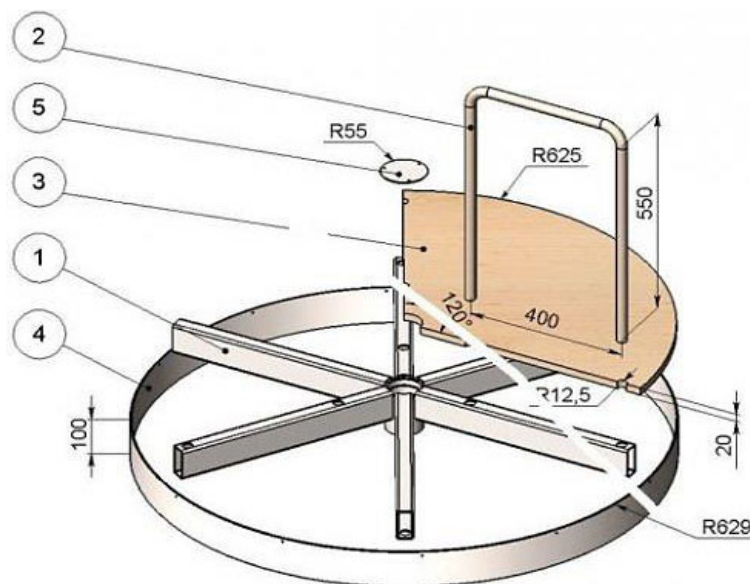


Рис. 2. Структура элемента детской площадки: 1 – узел вращения, 2 – ручка, 3 – сектор напольного покрытия, 4 – стальная полоса, 5 – крышка

Наиболее распространены игровые элементы площадки (холмы) с использованием SBR-крошки (предварительно окрашенной) и ЭПДМ-крошки. SBR-крошка – это техническая резина общего назначения. ЭПДМ-крошка – это смесь каучука, наполнителей, различных добавок и пигмента, разработанная на базе эластомеров. Отличия ЭПДМ-крошки от резиновой SBR:

- гранулы ЭПДМ не содержат токсических веществ, именно это позволяет использовать такое покрытия в местах скопления детей;

- четверть состава ЭПДМ – натуральный каучук;
- очень широкий спектр цветовых решений, что позволяет сделать покрытие ярким, красочным, индивидуальным;
- ЭПДМ имеет диэлектрические характеристики и обладает хорошей циркуляцией воздуха;
- ЭПДМ-крошка эластична и мягка, что позволяет ей быть прочной и долговечной;
- срок эксплуатации каучука ЭПДМ превышает SBR в 5-6 раз;
- ценовой диапазон, у ЭПДМ он в разы выше, чем SBR [5].

Вышеперечисленные материалы при их использовании на детской площадке обеспечивают:

- пропуск воды во время дождя – они быстро становятся сухими;
- быстрое изготовление;
- устойчивость к износу, морозам и лучам солнца, т.е. выгоранию;
- безопасность в использовании;
- любое сочетание цветов.

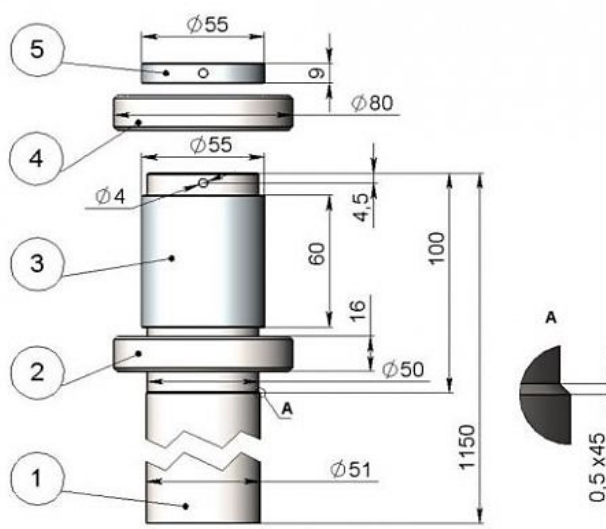


Рис. 3. Структура объекта: 1 – ось, 2 – подшипник нижний, 3 – втулка центральная, 4 – подшипник верхний, 5 – втулка стопорная

Данные приведены ориентировочно, т. к. всё зависит от местных условий и обстоятельств. Также при изменении рельефа детской площадки учитываются эстетические и функциональные требования к объекту.

Стоит напомнить, что в России отсутствует достаточное финансирование для проектирования и реализации современных элементов детской площадки. Но в последнее время появляется тенденция благоустройства дворовых пространств по федеральным программам развития и благоустройства городской среды.

Для устройства материала покрытия проектируемого участка применяют бесшовные безопасные резиновые покрытия. Конструкция холмов для игровой детской площадки (см. рис. 4):

1. лицевой цветной слой толщиной 10 мм;
2. базовый слой толщиной не менее 30 мм в зависимости от высоты элементов детской площадки;
3. резиновый слой минимальной толщины 100 мм;
4. морозостойкий защитный слой толщиной около 150 мм;
5. плотная геотекстильная ткань;
6. основание для дренажа с уклоном около 1,5-2 %.

На данный момент появляется «травмобезопасное» покрытие из резиновой крошки и его производные. Таким образом, дворы у современных многоквартирных домов советского периода

не имеют разнообразия среди игровых элементов и различных конструкций. Требования, как и нормы к проектированию, меняются, появляются новые материалы, что позволяет сделать дворы интереснее, а главное, безопаснее. Иначе говоря, советские дворы представляют собой зелёную зону или пустырь с детской площадкой, местами для сидения пенсионеров, беседкой и стоянкой для автомобилей. Большинство жителей советских дворов сейчас даже и не вспомнят о благоустройстве зон для отдыха и игр, у других же остались негативные впечатления. Можно сказать, что дворы не всегда убирались, детские площадки не восстанавливались, реорганизации территорий практически не было. Несмотря на это советские дворы не исчезли, они также остались между панельными домами, изменилось лишь наполнение – появилось безопасное покрытие на площадках, увеличилось количество парковочных мест для машин. Градостроительство в то время было неоднородным, архитекторы делали ставки на квартальные застройки [3].

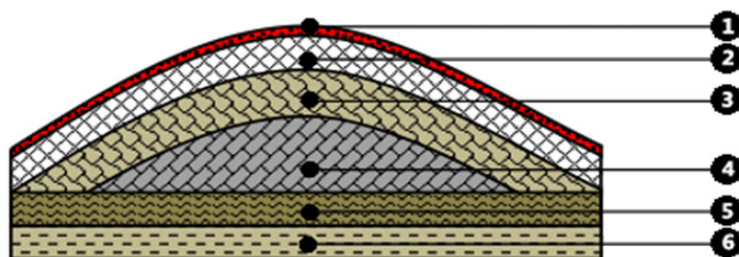


Рис. 4. Моделирование холма из резинового покрытия

Современный двор представляет собой функциональное и эргономичное пространство для различных групп населения. По новым стандартам цель благоустройства – это создание комфортной и безопасной среды, зонирование территорий также изменилось. Дворы стали делиться на секторы, соответствующие разному возрасту и интересам жителей: для пожилых людей – зоны тихого отдыха, для маленьких детей – детские площадки, для детей постарше – площадки для активного отдыха и спортплощадки. Таким образом, дворы теперь рассматриваются как места для взаимодействия детей и их родителей. Сейчас двор – это концепция и функциональность [8].

Добавим, что использование рельефа и «холмов» на детской площадке также обеспечивает сохранение и посадку живых деревьев и кустарников, подходящих для дворовых территорий. Способы благоустройства озеленением могут быть различны, но должны упираться на установленные правила и нормы (см. рис. 5).

Организация и геопластическое решение рельефа определяется концептуальной идеей проекта. Естественный ландшафт или подражание такому решению среды, как в случае с детской площадкой, имитирует природные формы, среду обитания, которая схожа с видами холмов, водоёмов и гор. Этот приём не только применяется и считается традиционным в зарубежных странах, но и отмечается в российском благоустройстве [9].

Наконец, можно отметить, что использование геопластики не ограничивается дворовыми территориями и детскими площадками. В парках, скверах и общественных пространствах, в том числе и зонах частных домов, также используют организацию среды с помощью геопластики. Изменение рельефа или же его сохранение не являются основной задачей геопластики. Задачи и цели могут быть различными, но основными остаются функциональность и эстетичный внешний вид. Дизайнеры и архитекторы прибегают к различным приёмам для того, чтобы выгодно и грамотно обыграть рельеф вместе с естественными неровностями и плоскостями. Геопластика позволяет создать свой особый внешний вид и необычные формы с применением новых различных и безопасных материалов.

В настоящий момент изготовление детских площадок обеспечивает максимальную безопасность для детей, приятный внешний вид, уникальность. Геопластика детской площадки – это искусственное создание рельефа, неровностей и холмов с использованием на них игрового оборудования: различных горок, туннелей и скалодромов. По всей площади игровой зоны наносится мягкое покрытие из резиновой крошки различных цветов и оттенков.

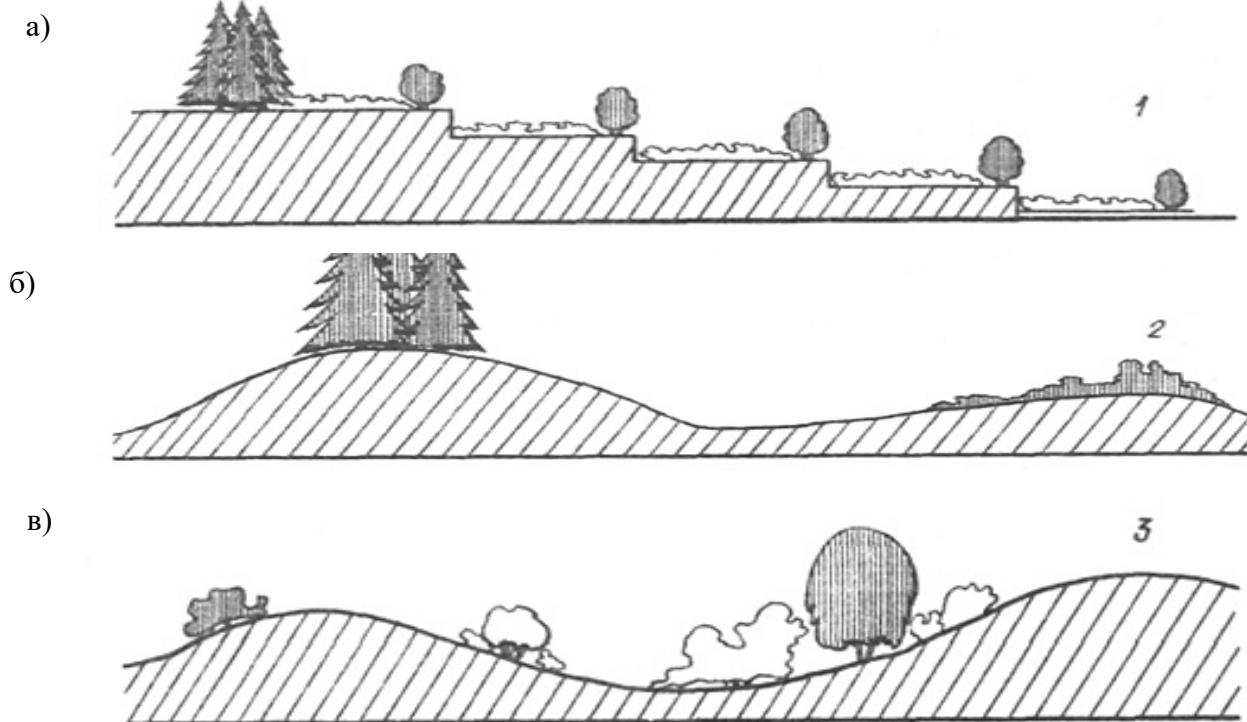


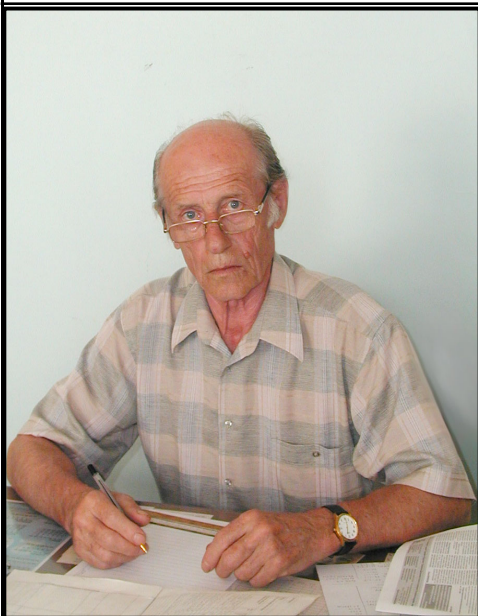
Рис. 5. Акцентирование террас растениями (а), усиление холмистого рельефа группами (б) и приёмы озеленения, нивелирующие рельеф (в)

Постсоветские детские площадки приобретали уникальный вид и разнообразие, но без преобразования любой объект, в том числе и малые архитектурные формы, разрушается и становится неактуальным [10]. Поэтому на сегодняшний день существуют различные инновационные подходы в архитектуре и строительстве, которые позволяют вносить и реализовывать современные архитектурные и дизайнерские решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Детская площадка // Wikipedia.org. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Детская_площадка (дата обращения: 25.09.2021). – Текст: электронный.
2. Сохацкая, Д. Г. Влияние политической идеологии на предметно-пространственную среду российского города (на примере г. Комсомольска-на-Амуре) / Д. Г. Сохацкая, Т. М. Михайлова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № VIII-2 (56). – С. 60-65.
3. Крогиус, В. Р. Город и рельеф / В. Р. Крогиус. – М.: Архитектура и строительство, 1979. – 124 с.
4. Бойченко, А. М. Строительство жилых зданий из крупных панелей. Из опыта Главкиевстроя / А. М. Бойченко. – М.: Опыт жилищного строительства, 1961. – 120 с.
5. Геопластика детских площадок // RUBBER DUST малые архитектурные формы. – URL: <https://www.rdmf.com/geoplastika> (дата обращения: 26.09.2021). – Текст: электронный.
6. Беспалов, С. В. Механизмы позитивного образа России в странах постсоветского пространства / С. В. Беспалов. – М.: Евразийская сеть политических исследований, 2017. – 68 с.
8. Кайдалова, Е. В. Ландшафтная архитектура: конспект лекций / Е. В. Кайдалова. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2019. – 162 с.
9. Ачкасова, В. А. Постсоветский ландшафт 2010-х: зоны интересов и «центр силы» / В. А. Ачкасова. – М.: Управленческое консультирование, 2020. – 70 с.
10. Сохацкая, Д. Г. Традиционные модели описания города / Д. Г. Сохацкая // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2019. – № I-2 (37). – С. 50-53.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ SCIENTIFIC LIFE



13 декабря 2021 г. на 83-м году жизни после тяжёлой болезни ушёл из жизни талантливый учёный и педагог, замечательный руководитель, светлый и добрый человек

БАБЕНКО ЭДУАРД ГАВРИЛОВИЧ (14.08.1939 – 13.12.2021)

Эдуард Гаврилович родился 14 августа 1939 г. в посёлке Серышево Амурской области. В 1967 г. окончил Хабаровский институт инженеров железнодорожного транспорта (в настоящее время – Дальневосточный государственный университет путей сообщения). В том же году начал свою трудовую деятельность в ХаБииЖТ.

В 2002 г. успешно защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук. А в должности профессора работал в университете более 45 лет, из которых 35 – на кафедре «Технология металлов», которую возглавлял с 1980 по 2001 гг. За этот период кафедра занимала лидирую-

щие позиции среди кафедр университета по оснащению учебных лабораторий и научно-исследовательской базы. Это позволило поддерживать на высоком научно-методическом и педагогическом уровне подготовку специалистов для народного хозяйства Дальнего Востока.

Принимал личное участие в доводочных испытаниях магистральных локомотивов 2ТЭ-116 в тяжёлых условиях эксплуатации БАМа и Дальневосточной железной дороги. Являлся разработчиком программ технического обслуживания маневровых тепловозов, эксплуатируемых на Дальнем Востоке. Также был руководителем группы экспертов по расследованию крушений на Дальневосточной железной дороге.

Принимал активное участие в научно-исследовательских работах университета по разработке современных технологий ремонта и восстановления деталей подвижного состава. Поддерживал личные научные контакты с учёными Москвы, Санкт-Петербурга, Сибири, Якутии, Китая и Кореи.

В 2006 г. в составе делегации российских учёных выезжал в КНДР для консультаций по вопросам эксплуатации и ремонта подвижного состава железных дорог.

Долгое время Эдуард Гаврилович работал в составе двух диссертационных советов. Три аспиранта успешно защитили кандидатские диссертации под его руководством. С 2001 г. был зарегистрирован в федеральном реестре экспертов научно-технической сферы Республиканского исследовательского научно-консультационного центра экспертизы ГУ РИНКЦЭ.

Эдуард Гаврилович являлся членом-корреспондентом международной академии минеральных ресурсов, являясь известным учёным в области материаловедения и технологии обработки материалов. Его основные научные интересы были связаны с разработкой и исследованием новых материалов, полученных на основе комплексного использования минерального сырья Дальневосточного региона.

Активная трудовая деятельность профессора Э. Г. Бабенко отмечена следующими наградами: высшей наградой МПС РФ – знаком «Почётному железнодорожнику» в 1989 г., медалью «За трудовую доблесть» в 1971 г.

За большой личный вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов и высокие достижения в научной и педагогической работе профессору Бабенко Эдуарду Гавриловичу в 2010 г. присвоено звание «Почётный работник транспорта России».

Ректорат КНАГУ, сотрудники и работники университета, коллеги и редакция журнала выражают искренние соболезнования родным и близким Эдуарда Гавриловича в связи с тяжёлой утратой.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ SCIENTIFIC LIFE



28 февраля 2022 г. ушёл из жизни выдающийся человек и личность, учёный, доктор технических наук, профессор, ректор КнАГТУ (2006–2014), действительный член Российской инженерной академии, Почётный работник высшего профессионального образования России, Заслуженный работник высшей школы РФ

ШПИЛЕВ АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ (21.01.1949 – 28.02.2022)

Вся жизнь Анатолия Михайловича была посвящена науке и высшему образованию. Трудовую жизнь начал в 1966 г. рабочим на заводе ПТО. В 1972 г. окончил Комсомольский-на-Амуре политехнический институт и был назначен начальником научно-исследовательского сектора вуза. В 1978 г. окончил очную аспирантуру Московского станкоинструментального института. Защитил кандидатскую диссертацию (1983 г.) по специальности 05.03.01 – «Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент» на тему

«Разработка гидростатических опор с автоматической стабилизацией положения для направляющих тяжёлых металлорежущих станков». С 1991 по 1996 гг. – старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН. В 1999 г. защитил в КнАГТУ докторскую диссертацию «Повышение надёжности процессов механообработки в автоматизированном производстве на основе синергетического подхода» по специальности 05.03.01 – «Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент». В вузе прошёл путь от ассистента до ректора университета, заведовал кафедрой технологии машиностроения. С 1999 г. – профессор, в 2000 г. создал и возглавил Институт новых информационных технологий КнАГТУ. С 2001 по 2006 гг. являлся проректором по учебной работе, с 2006 по 2014 гг. – ректором университета. С 2010 по 2017 гг. – главный редактор журнала «Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета».

Анатолий Михайлович являлся одним из создателей крупнейшего на Дальнем Востоке инструментального завода. Основал научное направление «Повышение надёжности механообработки в автоматизированном производстве», руководил аспирантурой по специальности «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки».

Новизна научных работ состоит в выявлении механизмов самоорганизации процессов, обуславливающих минимизацию выходных параметров процесса резания; в установлении закономерностей эволюции упругой системы станка как активной системы и потери устойчивости процесса резания; в разработке новых представлений о природе изнашивания режущего инструмента; в разработке принципов управления износостойкостью режущего инструмента; в разработке методологических принципов диагностики и управления процессами механообработки на основе выявленных механизмов самоорганизации в системе резания для условий автоматизированного производства.

Постоянный член диссертационных советов. Подготовил 7 кандидатов технических наук. Автор множества научных трудов и монографий, авторских свидетельств и патентов.

Память о Шпилеве Анатолии Михайловиче навсегда останется в наших сердцах.

Ректорат, отдел редакции журнала «Учёные записки КнАГТУ», коллеги и друзья

Содержание

Научное издание

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Лю Б., Лозовский И. В., Марьин С. Б.

БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЁТА И ПОСАДКИ 4

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Климаш В. С., Табаров Б. Д.

РАЗРАБОТКА КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК И СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ..... 7

Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л., Канахин И. В., Петрова А. Н., Хромов А. И.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ..... 15

Марченко Н. М.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
В ПАКЕТЕ MATLAB 24

Степьмашук С. В., Черепанов Н. И.

СИСТЕМА ПОДЧИНЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ..... 35

Урасов Д. В., Черный С. П.

ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ
РЕГУЛЯТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДА КЛАПАНА В ДУГОВОЙ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ 46

Хрульков В. Н., Черный С. П.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЧЁТКИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ
ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ..... 52

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Иванов С. Н., Ким К. К., Коколевский М. А., Колесник М. Б., Плотников Д. В.

УЧЁТ ОСЕВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ..... 63

Рахчеев В. Г., Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ИЗНОСА АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ
ПРИ ШЛИФОВАНИИ РЕЛЬСОВ..... 68

Самар Е. В., Мокрицкий Б. Я.

НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ 76

Отряскина Т. А., Павловская Д. А.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ
НА ОСНОВАНИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕЗАНИИ..... 83

Усанов Г. И., Усанов М. Г., Усанов И. Г.

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ: МЕТОДОЛОГИЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ 88

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Ри Хосен, Живетьев А. С., Ким Е. Д., Дорошенко К. В., Попова В. С.

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ
ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ АЛЮМИНИДОМ НИКЕЛЯ..... 94

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Коротеева Л. И., Ливицина Л. О.

АНАЛИЗ НЕГАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМЕЛЬНЫХ
РЕСУРСОВ НА ТЕРРИТОРИИ КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА ХАБАРОВСКОГО КРАЯ 100

Ким К. К., Иванов С. Н., Спичкин Г. Л.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОКЛИМАТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
И ОФИСНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ НА ТРАНСПОРТЕ..... 105

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Сохацкая Д. Г., Ефимова К. С.

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННОГО
ОБЛИКА ПЕШЕХОДНОЙ УЛИЦЫ..... 113

Гринкруг Н. В., Михайлова Т. М.

ГЕОПЛАСТИКА КАК СПОСОБ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТСКИХ ПЛОЩАДОК
(НА ПРИМЕРЕ Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ)..... 117

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТОЙ ПАМЯТИ УЧЁНОГО
И ПЕДАГОГА ЭДУАРДА ГАВРИЛОВИЧА БАБЕНКО 123

ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТОЙ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ
УЧЁНОГО АНАТОЛИЯ МИХАЙЛОВИЧА ШПИЛЕВА..... 124

Учёные записки КнАГТУ

2022 № I (57)

Науки о природе и технике

Выпускающий редактор

С. Н. Иванов

Подписано в печать 25.03.2022

Дата выхода в свет 29.03.2022

Формат А4.

Бумага офисная 80 г/м².

Усл. печ. л. 13,63.

Уч.-изд. л. 17,18.

Тираж 200. Заказ 30531

Отпечатано в типографии

КнАГУ

681013,

г. Комсомольск-на-Амуре,

пр. Ленина, д. 27.

