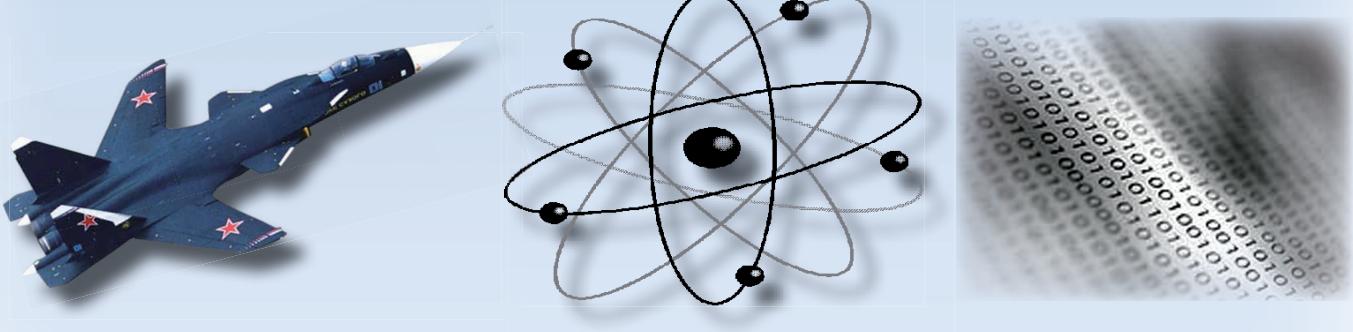


# Учёные записки

ISSN 2076-4359  
№ VII (71)  
2023

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.  
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

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

ISSN 2076-4359 = Ученые записки Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

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

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

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

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

Адрес редакции: 681013,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
ул. Комсомольская, д. 50, ауд.508  
Телефон для справок:  
+7 (4217) 24-13-48

Индекс журнала  
в каталоге Роспечать: 66090.  
Цена свободная.  
© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КнАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

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

Журнал основан в 2010 году

**Редакционная коллегия:**

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

### **Серия: «Науки о природе и технике»**

Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике» Сергей Николаевич Иванов, доктор технических наук, доцент.  
E-mail: snivanov57@mail.ru

**Отделы:**

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

### **Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»**

Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре» Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент.  
E-mail: lmk@knastu.ru

**Отделы:**

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

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

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА  
«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»**

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»**

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦҮЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

**ЭНЕРГЕТИКА**

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

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

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

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

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

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

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

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

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматики 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 metallurgии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

**ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

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

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ**

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 Шенъянского архитектурно-строительного университета (КНР)

**СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»**

**ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ**

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

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

**ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ**

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

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

**ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА**

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

**ИСТОРИЯ**

АЛЕКСАНДР МАNUЭЛЬЕВИЧ 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

# ЭНЕРГЕТИКА

# ENERGETICS

**Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И.**  
**K. K. Kim, S. N. Ivanov, M. I. Khismatulin**

## **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НАГРЕВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

### **ELECTROMECHANICAL DIESEL FUEL HEATING SYSTEM FOR VEHICLES**

**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, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

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

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

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Departmnet, 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.

**Хисматулин Марат Ильдусович** – аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: lokomotivlar@gmail.com.

**Marat I. Khismatulin** – Post Graduate Student, Electrical and Heat Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); 190031, Saint Petersburg, 9 Moscowsky pr. E-mail: lokomotivlar@gmail.com.

**Аннотация.** При отрицательных температурах окружающей среды дизельное топливо становится вязким и распыление его форсунками затрудняется. Данная проблема решается использованием автономных предпусковых подогревателей. Рассматривается новый тип предпускового подогревателя, осуществляющего одновременно как нагрев, так и перекачку топлива. Он сконструирован на базе электромеханического преобразователя. Подогреватель обеспечивает независимую регулировку температуры топлива, давления и производительности, является высокотехнологичным и характеризуется высокой надёжностью.

**Summary.** At subzero ambient temperatures, diesel fuel becomes viscous, and spraying it with injectors becomes difficult. This problem is solved by using autonomous preheaters. A new type of preheater is being considered, which simultaneously performs both heating and pumping of fuel. It is designed on the basis of an electromechanical converter. The heater provides independent adjustment of fuel temperature, pressure and performance, it is high-tech, and is characterized by high reliability.

**Ключевые слова:** электромеханический преобразователь, дизельное топливо, двигатель, подогрев, температура, напор.

**Key words:** electromechanical converter, diesel fuel, engine, locomotive, heating, temperature, pressure.

УДК 621.313.5:621.365.9

**Введение.** Известны трудности запуска дизельного двигателя при отрицательных температурах окружающей среды, что связано прежде всего с особенностью воспламенения дизтоплива. При отрицательных температурах окружающей среды топливо становится вязким и распыление его форсунками затрудняется. Данная проблема решается установкой различных дополнительных

предпусковых подогревателей топлива, которые представляют собой автономные электрические устройства, на топливные фильтры, магистраль или в бак.

В данной статье рассматривается предпусковой подогреватель, осуществляющий одновременно как нагрев, так и перемешивание дизельного топлива. Этот подогреватель сконструирован на базе электромеханического преобразователя. Одной из отличительных черт этого устройства является возможность раздельного регулирования величин нагрева и напора подогреваемого топлива.

Проведённый анализ показал, что рассматриваемый подогреватель обладает широкими регулировочными характеристиками, обеспечивает возможность получения и поддержания заданных температуры нагреваемого топлива, давления и производительности. Устройство является высокотехнологичным и характеризуется высокой структурной надёжностью.

**Теоретическая часть.** Подача вязких жидкостей по трубопроводным магистралям с помощью дополнительных нагнетательных устройств приводит к увеличению эксплуатационных расходов на транспортирование. Повысить эффективность процесса преобразования энергии вязкого дизельного топлива можно за счёт субоптимального выбора обоснованного состояния перемещаемой жидкости. Для этого необходимо установить закономерности течения жидкостей по трубопроводной системе с учётом воздействия технологических факторов. Процесс подачи подогреваемой жидкости характеризуется усреднённой продольной скоростью по сечению подводящей магистрали  $v$  (м/с) и объёмным расходом топлива  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). Объём топлива, который прокачивается в единицу времени через поперечное сечение магистрали при заданном давлении, принимается основной характеристикой процесса подогрева и подачи дизельного топлива.

Скорость подачи и производительность (расход) устройства связаны соотношением

$$Q = v \times s,$$

где  $s$  – активная площадь поперечного сечения топливной магистрали,  $\text{м}^2$ .

При реализации процесса нагрева и подачи топлива следует учитывать, что определённая доля подведённой электрической энергии необратимо превращается в тепловые потери. Эта часть энергии ( $\Delta E$ ) зависит от физико-химических свойств топлива, в первую очередь от вязкости.

Потери энергии включают две составляющие. Первая представляет потери давления:

$$\Delta P = \rho \times \Delta E,$$

вторая – потери напора:

$$\Delta h = \Delta P / (\rho g),$$

где  $\rho$  – плотность топлива;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Часть мощности, которая необходима для перемещения топлива с расходом  $Q$  в систему, определяется формулой

$$P = \Delta P \times Q.$$

Гидравлические потери также имеют две составляющие. Первая определяется при равномерном движении топлива на прямолинейных участках магистрали потерями давления на трение  $\Delta P_{\text{тр}}$ , вторая – местными потерями  $\Delta P_m$  на относительно коротких, но сложно сконфигурированных участках трубопроводов. Вторая составляющая  $\Delta P_m$  обусловлена, как правило, изменениями формы магистрали. Наиболее часто изменение гидравлических сечений связано с их уменьшением (диффузоры) или увеличением (конфузоры), наличием переходов на границах расслоения или соединения потоков технологического оборудования (задвижки, клапаны и т. п.).

Влияние второй составляющей возрастает при безразмерных числах Рейнольдса (2200 и более), когда наблюдается вихреобразование топлива, приводящее к дополнительным потерям энергии.

Гидравлические потери на прямолинейных участках магистрали  $\Delta P_{\text{тр}}$  рассчитываются по формуле



$$\Delta P_{\text{tp}} = \lambda \times \frac{\rho l}{2d} \times v^2,$$

потери напора на прямых участках –

$$\Delta h_{\text{tp}} = \lambda \times \frac{l}{2dg} \times v^2,$$

где  $\lambda$  – гидравлический коэффициент трения;  $l$  – длина расчётного участка магистрали, м;  $d$  – активный диаметр трубопровода, м.

По формуле Вейсбаха потери давления  $\Delta P_{\text{tp}}$  на местных сопротивлениях

$$\Delta P_{\text{tp}} = \xi \times \frac{\eta}{v} \times \frac{v^2}{2},$$

напора –

$$\Delta h_{\text{tp}} = \xi \times \frac{v^2}{2g},$$

где  $\xi$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления;  $\eta$  – динамическая вязкость, Па·с;  $v$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Суммарные потери давления и напора, соответственно, определяются выражениями

$$\Delta P = \Delta P_{\text{tp}} + \Delta P_{\text{m}};$$

$$\Delta h = \Delta h_{\text{tp}} + \Delta h_{\text{m}}.$$

Точные значения отдельных коэффициентов на практике не всегда известны. Так, гидравлический коэффициент трения  $\lambda$  зависит от характера течения дизельного топлива, качества обработки внутренней поверхности (шероховатости) трубопровода. Коэффициент местного сопротивления  $\xi$  дополнительно зависит от вида и конструкции переходных участков. Сравнительный анализ типовых конструкций гидравлических магистралей показывает, что местом концентрации потерь являются резкое изменение диаметра трубы, поворотные участки и т. д.

При выполнении проектных расчётов коэффициенты сопротивления, входящие в приведённые выше выражения, выбираются из справочников или определяются опытным путём [1–4].

Проведённый авторами анализ таких способов снижения потерь энергии при подаче дизельного топлива по трубопроводам, как конструкционное обеспечение плавного поворота потока жидкого топлива, снижение шероховатости внутренней поверхности трубопроводов, введение в поток жидкости полимерных добавок, внешние импульсные широкочастотные воздействия и подогрев перекачиваемого высоковязкого топлива, показал, что наиболее перспективным является последний способ, но для его реализации требуется установка дополнительного энергетического оборудования, например типовых насосных агрегатов, состоящих из насоса и электродвигателя. В то же время аналогичный результат может быть получен за счёт использования нового класса технических устройств, обеспечивающих одновременный нагрев и подачу дизельного топлива. Такие устройства нашли техническую реализацию в теплогенерирующих электромеханических преобразователях, совмещающих функции генерации тепловой и механической энергии и повышающих энергетическую эффективность транспортных систем, работающих на дизельном топливе.

Предварительная оценка эффективности применения электромеханических устройств для подогрева дизельного топлива может быть сделана на основе зависимости потерь на перемещение вязкого топлива, определяемых по приведённым выше формулам с учётом влияния температуры на физико-химические свойства дизельного топлива [5–9].

Для количественного определения гидравлических потерь используется зависимость кинематической вязкости дизельного топлива от температуры, приведённая на рис. 1: летнего 1 и зимнего 2.

Следует отметить, что при точных расчётах возникает необходимость учёта влияния коэффициента теплоотдачи  $k_T$  с нагревательных поверхностей устройства. Коэффициент  $k_T$  зависит не только от размерных соотношений трубопровода, температуры, скорости и физических свойств топлива, но и от целого ряда теплофизических параметров. К ним относятся теплопроводности, удельные теплоёмкости, плотности, коэффициенты температуропроводности, динамические вязкости. Решение краевой задачи конвективного теплообмена сводится к решению системы уравнений энергии, теплоотдачи, движения и сплошности [10].

Динамические характеристики температуры топлива в произвольной точке описывает уравнение энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

Уравнение теплоотдачи устанавливает связь коэффициента  $k_T$  с температурами рабочей среды  $T_{раб}$  и нагревательного элемента  $T_{нэ}$ :

$$k_T = -\frac{\lambda}{T_{раб} - T_{нэ}} \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0}.$$

Компоненты вектора абсолютной скорости движения жидкого топлива в декартовой системе координат находятся как решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned}$$

Влияние скорости подачи топлива на изменение соотношения между динамической и кинематической вязкостями (через плотность топлива) устанавливает уравнение сплошности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}.$$

В частном случае, если жидкость рассматривается как несжимаемая, имеющая постоянную плотность, уравнение сплошности принимает вид

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.$$

При известных геометрии рабочего канала, физических свойствах жидкой среды краевая задача считается определённой.

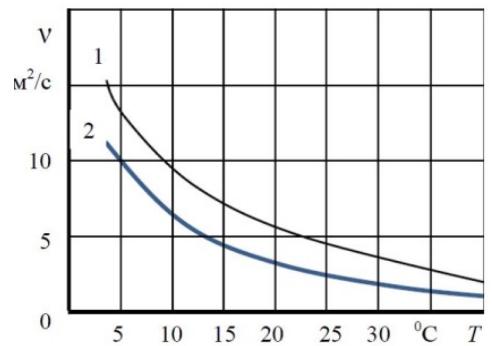


Рис. 1. Зависимость кинематической вязкости дизельного топлива от температуры

Распределение плотности теплового потока  $q(t)$  для каждой точки нагревательной поверхности устройства учитывают граничные условия II рода:

$$\lambda(T)(\frac{\partial T}{\partial n}) = -q(t),$$

конвективная теплоотдача с поверхности нагревательных элементов определяется граничными условиями III рода:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_T (T_{\text{нэ}} - T_{\text{раб}}) = -q.$$

**Результаты.** Приведённые теоретические выражения реализованы в ряде изобретений [11; 12] и в электромеханическом устройстве, обеспечивающем одновременный подогрев и подачу дизельного топлива, общая схема которого показана на рис. 2.

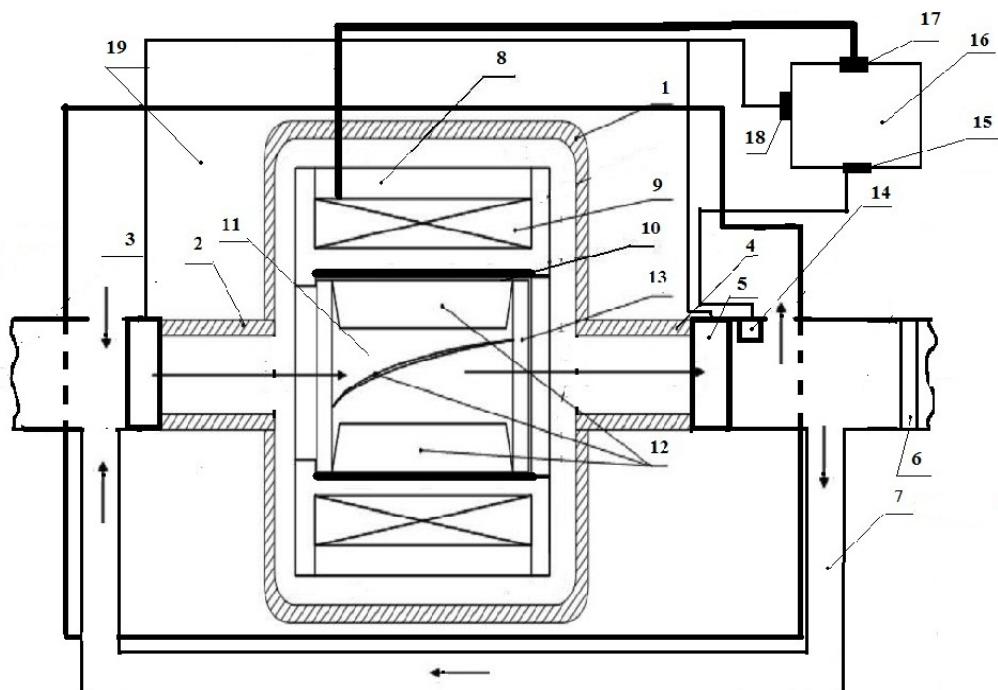


Рис. 2. Конструкция подогревателя

Несущим элементом устройства является корпус 1. С одной стороны корпуса расположен входной трубопровод 2 со встроенным клапаном 3. На другой стороне размещён выходной трубопровод 4, снабжённый клапаном 5 и топливным фильтром 6. С целью автоматизации процесса эксплуатации устройства клапаны 3 и 5 имеют электромагнитный привод. Трубопроводные участки 2 и 4 соединены. Байпасный трубопровод 7 соединяет участки 2 и 4. Внутри цилиндрического корпуса 1 расположен магнитопровод 8, в пазах которого уложена трёхфазная обмотка 9. В области, образованной внутренней частью магнитопровода 8, расположены две коаксиальные вторичные обмотки с рабочим напряжением, не превышающим 2 В. Материал неподвижной 10 и врачающейся 11 обмоток имеет высокую электрическую проводимость. Цилиндрическая врачающаяся обмотка 11 представляет совокупность продольных стержней и короткозамыкающих колец. Внутри обмотки 11 закреплены лопасти 12. Обмотка 11 и магнитопровод 8 в тангенциальном направлении разделены диэлектрическим элементом 13, который изготовлен из самосмазывающегося материала, например, композитного материала на основе эпоксидного компаунда с фторопластовым наполнителем и армирующими микрофираментами. Особенno важно отметить, что обычных

подшипников нет и топливо проходит через устройство прямолинейно. Вот почему это устройство характеризуется очень малым гидравлическим сопротивлением. Конструктивный элемент 13 действует как радиально-упорный подшипник обечайки. Выходной патрубок 4 содержит датчик температуры 14, с коммутированным с входом 15 имеющего два выхода блока управления 16. Один выход блока 16 подключается к сетевой обмотке 9, а другой выход 18 – к клапанам 3 и 5. Устройство может размещаться внутри топливного бака 19, поскольку корпус 1 имеет герметичное исполнение.

На рис. 3 показан действующий образец данного устройства в сборе.

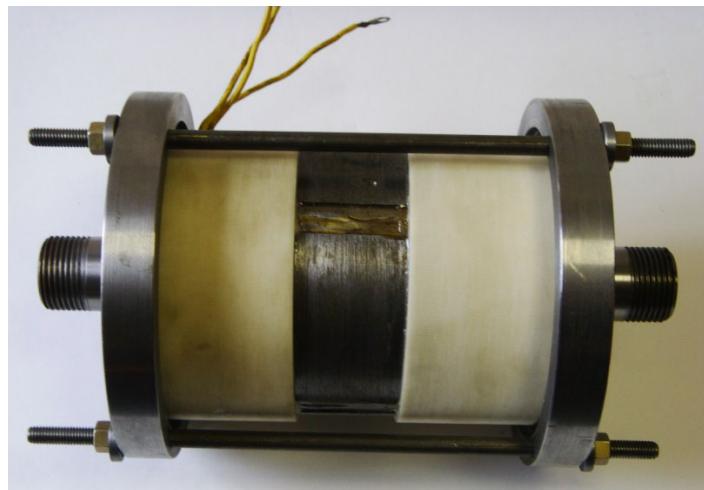


Рис. 3. Общий вид электромеханического преобразователя в сборе

Рис. 4 иллюстрирует расположение этого устройства в системе питания дизеля.

Выходной трубопровод 4 корпуса 1 (см. рис. 2) соединяется с обратным трубопроводом 20 (см. рис. 4). Трубопровод 20 присоединён через редукционный клапан 21 к топливному насосу высокого давления (ТНВД) 22. ТНВД подаёт топливо в камеру сгорания через форсунки 24, которые с помощью разгрузочной трубы 23 соединяются с редукционным клапаном 21.

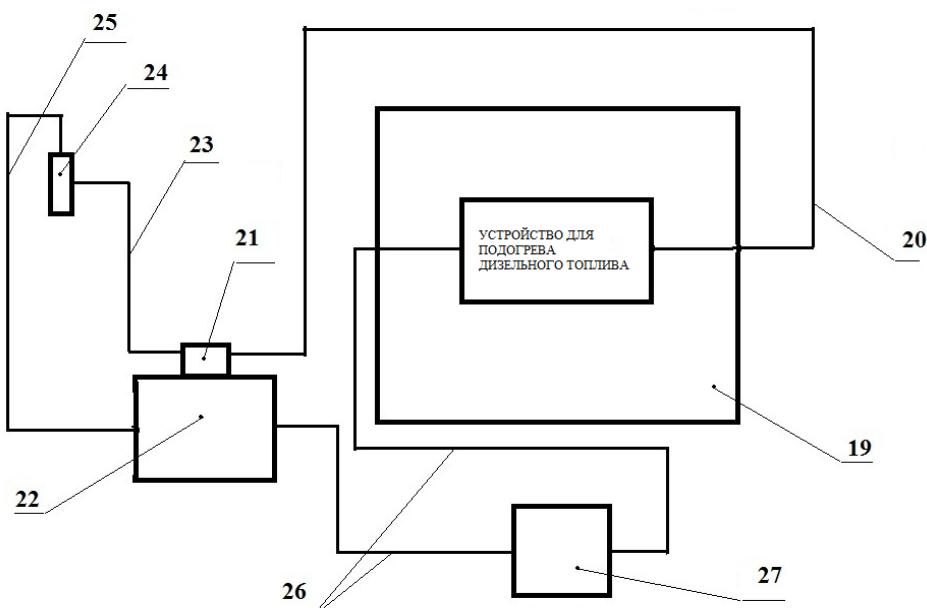


Рис. 4. Схема питания двигателя



Топливный насос высокого давления 22 соединён с входным клапаном 2 с помощью топливного трубопровода низкого давления 26 (см. рис. 4). Также используются топливный фильтр 27 и заправочный насос с механическим приводом.

Для практического применения данного устройства целесообразно рассмотреть принцип действия электромеханического подогревателя топлива. Первоначально блок управления 16 подаёт питание на сетевую обмотку 9 и одновременно приводит в открытое состояние электромагнитные клапаны 3 и 5 (см. рис. 1). Подведённая электрическая энергия преобразуется электромеханическим устройством в электромагнитную. Создаваемая многофазной обмоткой 9 намагничивающая сила приводит к появлению вращающегося магнитного поля. Это поле наводит вихревые токи во вторичных электропроводящих контурах (обмотки 10 и 11), что приводит вследствие известного закона Джоуля-Ленца к их нагреву. Преимуществом устройства по сравнению с традиционными электромеханическими преобразователями, в которых теплоту, выделяющуюся в результате джоулева нагрева, относят к негативным явлениям, является то, что здесь она идёт на нагрев дизельного топлива, которое псевдоожигается в топливном контуре.

Действие вихревых токов не ограничивается нагревом вторичных обмоток, но приводит к появлению крутящего момента на обмотке 11. Обмотка приходит во вращение, одновременно с ней перемещаются напорные элементы 12, являющиеся конструктивными элементами обмотки 11. В подогревателе лопасти 12 создают насосную головку для дизельного топлива. Создание давления в магистрали приводит к поступлению дизельного топлива по трубопроводу 2 в зону нагрева. Нагретая жидкость по пути, показанному на рис. 2 стрелками, возвращается через выходной трубопровод 4 и клапан 5 в топливный бак 19.

В качестве неосновного, но полезного источника нагрева можно рассматривать магнитные потери (гистерезис и вихревые токи) в магнитопроводе 8.

Поскольку устройство размещено в топливном баке 19, то часть тепла отводится конвекцией в нагреваемое топливо с наружной поверхности корпуса 1.

Устройство предполагает возможность полной автоматизации процесса нагрева и подачи топлива. Для контроля температуры используется датчик 14. При выходе температуры на детерминированные значения блок 16 управления и питания отключает сетевую обмотку 9, что приводит к прекращению нагрева топлива. Одновременно с отключением питания блок 16 генерирует сигнал на закрытие клапанов 3 и 5.

Подогретое до требуемой температуры топливо из бака 19 (см. рис. 4) по топливному трубопроводу низкого давления 26 поступает в топливный фильтр 27. Насос 22 нагнетает топливо в форсунки 24. Затем оно впрыскивается в цилиндры. Часть избыточного топлива, прошедшая через форсунки 24, через разгрузочную трубу 23 поступает к редукционному клапану 21 топливного насоса высокого давления 22 и затем возвращается в бак 19 по обратному трубопроводу 20.

**Заключение.** Рассмотренное устройство для подогрева дизельного топлива обладает высокой эффективностью, обусловленной повышением количества нагреваемого и подаваемого топлива. Это является следствием снижения гидравлического сопротивления в осевом направлении движущейся жидкости. Количество тепловой мощности, генерируемой нагревательными элементами, и объёмный расход топлива в единицу времени зависят от электромагнитных нагрузок, размерных соотношений и скорости вращения вторичной обмотки.

Количественное сравнение потерь при использовании предлагаемого устройства вместо стандартного оборудования показывает, что его применение позволяет повысить эффективность и снизить установленную мощность необходимого оборудования почти в два раза [13–19]. Более точная оценка эффективности электромеханических устройств для подогрева дизельного топлива может быть сделана на основе численного моделирования совмешённых процессов тепло-массопереноса на основе прикладных высокопроизводительных программ, например ANSYS, а полученные результаты могут использоваться при создании промышленных образцов таких устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сипайлов, Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах: учеб. пособие / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
2. Egorov, V., Abu-Khasan, M., Shikova, V. The Systems of Reservation of Bearing StructuresCoatings of Transport Buildings and Constructions for Northern areas. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 753 (2), article № 022021, (2020).
3. Ivanov, S. Formation and study of coatings from composite material for special electrical devices / S. Ivanov, K. Kim // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.14th International Conference on Films and Coatings – 2019. doi:10.1088/1742-6596/1281/1/012034. P. 1-4.
4. Valinsky, O. S., Evstafev, A. M., Nikitin, V. V. The Effectiveness of Energy Exchange Processes in Traction Electric Drives with Onboard Capacitive Energy Storages. Russ. Electr. Engin.89, 566–570 (2018). <https://doi.org/10.3103/S1068371218100103>.
5. Evstafev, A. M., Nikitin, V. V., Telichenko, S. A. Energy Converters for Hybrid Traction Power Systems Used in Electric Transport. Russ. Electr. Engin.91, 77–81 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068371220020042>.
6. Nikitin, V. V., Sychugov, A. N., Rolle, I. A. et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock. Russ. Electr. Engin. 91, 87–92 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068371220020078>.
7. Ватаев, А. С. Математическое моделирование бесконтактного заряда аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата / А. С. Ватаев, М. В. Михайлов, А. С. Соловьев // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2022: материалы Международной научно-практической конференции, 09-10 ноября 2022 г. – СПб.: ИППТ РАН, 2022. – С. 103-106.
8. Egorov, V., Kravchenko, A., Abu-Khasan, M. The Application of Evolutional Algorithm Optimization of Spren-gel Systems of Transport Buildings and Structures for Northern Districts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 753 (2), article № 022020, (2020).
9. Rusanova, E. V., Abu-Khasan, M. S., Egorov, V. V. The Complex Evaluation of Geo Eco-Protective Technologies Taking into Account the Influence of Negative Temperatures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 753 (2). (2020).
10. Киселев, И. Г. Теплотехника на подвижном составе железных дорог: учеб. пособие / И. Г. Киселев. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 278 с.
11. Патент № 150936 U1 Российская Федерация, МПК7 H02N. Термогенерирующий электромеханический преобразователь: № 2014138671/1; заявлено 24.09.2014; опубликовано 10.03.2015 / Ким К. К., Иванов С. Н., Титова Т. С.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2 с.
12. Патент № 2740521 Российская Федерация, МПК7 B61D 27/00. Автоматизированная система отопления пассажирского вагона: № 2020126010; заявлено 30.07.2020; опубликовано 15.01.2021 / Иванов С. Н., Ким К. К., Хисматулин М. И.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2 с.
13. K. Kim, S. Ivanov. Problem statement for the analysis of electromechanical systems by simulation modeling methods / IOP Conf. Series: Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) Gelendzhik, 2021.
14. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, г. Саратов, 16-17 мая 2018 г. – Саратов: СГТУ, 2018. – С. 124-130.
15. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Саратов: Ай Ни Эр Медиа, 2019. – 289 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html> (дата обращения: 10.10.2023). – Текст: электронный.
16. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 573-583.
17. Ким, К. К. Гидродинамическое моделирование гибридных энергетических устройств с использованием CFD-технологий / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. –2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 161-169.
18. Ким, К. К. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в термогенерирующих перекачивающих электромеханических преобразователях / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Транспорт шёлкового пути. – 2020. – Вып. 3. – С. 3-14.
19. Ким, К. К. Электромеханическая система отопления пассажирского вагона / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 566-574.

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

**Андианов И. К., Чепурнова Е. К.**  
**I. K. Andrianov, E. K. Chepurnova**

**СХОДИМОСТЬ ИТЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕДУР В ЗАДАЧЕ МАКСИМИЗАЦИИ  
ИЗЛИШКА ПРОИЗВОДИТЕЛЯ ДЛЯ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ КРИВЫХ СПРОСА  
И ПРЕДЛОЖЕНИЯ**

**CONVERGENCE OF ITERATIVE PROCEDURES IN THE PROBLEM OF MAXIMIZING  
PRODUCER SURPLUS FOR EXPONENTIAL SUPPLY AND DEMAND CURVES**

**Андианов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

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

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

**Аннотация.** Исследование посвящено численному решению оптимизационной задачи об излишке производителя в условиях нелинейных кривых спроса и предложения. Проведена оценка сходимости итерационной процедуры для поиска оптимального объёма продукции для экспоненциальных кривых спроса и предложения. Получены условия, при которых рассмотренная итерационная процедура в зависимости от коэффициентов эластичности по цене, функций спроса и предложения будет обеспечивать сходящийся итерационный процесс. Проанализирована скорость сходимости итерационного процесса в сравнении с итерационной процедурой по методу Ньютона.

**Summary.** The study is devoted to the numerical solution of the optimization problem for the producer surplus in the conditions of nonlinear supply and demand curves. The convergence of the iterative procedure for finding the optimal volume of products for exponential supply and demand curves is evaluated. The conditions are obtained under which the considered iterative procedure, depending on the elasticity coefficients of supply and demand, as well as on the supply and demand functions, will provide a convergent iterative process. The convergence rate of the iterative process is analyzed in comparison with the iterative procedure according to the Newton method.

**Ключевые слова:** итерационный процесс, сходимость, сжимающее отображение, излишок производителя, задача максимизации, метод последовательных приближений.

**Key words:** iterative process, convergence, compressive mapping, producer surplus, maximization problem, sequential approximation method.

УДК 519.6:332.053.22

**Введение.** Математическое моделирование в задачах оптимизации экономических систем и процессов всё чаще требует применения численных методов, что обусловлено нелинейностью определяющих соотношений при описании реальных процессов. Отметим, что различные подходы к решению оптимизационных задач с нелинейностями рассмотрены в работах [1–5], проблемы многокритериальной оптимизации и оптимального управления исследовались в трудах [6–12]. На сегодняшний день одной из актуальных задач представляется задача о максимизации излишка производителя в условиях монополии для нелинейных кривых спроса и предложения. Постановка задачи оптимизации излишка производителя была описана в работе [13]:

$$PS = \int_0^{q_*} (p_* - p_s(q)) dq \rightarrow \max_{p_*}, \quad (1)$$

где  $p = p_D(q)$  – обратная кривая спроса,  $p > 0$  – цена на продукцию,  $p = p_s(q)$  – обратная кривая предложения;  $q > 0$  – объём продукции,  $p_*$ ,  $q_*$  – соответственно значения цены и объёма продукции в результате создания искусственного дефицита продукции.

Сложность решения задачи (1) обусловлена тем, что для нелинейных кривых спроса и предложения расчёт оптимальной цены или оптимального объёма продаж, доставляющих максимум целевой функции, излишки производителя, может не иметь аналитического решения. Соответственно, требуется применение численных методов для решения оптимизационной задачи (1). Однако выбор итерационной процедуры для численного расчёта требует оценки сходимости решения, поскольку неудачный выбор итерационной схемы может привести к расходящемуся итерационному процессу.

Вопрос сходимости итерационных процедур занимает одно из важных мест при численном решении нелинейных уравнений и систем и требует применения принципа сжимающих отображений [14].

Таким образом, цель данного исследования заключалась в оценке сходимости итерационных процедур при решении задачи максимизации излишка производителя (1) для экспоненциальных кривых спроса и предложения. В рамках задач исследования требовалось получить условия сходимости выбранной итерационной процедуры, а также сравнить её сходимость со сходимостью итерационной схемы согласно методу Ньютона на примере численного эксперимента при различных значениях коэффициентов эластичности спроса и предложения по цене.

**Методика исследования.** Исследование будем проводить при следующих допущениях: кривая спроса – заданная убывающая функция, кривая предложения – заданная возрастающая функция, сдвиги кривых спроса и предложения исключаются.

В качестве нелинейных обратных кривых спроса и предложения будем рассматривать экспоненциальные зависимости:

$$p_D(q) = \exp(\alpha_D q + \beta_D), \quad p_s(q) = \exp(\alpha_S q + \beta_S), \quad (2)$$

где  $\alpha_D < 0$ ,  $\beta_D$ ,  $\alpha_S > 0$ ,  $\beta_S$  – коэффициенты обратных функций спроса и предложения.

Тогда с учётом (1), (2) задача максимизации излишка производителя (1) примет вид

$$PS(q_*) = q_* \exp(\alpha_D q_* + \beta_D) - \int_0^{q_*} \exp(\alpha_S q + \beta_S) dq \rightarrow \max_{q_*}. \quad (3)$$

Применяя к соотношению (3) необходимое условие экстремума  $\partial PS(q_*) / \partial q_* = 0$  [14], перейдём к нелинейному уравнению:

$$q_* + \frac{1}{\alpha_D} (1 - \exp[(\alpha_S - \alpha_D)q_* + \beta_S - \beta_D]) = 0. \quad (4)$$

Поскольку уравнение (4) не имеет аналитического решения, рассмотрим применение для его решения численного метода с помощью итерационной процедуры вида

$$q_*^{(k+1)} = \varphi(q_*^{(k)}), \quad (5)$$

где  $k$  – номер итерации,  $\varphi(q)$  – отображение вида

$$\varphi(q) = \frac{1}{\alpha_D} (1 - \exp[(\alpha_S - \alpha_D)q + \beta_S - \beta_D] - 1). \quad (6)$$

Исследуем сходимость итерационного процесса (5), (6) с помощью достаточного условия сходимости [14]:



$$|\varphi'(q)| < 1. \quad (7)$$

На основании соотношений (6) и (7) условие сходимости итерационной процедуры (5), (6) примет вид

$$q < \frac{1}{\alpha_S - \alpha_D} \ln \left( \frac{\alpha_D}{\alpha_D - \alpha_S} \right) - \frac{\beta_S - \beta_D}{\alpha_S - \alpha_D}. \quad (8)$$

Представим соотношение (8) через условие рыночного равновесия  $p_D(q_e) = p_S(q_e)$ , где  $q_e$  – объём продаж, соответствующий рыночному равновесию:

$$q_e = \frac{\beta_S - \beta_D}{\alpha_D - \alpha_S}. \quad (9)$$

С учётом (9) неравенство (8) примет вид

$$q < q_e - \frac{1}{\alpha_S - \alpha_D} \ln \left( 1 - \frac{\alpha_S}{\alpha_D} \right), \quad (10)$$

при этом правую границу интервала (10) обозначим как  $q_{cr} = q_e - \left( \ln \left( 1 - \frac{\alpha_S}{\alpha_D} \right) \right) / (\alpha_S - \alpha_D)$ .

Таким образом, условие (10) позволяет определить область для поиска оптимального значения  $q_*$ , при котором будет обеспечиваться достаточное условие сходимости итерационной процедуры (5), (6).

Введём в рассмотрение коэффициенты эластичности спроса  $E_p^D$  и предложения  $E_p^S$  по цене [13]:

$$E_p^D(q) = \left| \left( \frac{\partial p_D}{\partial q} \right)^{-1} \right| \frac{p_D(q)}{q}, \quad E_p^S(q) = \left( \frac{\partial p_S}{\partial q} \right)^{-1} \frac{p_S(q)}{q}. \quad (11)$$

Для экспоненциальных кривых спроса и предложения (2) коэффициенты эластичности по цене (11) примут вид

$$E_p^D(q) = \frac{1}{|\alpha_D|q}, \quad E_p^S(q) = \frac{1}{\alpha_S q}, \quad (12)$$

тогда перепишем условие (10) с использованием коэффициентов эластичности (12):

$$q < q_e \frac{E_p^D + E_p^S}{E_p^D + E_p^S + E_p^D E_p^S \ln(1 - \bar{E}_p)}, \quad (13)$$

где  $\bar{E}_p = E_p^D / E_p^S$  – относительный коэффициент эластичности по цене.

Также, учитывая (2), (12), можем представить условие сходимости итерационной процедуры (5), (6), выразив через функции спроса, предложения и коэффициентов эластичности по цене в виде

$$\frac{p_D}{p_S} - \frac{E_p^D}{E_p^S} > 1. \quad (14)$$

Условие сходимости (14) итерационной процедуры (5), (6) позволяет прийти к следующим заключениям:

– если коэффициенты эластичности спроса и предложения по цене одинаковы, т. е.  $\bar{E}_p = 1$ , то для выполнения условия (14) достаточно, чтобы

$$\frac{p_D}{p_S} > 2;$$

– учитывая, что  $p_D > p_S$  при  $0 < q_* < q_e$ , условие (14) выполняется всегда в случаях  $E_p^S = \infty$ , т. е. при абсолютно эластичном предложении;  $E_p^D = 0$ , т. е. при абсолютно неэластичном спросе.

Таким образом, неравенства (10), (13), (14) представляют собой эквивалентные формулировки достаточного условия сходимости итерационной процедуры (5), (6).

Поскольку при решении задачи максимизации (3) оптимальное значение  $q_*$  может попасть в область, для которой не выполняются условия (10), (13), (14), рассмотрим применение метода Ньютона [14] с целью решения нелинейного уравнения (4) согласно следующей итерационной процедуре:

$$q_*^{(k+1)} = \Psi(q_*^{(k)}), \quad (15)$$

где

$$\Psi(q) = q - \frac{q\alpha_D - \exp[(\alpha_S - \alpha_D)q + \beta_S - \beta_D] + 1}{\alpha_D + (\alpha_D - \alpha_S)(\exp[(\alpha_S - \alpha_D)q + \beta_S - \beta_D])}. \quad (16)$$

Отметим, что метод Ньютона, согласно [14], имеет достаточно хорошую сходимость итерационного процесса, если начальное приближение выбрано вблизи искомого решения нелинейного уравнения. Поэтому в качестве начального приближения для обеих итерационных процедур будем использовать объём продаж, соответствующий рыночному равновесию:  $q_*^{(0)} = q_e$ .

Условие окончания обоих итерационных процессов представим в виде

$$|q_*^{(k+1)} - q_*^{(k)}| / q_*^{(k)} \leq \Delta,$$

где  $\Delta$  – заданная точность расчёта.

Также отметим, что после найденного решения  $q_*^{(n)}$  уравнения (4) на  $n$ -й итерации с помощью итерационных процедур (5), (6) или (15), (16) необходимо проверить достаточное условие максимума:  $|\partial^2 PS(q_*) / \partial(q_*)^2|_{q_*=q_*^{(n)}} < 0$  [14].

**Результаты исследования.** Рассмотрим сходимость итерационных процедур (5), (6) и (15), (16) для различных значений относительного коэффициента эластичности по цене  $\bar{E}_p$  при следующих входных данных:  $\alpha_D = -0.05$ ,  $\beta_D = 5$ ,  $\beta_S = 1$ ,  $\Delta = 0.01$ , коэффициент  $\alpha_S$  определяется через  $\bar{E}_p$  согласно равенству:  $\alpha_S = |\alpha_D| \bar{E}_p$ . По результатам серий численных расчётов в математическом пакете MathCad 15.0 на рис. 1 представлено изменение приближений на каждой итерации для процедуры (5), (6) при различных значениях относительного коэффициента эластичности по цене. На рис. 2 – 4 получены области сходимости итерационной процедуры (5), (6) для различных значений относительных коэффициентов эластичности по цене. На рис. 5 изображена оценка сжимаемости отображения  $\Psi$ :  $q^{(k)} \rightarrow q^{(k+1)}$  для итерационной процедуры (15), (16) на основании метода Ньютона с помощью условия:  $|\Psi'(q)| < 1$ .

**Обсуждение результатов исследования.** Согласно результатам применения итерационной процедуры (5), (6) сходимость процесса достигается при  $\bar{E}_p \leq 1$ , однако при увеличении относительного коэффициента эластичности по цене количество требуемых итераций для сходимости процесса увеличивается (см. рис. 1). При  $\bar{E}_p > 2.5$  (см. рис. 1, e) сходимость приближений не достигается. Итерационный процесс (5), (6) расходится, поскольку оптимальное значение объёма продаж не удовлетворяет условиям (10), (13), (14).

На рис. 2 области сходимости итерационной процедуры (5), (6) при одинаковых коэффициентах эластичности спроса и предложения по цене находятся между кривыми 1 и 2, кривыми 3 и 4, левее прямой 5. Границное значение  $q_{cr}$  интервала, на котором выполняется достаточное условие сходимости (13), определяется абсциссой точки пересечения кривых 3 и 4 (см. рис. 2) или абсциссой точки пересечения кривых 1 и 2 (см. рис. 2) согласно условию (14). Как видно, на рис. 2 проекции областей сходимости итерационной процедуры (5), (6) между кривыми 1 и 2, кривыми 3 и 4 на ось  $q$  совпадают и определяются неравенством  $q < q_{cr}$ , что подтверждает эквивалентность формулировок (10), (13) и (14).

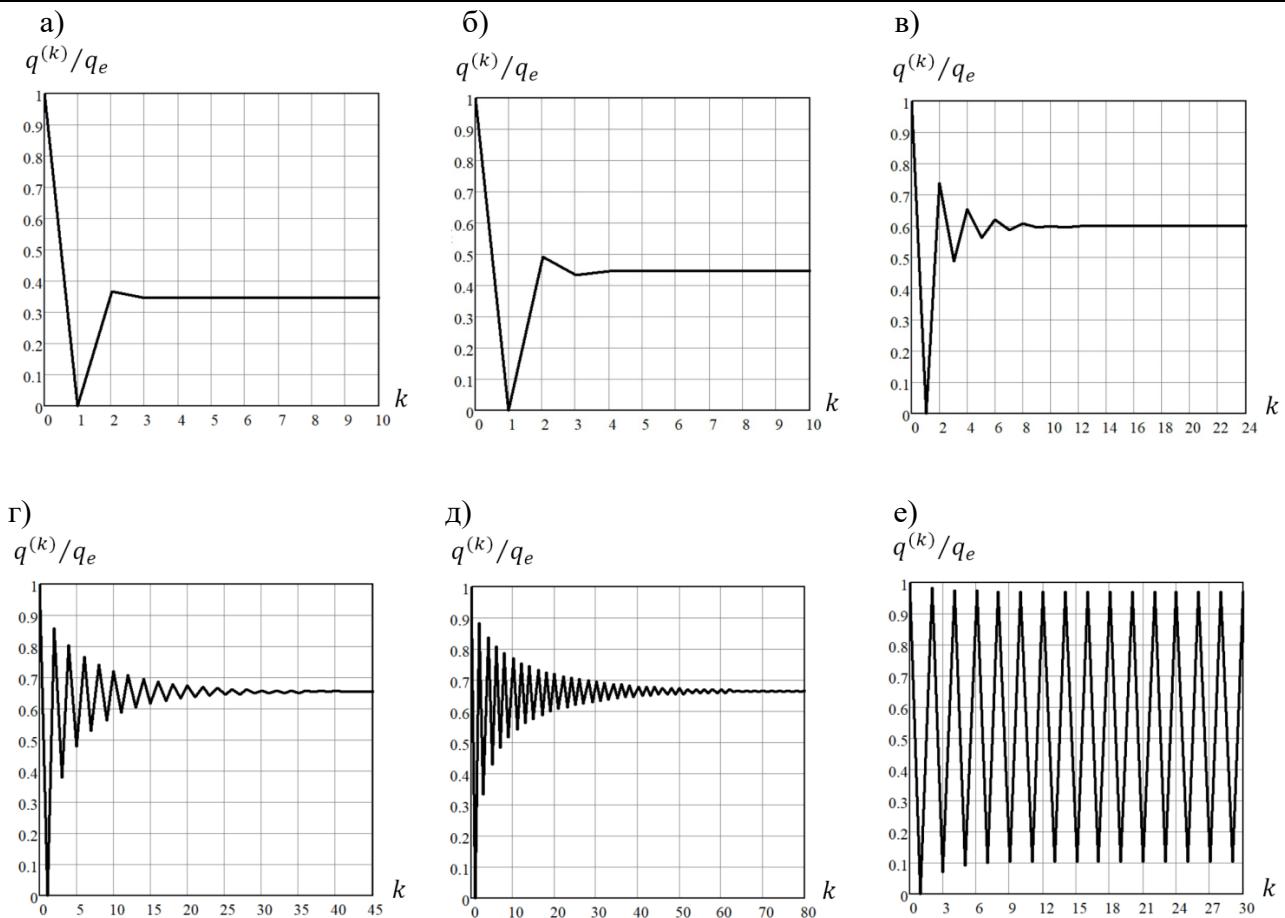


Рис. 1. Сходимость итерационного процесса для схемы (5), (6)  
при  $\bar{E}_p = 0.5$  (а);  $\bar{E}_p = 1$  (б);  $\bar{E}_p = 2$  (в);  $\bar{E}_p = 2.5$  (г);  $\bar{E}_p = 2.6$  (д)

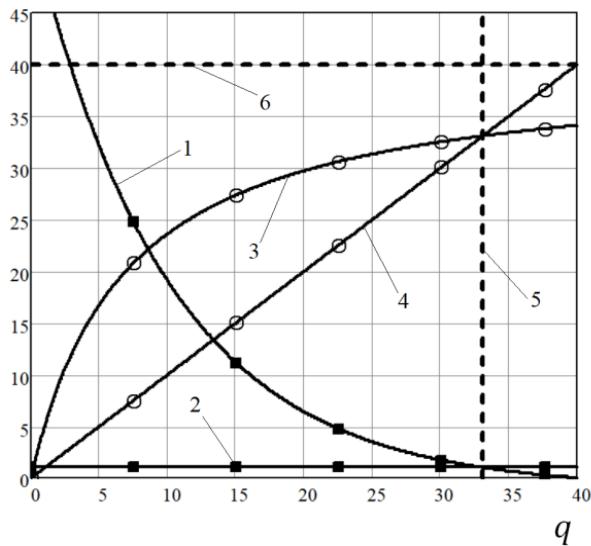


Рис. 2. Графическое представление условия сходимости итерационного процесса (5), (6)  
с использованием различных эквивалентных формулировок для  $\bar{E}_p = 1$ : 1 – левая часть  
неравенства (14) как функция аргумента  $q$ ; 2 – правая часть неравенства (14); 3 – правая часть  
неравенства (10) как функция аргумента  $q$ ; 4 – левая часть неравенства (10) как функция  
аргумента  $q$ ; 5 –  $q - q_{cr}$ ; 6 –  $q - q_e$

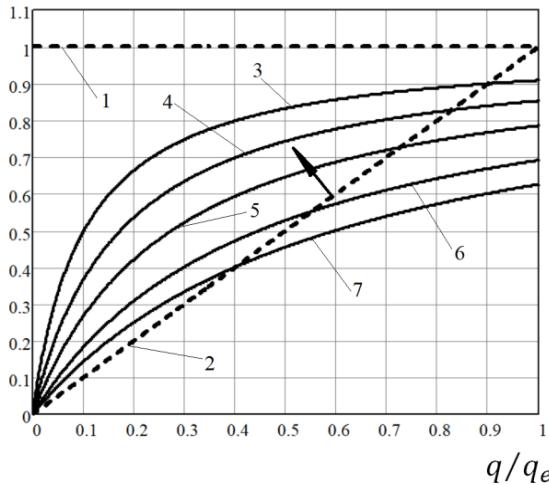


Рис. 3. Графическое представление условия сходимости (13) для итерационного процесса (5), (6): 1 –  $q/q_e = 1$ ; 2 – левая часть неравенства (13), делённая на  $q_e$ ; 3 – 7 – правые части неравенства (13), делённые на  $q_e$  для различных относительных коэффициентов эластичности по цене: 3 –  $\bar{E}_p = 0.5$ ; 4 –  $\bar{E}_p = 1$ ; 5 –  $\bar{E}_p = 2$ ; 6 –  $\bar{E}_p = 5$ ; 7 –  $\bar{E}_p = 10$

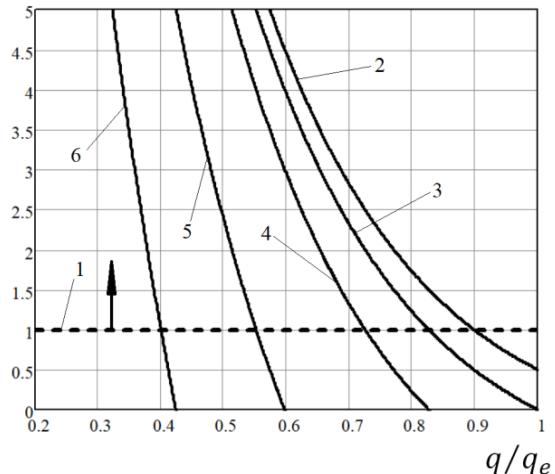
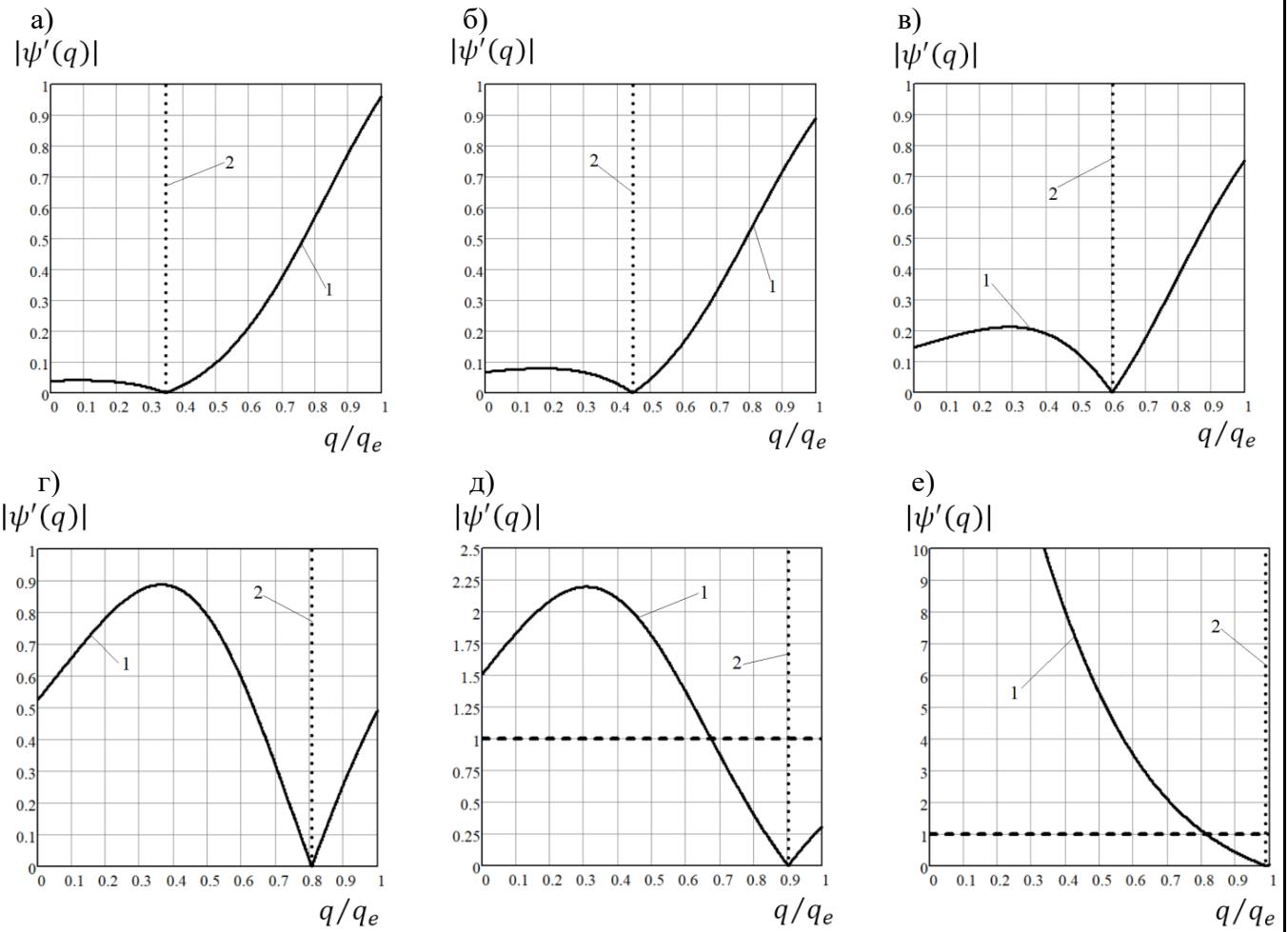


Рис. 4. Графическое представление условия сходимости (14) для итерационного процесса (5), (6): 1 – правая часть неравенства (14); 2 – 6 – левые части неравенства (14) для различных относительных коэффициентов эластичности по цене: 2 –  $\bar{E}_p = 0.5$ ; 3 –  $\bar{E}_p = 1$ ; 4 –  $\bar{E}_p = 2$ ; 5 –  $\bar{E}_p = 5$ ; 6 –  $\bar{E}_p = 10$

Оценим изменение области сходимости итерационной процедуры (5), (6) в зависимости от значений относительного коэффициента эластичности по цене  $\bar{E}_p$  с помощью формулировок (13) и (14) достаточного условия сходимости (см. рис. 3 и 4). С увеличением относительного коэффициента эластичности по цене правая граница области сходимости итерационного процесса (5), (6) смещается влево (см. рис. 3 и 4), вследствие чего допустимая область для поиска оптимального значения  $q^*$  уменьшается, и при больших значениях  $\bar{E}_p$  оптимальное  $q^*$  может не попасть в область сходимости. Соответственно, требование сжимаемости отображения (6) не будет выполняться, и итерационный процесс будет расходящимся, что графически подтверждается на рис. 1, e. При малых значениях относительного коэффициента эластичности  $\bar{E}_p$  допустимая область сходимости расширяется, приближаясь к границе  $q_e$ , т. е. захватывая область решений  $0 < q < q_e$ . На практике это выражается в более высокой скорости сходимости итерационного процесса (5), (6), что наглядно изображено на рис. 1, a-в.

Согласно рис. 5, a-в отображение  $\psi$  (16) с помощью метода Ньютона является сжимающим при  $\bar{E}_p \leq 1$ . Для больших значений  $\bar{E}_p > 1$  достаточное условие сходимости  $|\psi'(q)| < 1$  для некоторых  $q$  не выполняется (см. рис. 5 д, е). С увеличением относительного коэффициента эластичности по цене область невыполнения достаточного условия сходимости расширяется, смещаясь вправо (см. рис. 5), к  $q = q_e$ . При этом оптимальное значение  $q_*$  приближается к равновесному значению  $q_e$ , в окрестности которого условие  $|\psi'(q)| < 1$  выполняется, в результате чего для представленных исходных данных оптимальные значения  $q_*$  на основании итерационной процедуры (15), (16) достигаются менее чем за 10 итераций.



1 – функция  $|\psi'(q)|$ , 2 –  $q = q^{(n)}$ , для различных относительных коэффициентов

Рис. 5. Графическая проверка достаточного условия сходимости итерационной процедуры (15), (16), эластичности по цене: а –  $\bar{E}_p = 0.5$ ; б –  $\bar{E}_p = 1$ ; в –  $\bar{E}_p = 2$ ; г –  $\bar{E}_p = 5$ ; д –  $\bar{E}_p = 10$ ; е –  $\bar{E}_p = 100$

**Заключение.** В рамках проведённого исследования получены условия сходимости итерационной процедуры (5), (6) при решении задачи максимизации излишка производителя для нелинейных экспоненциальных кривых спроса и предложения, представлено несколько эквивалентных формулировок достаточного условия сходимости с помощью функций спроса и предложения, коэффициентов эластичности по цене. Проведена оценка сходимости итерационного процесса для задачи максимизации излишка производителя с помощью метода Ньютона. Сравнивая сходимость итерационных процедур (5), (6) и (15), (16) для поиска оптимального значения объёма продукции  $q_*$ , отметим, что при малых значениях относительного коэффициента эластичности  $\bar{E}_p \leq 1$  оба итерационных процесса показывают хорошую сходимость. Итерационная процедура (5), (6) имеет более простую запись, но для её сходимости требуется большее количество итераций в сравнении с более сложной итерационной процедурой (15), (16) согласно методу Ньютона, но имеющей более высокую скорость сходимости. Для значений относительного коэффициента эластичности  $\bar{E}_p > 1$  итерационная процедура (5), (6) может расходиться, в то время как итерационная процедура (15), (16) показывает хорошую сходимость при выборе начального приближения, равного равновесному значению объёма продаж.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чепурнова, Е. К. Математическая модель оптимизации прибыли с ограничениями на стоимость и количество продаваемых услуг / Е. К. Чепурнова, И. К. Андрianов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № 1 (65). – С. 16-24.
2. Chepurnova, E. K. Assessment of the Impact of Costs on the Profit Optimization Model for the Sale of Services / E. K. Chepurnova, I. K. Andrianov // Components of Scientific and Technological Progress. – 2022. – No. 11 (77). – P. 14-18.
3. Andrianov, I. K. Maximizing Profits from Sales of Independent Goods or Services in Conditions of Elastic Demand under Nonlinear Constraints / I. K. Andrianov, E. K. Chepurnova // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – No. 3 (81). – P. 56-60.
4. Кирик, Е. Е. Подход к решению нелинейных оптимизационных задач блочной структуры со связующими ограничениями / Е. Е. Кирик // Научные вести Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – 2015. – № 5 (103). – С. 32-38.
5. Попов, А. А. Применение генетических алгоритмов для решения задач оптимизации в экономике / А. А. Попов, А. Ю. Маркова // Известия Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова. – 2011. – № 1 (1). – С. 46-56.
6. Набатова, Д. С. Методы многоокритериальной оптимизации для слабоструктурированных проблем в задачах экономики / Д. С. Набатова // Современная математика и концепции инновационного математического образования. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 366-372.
7. Маркина, М. В. Многокритериальные задачи оптимизации в экономике / М. В. Маркина // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2014. – № 4-1. – С. 416-421.
8. Sukharev, O. S. Optimization and resource distribution management in a national economy: The choice of structure / O. S. Sukharev // Perm University Herald. Economy. – 2020. – Vol. 15, No. 2. – P. 178-197.
9. Губарева, Е. А. Математическая составляющая оптимального управления / Е. А. Губарева, Г. Ю. Паршикова, А. А. Перфильев // Мягкие измерения и вычисления. – 2022. – Т. 53. – № 4. – С. 65-74.
10. Tsatsulin, A. N. An iterative procedure of consumer research in a narrow market segment / A. N. Tsatsulin, A. V. Babkin // St.Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics. – 2015. – No. 5 (228). – P. 108-117.
11. Горбатков, С. А. Метод структурного синтеза нейросети, интегрированный с квазибайесовской регуляризацией нейросетевой динамической модели банкротств / С. А. Горбатков, С. А. Фархиева // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 8 (121). – С. 952-958.
12. Крапухина, Н. В. Методы искусственного интеллекта в задачах оперативного управления и оптимизации сложных технологических комплексов / Н. В. Крапухина, К. М. Пастухова, П. А. Свиридов // Проблемы управления. – 2003. – № 3. – С. 21-24.
13. Филатов, А. Ю. Микроэкономика: учеб. пособие / А. Ю. Филатов. – 1-е изд. – Москва: Изд-во Юрайт, 2023. – 204 с.
14. Кулакова, С. В. Численные методы: учеб. пособие / С. В. Кулакова. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2018. – 124 с.



Грабарь Д. М., Иванов Ю. С.  
D. M. Grabar, Y. S. Ivanov

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

### INVESTIGATION OF METHODS AND ALGORITHMS FOR PATTERN RECOGNITION IN IMAGES

**Грабарь Даниил Михайлович** – магистр кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: grabardm@ml-dev.ru.

**Daniil M. Grabar** – Master's Degree Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: grabardm@ml-dev.ru.

**Иванов Юрий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: ivanov\_ys@icloud.com.

**Yuriii S. Ivanov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov\_ys@icloud.com.

**Аннотация.** В статье проведены исследование методов и разработка алгоритмов распознавания образов на изображениях в колаборативных роботизированных системах. Проведён обзор существующих подходов и алгоритмов, включая методы машинного обучения, обработки изображений и компьютерного зрения. Подготовлен сравнительный анализ проведённых экспериментов с использованием различных наборов данных Crowd Pose, COCO, Pose Track. Точность работы алгоритмов вычислялась с помощью метрики AP. Описаны алгоритмы калибровки мультикамерных систем по шаблону. В качестве объединения локальных декартовых систем координат в глобальную декартовую систему координат использовалась триангуляция данных с использованием прямого линейного преобразования.

**Summary.** The article investigates methods and develops algorithms for pattern recognition in images in collaborative robotic systems. The review of existing approaches and algorithms, including methods of machine learning, image processing and computer vision, is carried out. A comparative analysis of the conducted experiments using various datasets Crowd Pose, COCO, Pose Track has been prepared. The accuracy of the algorithms was calculated using the AP metric. Algorithms of calibration of multi-cameral systems according to a template are described. As a combination of local Cartesian coordinate systems into a global Cartesian coordinate system, data triangulation using a direct linear transformation was used.

**Ключевые слова:** калибровка, ключевые точки, мультикамерная система, распознавание образов.

**Key words:** calibration, key points, multi-camera system, pattern recognition.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 22-71-10093 «Разработка и синтез перспективных мультимодальных адаптивных алгоритмов и методов управления поведением колаборативных робототехнических систем с учётом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде».*

УДК 004.855.5

**Введение.** В концепции Индустрия 4.0 [1] роботы стали обычным явлением, как и развитие многих технологий. Наиболее распространённой областью, помимо робототехники, стала область ИИ (искусственный интеллект). Основным недостатком Индустрии 4.0 выступил тот факт, что всё производство построено без вмешательства человека в технологический процесс. Выполнение

специфических задач, НИР и ОКР на производстве, где требуется непосредственное взаимодействие робот-человек, стало невозможным. Для решения текущей проблемы была предложена концепция Индустрия 5.0 [2]. Стратегические методы интеграции людей с роботами необходимы для получения максимальной эффективности технологических процессов, так были созданы совершенно новые роботы, которые получили название «коботы» [3]. Важной особенностью кобота является совместная работа человека и робота. Хотя роботы гораздо более точны и эффективны, чем люди, излишняя автоматизация бесполезна. Роботы неспособны мыслить и негибки, что делает их чрезмерное использование вредным. Коботы позволяют безопасно взаимодействовать с внешней средой за счёт встроенных датчиков. При этом внутренняя сенсорика не позволяет оценить всю обстановку вокруг робота, что может пагубно повлиять на время исполнения и потреблённую электроэнергию заранее выстроенной программы.

**Постановка задачи.** Задачу повышения эффективности распознавания объектов на видеоданных с мультикамерной системы для предотвращения нештатных ситуаций в экстремальных условиях работы с роботизированными колаборативными комплексами сформулируем следующим образом. По поступающему видеопотоку с установленных по разным сторонам камер наблюдения необходимо распознать и локализовать в пространстве, а также построить динамическую модель предсказаний движений человека в зоне работы колаборативного робота.

Алгоритмы обнаружения и локализации ключевых точек в мировой системе координат разбиваются на решение нескольких подзадач:

- выполнение предварительной калибровки многокамерной системы и привязка её к системе координат колаборативного робота;
- выполнение обнаружения ключевых точек человека на отдельной камере;
- выполнение процесса триангуляции (реконструкции) обнаруженных точек.

**Исследование существующих методов и алгоритмов распознавания образов на изображениях.** Прежде чем переходить к процессу калибровки и триангуляции (реконструкции) точек, необходимо определиться с базовой моделью глубокого обучения по распознаванию образов на изображениях. На сегодняшний день большой популярностью пользуются модели, которые основываются на графическом подходе и пространственно-временных ассоциациях, использовании region-proposal слоёв, а также скрытых марковских моделях.

Основной структурой данных в графическом методе построения нейронных сетей является сам граф. Граф – тип структуры данных, состоящий из узлов и вершин. Графические нейронные сети – это специализированные типы нейронных сетей, которые могут работать с графическим форматом данных. Существует несколько типов графических нейронных сетей: графические свёрточные нейронные сети [4] (GCNN, от англ. Graph Convolutional Neural Networks), сети автоматического кодирования графов [5], рекуррентные графические нейронные сети (RGNN, от англ. Recurrent Graph Neural Networks) [6].

Методы построения нейронных сетей, использующие region-proposal (RPN, от англ. Region Proposal Network) слои, представляют собой полностью свёрточную сеть, которая одновременно предсказывает границы объекта и оценки в каждой позиции. RPN проходит сквозное обучение для создания высококачественных предсказаний по регионам изображения.

Скрытые марковские модели (СММ) используют статистические свойства сигналов и учитывают непосредственно их пространственные характеристики, поэтому они широко применяются в задачах распознавания как речи, так и изображений. Элементами СММ являются множество наблюдаемых символов, множество различных состояний, набор различных наблюдаемых символов, вектор начальных состояний, матрица переходных вероятностей, матрица вероятностей наблюдаемых символов.

В сравнительном анализе использовались следующие модели: Mask R-CNN [7], AlphaPose [8], HigherHRNet-W48 [9], SPPE [10], OpenPose [11], Assoc. Emb [12], PersonLab [13], MultiPoseNe [14], HigherHRNe [9], openSVAI [15], MIPAL [16], Miracle [17], MSRA/FlowTrack [18], STAF [19] и OpenPifPaf [20]. Вышеописанные модели основаны на нескольких методах. Часть из них относится к методам обнаружения ключевых точек, основанных на графовом подходе и простран-



ственno-временных ассоциациях. Другая часть основывается на использовании region-proposal слоёв и марковских процессов принятия решений.

Для сравнения работы алгоритмов использовались следующие наборы данных:

– Crowd Pose: в наборе [10] предлагается набор поз толпы. Индекс изображения представляет собой степень перекрытия между ограничивающими рамками людей. Набор данных разделён на 10 000 изображений, предназначенных для обучения: 2000 – для проверки и 8000 – для тестового набора.

– COCO: стандартный набор данных для прогнозирования ключевых точек человека [21]. COCO содержит 56 599 разнообразных обучающих изображений с аннотированными ключевыми точками; набор для проверки и тестирования содержит соответственно 5000 и 20 288 изображений.

– Pose Track 2017 и 2018: наборы данных содержат короткие видеоряды с аннотированными и отслеживаемыми позами людей в различных ситуациях. Набор данных Pose Track 2018 содержит 593 сцены обучения, 170 сцен проверки и 375 тестовых сцен.

Для оценки набора данных Crowd Pose и COCO используется метрика оценки сходства ключевых точек объекта (OKS, от англ. Object Keypoint Similarity) [10, 21] для присвоения ограничивающей рамки каждой ключевой точке. Аналогично обнаружению, метрика накладывается между базовым значением и предсказанными ограничивающими рамками для вычисления стандартных показателей обнаружения средней точности (AP, от англ. Average Precision) и средней полноты (AR, от англ. Average Recall). В Crowd Pose тестовый набор разбит на разные уровни изображений: AP<sub>easy</sub>, AP<sub>medium</sub> и AP<sub>hard</sub>. Набор AP<sub>easy</sub> содержит изображения с индексом в диапазоне от 0 до 0.1, AP<sub>medium</sub> – от 0.1 до 0.8, AP<sub>hard</sub> – от 0.8 до 1.

Для оценки Pose Track 2017 и 2018 используется точность отслеживания нескольких объектов (MOTA, от англ. Multi Object Tracker Accuracy). Метрика объединяет ложноположительные (False Positive) результаты, ложноотрицательные (False Negative) результаты и переключатели идентификаторов в единую метрику.

В табл. 1-3 приведены сравнительные показатели выбранных нейросетевых моделей.

Наилучший результат в распознавании показывает модель OpenPifPaf. Модель лучше справляется со статическими изображениями, чем с динамическими. Высокую точность обеспечивают блоки PIF (от англ. Part Intensity Field) и PAF (от англ. Part Association Field), которые совместно обнаруживают и формируют пространственно-временные ассоциации ключевых точек за один этап, что делает её первым алгоритмом обнаружения и отслеживания позы в реальном времени [20].

На вход нейронной сети подаётся изображение размером  $H \times W$  с тремя цветовыми каналами. Кодировщик на основе нейронной сети создаёт поля PIF и PAF с каналами 17x5 и 19x7. После декодер преобразует поля PIF и PAF в оценки позы, содержащие по 17 суставов. Каждое соединение представлено координатами  $x$  и  $y$ . В качестве кодера используется ResNet. Блоки PIF и PAF представляют собой свёртки размером 1x1, за которыми следуют свёртки субпикселей. Эти блоки обучены обнаруживать и связывать ключевые точки.

Таблица 1

Сравнительная характеристика работы различных моделей на наборе данных Crowd Pose

Модель	Метрика						
	AP	AP <sup>0.5</sup>	AP <sup>0.75</sup>	AP <sub>easy</sub>	AP <sub>medium</sub>	AP <sub>hard</sub>	FPS
Mask R-CNN	57.2	83.5	60.3	69.4	57.9	45.8	2.9
AlphaPose	61.0	81.3	66.0	71.2	61.4	51.1	10.9
HigherHRNet-W48	65.9	86.4	70.6	73.3	66.5	57.9	-
SPPE	66.0	84.2	71.5	75.5	66.3	57.4	10.1
HigherHRNet-W48+	67.6	87.4	72.6	75.8	68.1	58.9	-
OpenPifPaf	70.5	89.1	76.1	78.4	72.1	63.8	13.7

Таблица 2

Сравнительная характеристика работы различных моделей на наборе данных COCO

Модель	Метрика			
	AP	AP <sub>medium</sub>	AP <sub>easy</sub>	t[мс]
OpenPose	61.8	57.1	68.2	100
Assoc. Emb	65.5	60.6	72.6	166
PersonLab	68.7	64.1	75.5	-
MultiPoseNet	69.6	65.0	76.3	43
HigherHRNet	70.5	66.6	75.8	>1000
OpenPifPaf	71.9	68.5	77.4	69

Таблица 3

Сравнительная характеристика работы различных моделей на наборе данных Pose Track

Модель	Метрика		
	MOTA	AP	FPS
openSVAI	54.5	63.1	-
MIPAL	54.9	67.8	-
Miracle	57.4	70.9	-
MSRA/FlowTrac	61.4	74.0	0.7
STAF	53.8	70.3	3
MIPAL	54.5	68.8	-
MSRA/FlowTrack	57.8	74.6	0.7
HRNet	57.9	74.9	-
LightTrack	58.0	66.6	-
OpenPifPaf	60.6	71.5	12.2
KeyTrack	61.2	74.0	1.0

**Калибровка камеры.** Одним из важных пунктов корректного определения ключевых точек в пространстве служит калибровка камеры. Под калибровкой камеры понимается определение её внутренних параметров, в данном случае матрицы камеры  $K$ . Модель камеры можно обобщить, включив в неё радиальную дисторсию и другие артефакты, если приложение нуждается в призонах измерениях. В большинстве случаев простой модели достаточно. Стандартный способ калибровки камеры – многократное фотографирование рабочей области в виде шахматной доски. Такой метод используется в библиотеке OpenCV, которая применяется в данной работе [22].

Рассмотрим простой метод калибровки. Большинство параметров можно задать, приняв простые предположения, так что основную сложность представляет определение фокусного расстояния. Для описываемого метода необходим плоский прямоугольный калибровочный объект, рулетка или линейка и плоская поверхность, при этом выполним ряд условий:

- измерить стороны прямоугольного калибровочного объекта (обозначим их как  $dX$  и  $dY$ );
- положить камеру и калибровочный объект на плоскую поверхность так, чтобы обратная сторона камеры была параллельно объекту и объект находился примерно в центре поля зрения камеры;
- измерить расстояния между камерой и калибровочным объектом (обозначим его как  $dZ$ );
- сделать снимок и проверить, что стороны объекта совмещаются со строками и столбцами матрицы изображения;
- измерить ширину и высоту объекта в пикселях (обозначим их как  $dx$  и  $dy$ ).

Из подобия треугольников вытекает следующая формула, дающая компоненты фокусного расстояния:

$$f = \frac{dx}{dX} * dZ, f = \frac{dy}{dY} * dZ.$$

Камера использовалась с точечной диафрагмой.

Процесс калибровки и размещения камер представлен на рис. 1-2.

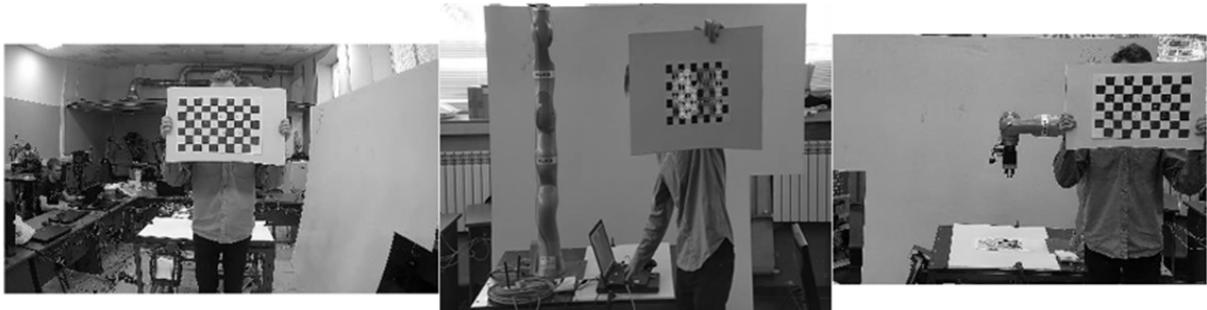


Рис. 1. Калибровка камеры по шаблону

После калибровки камеры формируется матрица **A**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{f}{w} & 0 & c_{x_0} \\ 0 & \frac{f}{h} & c_{y_0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $c_{x_0}$  и  $c_{y_0}$  – естественные координаты главной точки относительно начала координат камеры;  $w$  и  $h$  – соответственно масштабы вдоль осей  $x$  и  $y$ ;  $f$  – расстояние от оптического центра.

Кроме матрицы **A**, формируется вектор искажений **r**. С помощью уравнения Эйлера получаем повороты углов по осям  $x$  (тангаж) и  $y$  (рысканье).

Для триангуляции точек в пространстве недостаточно матрицы поворотов и информации о камере. Необходимо определить исходную точку в мировой системе координат и её ориентацию. Простым способом служит выбор позиции камеры № 1 в качестве источника мирового пространства. В общем случае система координат камеры № 1 определяется как находящаяся за экраном камеры точка (*см. рис. 3*).

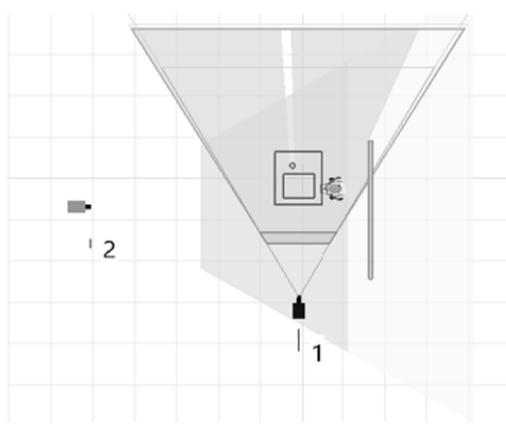


Рис. 2. Наблюдаемая сцена

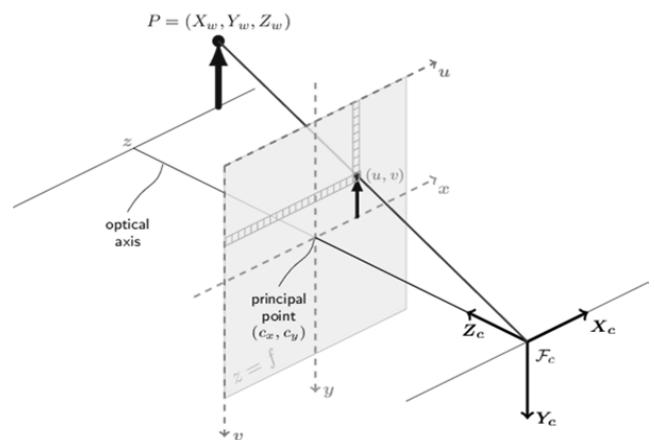


Рис. 3. Процесс триангуляции

**Процесс триангуляции (реконструкции) распознанных точек.** После того как были определены основные алгоритмы по распознаванию образов на изображении, а также откалиброваны камеры необходимо объединить распознанные точки в одном 3D-пространстве. Для объединения используются прямые линейные преобразования (DLT, от англ. Direct Linear Transforms). Метод DLT основан на разложении по сингулярным значениям (SVD, от англ. Singular Value Decomposition) [23].

DLT – метод вычисления матричного уравнения вида  $\mathbf{Ax} = 0$ , где  $\mathbf{A}$  – некоторая матрица и  $\mathbf{x}$  – векторная неизвестная, которые необходимо найти. Предположим, у нас есть трёхмерная точка в реальном пространстве с координатами, заданными как  $\mathbf{X} = [x, y, z, w]$ . Предположим, мы наблюдаем эту точку с помощью двух камер, которые имеют пиксельные координаты  $\mathbf{U}_1 = [u_1, v_1, 1]$  для камеры № 1 и  $\mathbf{U}_2 = [u_2, v_2, 1]$  для камеры № 2. Используя матрицу проекции камеры  $\mathbf{P}_1$ , мы можем записать  $\mathbf{U}_1$  как

$$\overrightarrow{\mathbf{U}}_1 = \alpha \mathbf{P}_1 \vec{\mathbf{x}}.$$

В задаче триангуляции (триангуляция – процесс определения точки в трёхмерном пространстве с учётом её проекций на два или более изображений) не известен вектор  $\mathbf{x}$ . Можно определить координаты пикселей, а также предположить, что мы нашли проекционную матрицу с помощью калибровки камеры. Задача состоит в нахождении неизвестных в  $\mathbf{x}$ . Поскольку  $\mathbf{U}_1$  и  $\mathbf{P}_1 \mathbf{x}$  являются параллельными векторами, их перекрёстное произведение должно быть равно нулю:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overrightarrow{\mathbf{P}}_1 \vec{\mathbf{x}} \\ \overrightarrow{\mathbf{P}}_2 \vec{\mathbf{x}} \\ \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 \vec{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 \vec{\mathbf{x}} - \overrightarrow{\mathbf{P}}_2 \vec{\mathbf{x}} \\ \overrightarrow{\mathbf{P}}_1 \vec{\mathbf{x}} - u_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 \vec{\mathbf{x}} \\ u_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_2 \vec{\mathbf{x}} - v_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_1 \vec{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 - \overrightarrow{\mathbf{P}}_2 \\ \overrightarrow{\mathbf{P}}_1 - u_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 \\ u_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_2 - v_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_1 \end{bmatrix} \vec{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Вышеприведённое уравнение формирует уравнение вида  $\mathbf{Ax} = 0$ . Но третья строка представляет собой линейную комбинацию первых двух строк, которая затем формирует только 2 системы уравнений, чего недостаточно для решения 3 неизвестных в  $\mathbf{x}$ . Это ожидаемо, поскольку невозможно определить 3D-координату с одного вида камеры. Поскольку используется две камеры, расширим матрицу, чтобы иметь больше строк. Фактически просто добавляется больше строк для любого количества просмотров:

$$\mathbf{A}\vec{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} v_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 - \overrightarrow{\mathbf{P}}_2 \\ \overrightarrow{\mathbf{P}}_1 - u_1 \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 \\ v_2 \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 - \overrightarrow{\mathbf{P}}_2 \\ \overrightarrow{\mathbf{P}}_1 - u_2 \overrightarrow{\mathbf{P}}_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \vec{\mathbf{x}} = 0.$$

При триангуляции камеры нам задаётся  $\mathbf{A}$  и требуется определить  $\mathbf{x}$ . В этой настройке используем DLT для определения  $\mathbf{x}$ .

Необходимо получить нетривиальное решение уравнения вида  $\mathbf{Ax} = 0$ . Поскольку возможен некоторый шум, запишем уравнение в виде  $\mathbf{x} = \mathbf{w}$  и решим уравнение для таких  $\mathbf{x}$ , что  $\mathbf{w}$  было сведено к минимуму. Первым шагом является определение SVD-разложения  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A}\vec{\mathbf{x}} = \mathbf{USV}^T \vec{\mathbf{x}}.$$

Наша цель – минимизировать  $\mathbf{w}$  для некоторых  $\mathbf{x}$ . Это можно сделать, взяв скалярное произведение:

$$\vec{\mathbf{w}}^T \vec{\mathbf{w}} = (\vec{\mathbf{x}}^T \mathbf{V} \mathbf{S} \mathbf{U}^T) \cdot (\mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \vec{\mathbf{x}}) = \vec{\mathbf{x}}^T \mathbf{V} \mathbf{S}^2 \mathbf{V}^T \vec{\mathbf{x}},$$

где  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$  – ортонормированные матрицы, а  $\mathbf{S}$  – диагональная матрица. Записи на диагонали  $\mathbf{S}$  уменьшаются, так что последняя запись на диагонали является минимальным значением. Это га-

рантируется разложением SVD. Используем свойство, что  $\mathbf{V}$  является ортонормированной матрицей, если мы просто выбираем  $\mathbf{x}$  – один из векторов столбцов  $\mathbf{V}^T$ :

$$\vec{\mathbf{v}}_i^T \mathbf{V} \mathbf{S}^2 \mathbf{V}^T \vec{\mathbf{v}}_i = s_i^2.$$

Минимальное значение получается, если мы выбираем вектор последнего столбца  $\mathbf{V}$  как  $\mathbf{x}$ . Таким образом, было решено уравнение вида  $\mathbf{x} = \mathbf{w}$  с присутствием шума. Если шума нет, метод SVD всё равно будет работать.

После проведения прямого линейного преобразования появляется возможность размещения распознанных образов на изображениях в 3D-пространстве. На рис. 4 приведены полученные результаты.



Рис. 4. Триангуляции распознанных точек в 3D-пространстве

Из рис. 4 видно, как модель OpenPifPaf справляется с распознанными точками. С помощью DLT преобразования отстраивается 3D-модель по ключевым точкам в пространстве.

**Выводы.** В работе проведён сравнительный анализ методов распознавания образов на изображениях. Методы, основывающиеся на использовании region-proposal слоёв и марковских процессов принятия решений, в сравнении с методом, основывающимся на графическом подходе и пространственно-временных ассоциациях, демонстрируют низкие метрические показатели. Тестирование проводилось на трёх разных наборах данных: Crowd Pose; COCO; Pose Track. В качестве оценки адекватности работы модели использовались следующие метрические показатели: для набора данных Crowd Pose и COCO – AP; для набора данных Pose Track – MOTA.

На основе выбранного нейросетевого алгоритма распознавания ключевых точек на теле человека удалось построить динамическую модель предсказаний движений человека в зоне работы коллаборативного робота. Процесс был реализован при помощи использования откалиброванной мультикамерной системы и триангуляции данных распознанных ключевых точек на теле человека.

В результате анализа был выявлен наилучший алгоритм (OpenPifPaf) по метрическим показателям, который основан на графическом подходе и пространственно-временных ассоциациях. Полученный результат позволил сформировать дальнейшее видение разработки и синтеза мультимодальных адаптивных алгоритмов при работе с коллаборативными робототехническими системами с учётом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде.

## ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 59799-2021. Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0) = Smart manufacturing. Reference architecture model industry 4.0 (RAMI 4.0): издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 октября 2021 г. № 1301-ст: введён впервые: дата введения 2022-04-30 / подготовлен Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – М.: ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – 36 с.

2. Индустрия 5.0: Основы создания системной тетрады киберсоциальных экосистем / А. В. Бабкин, И. В. Либерман, П. М. Клачек, Е. В. Шкарупета // Вестник АГТУ. Серия: Экономика. – 2023. – № 1. – С. 171-174.
3. Галин, Р. Р. Эффективное функционирование коллаборативной робототехнической системы в едином пространстве / Р. Р. Галин, С. Б. Камешева // Известия КБНЦ РАН. – 2021. – № 1 (99). – С. 5-14.
4. Chen Q., Wu R. CNN is all you need // arXiv preprint arXiv:1712.09662. – 2017.
5. Makhzani A. et al. Adversarial autoencoders // arXiv preprint arXiv:1511.05644. – 2015.
6. Zhang Y., Huang D., Wang Y. PC-RGNN: Point cloud completion and graph neural network for 3D object detection // Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. – 2021. – Т. 35. – № 4. – Р. 3430-3437.
7. He K. et al. Mask r-cnn // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – Р. 2961-2969.
8. Fang H. S. et al. Rmpe: Regional multi-person pose estimation // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – Р. 2334-2343.
9. Cheng B. et al. Higherhrnet: Scale-aware representation learning for bottom-up human pose estimation // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2020. – Р. 5386-5395.
10. Li J. et al. Crowdpose: Efficient crowded scenes pose estimation and a new benchmark // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2019. – Р. 10863-10872.
11. Cao Z. et al. Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2017. – Р. 7291-7299.
12. Newell A., Huang Z., Deng J. Associative embedding: End-to-end learning for joint detection and grouping // Advances in neural information processing systems. – 2017. – Т. 30.
13. Papandreou G. et al. Personlab: Person pose estimation and instance segmentation with a bottom-up, part-based, geometric embedding model // Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). – 2018. – Р. 269-286.
14. Kocabas M., Karagoz S., Akbas E. Multiposenet: Fast multi-person pose estimation using pose residual network // Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). – 2018. – Р. 417-433.
15. Guo C. et al. OpenWSI: a low-cost, high-throughput whole slide imaging system via single-frame autofocusing and open-source hardware // Optics Letters. – 2020. – Т. 45. – № 1. – Р. 260-263.
16. Chen Y. et al. Cascaded pyramid network for multi-person pose estimation // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2018. – Р. 7103-7112.
17. Xiao B., Wu H., Wei Y. Simple baselines for human pose estimation and tracking // Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). – 2018. – Р. 466-481.
18. Raaj Y. et al. Efficient online multi-person 2d pose tracking with recurrent spatio-temporal affinity fields // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2019. – Р. 4620-4628.
19. Sun K. et al. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2019. – Р. 5693-5703.
20. Kreiss S., Bertoni L., Alahi A. Pifpaf: Composite fields for human pose estimation // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2019. – Р. 11977-11986.
21. Lin T. Y. et al. Microsoft coco: Common objects in context // Computer Vision–ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, Proceedings, Part V 13. – Springer International Publishing, 2014. – Р. 740-755.
22. Solem J. E., Programming Computer Vision with Python // O'Reilly Media Inc., 1005 Gravenstein Highway North Sebastopol, CA 95472, 2016. P. 84-117.
23. Direct Linear Transforms (DLT) // Temugeb. – URL: [https://temugeb.github.io/computer\\_vision/2021/02/06/direct-linear-transforms.html](https://temugeb.github.io/computer_vision/2021/02/06/direct-linear-transforms.html) (дата обращения: 10.03.2023). – Текст: электронный.



Жарикова Е. П., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.  
E. P. Zharikova, Ya. Yu. Grigoriev, A. L. Grigorieva

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕКИ АМУР

### ANALYSIS OF CHANGES IN SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE AMUR RIVER WATER SURFACE

**Жарикова Евгения Павловна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Evgeniia P. Zharikova** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Григорьев Ян Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Yan Yu. Grigoriev** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Григорьева Анна Леонидовна** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Anna L. Grigorieva** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Applied Mathematic Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Важный вопрос экологии связан с загрязнением водоёмов. Своевременная оценка возможных изменений водной среды, связанных с воздействием негативных факторов, не всегда возможна и требует дополнительных исследований качества воды. Для своевременного реагирования на нештатное изменение состава воды предлагается применение мультиспектрального анализа водной поверхности методами машинного обучения. Химический состав водных объектов зависит от большого числа факторов, а загрязнения имеют различную природу, поэтому в работе ограничивается область анализа: рассматривается поверхность реки Амур за период с 2020 по 2022 годы.

**Summary.** Pollution of water bodies is an important environmental problem. The cause of environmental abnormal situations is not always obvious, requiring additional water quality investigations. In order to respond to abnormal changes in water body composition in a timely manner, the authors propose using a multispectral water surface analysis approach using machine learning methods. Since the chemical compositions of water bodies vary as well as their pollution, it is necessary to limit the scope of research. This paper reflects the results of work on the surface analysis of the Amur River for the period from 2020 to 2022.

**Ключевые слова:** кластеризация, понижение размерности, искусственный интеллект, нейронные сети, спектральный анализ, машинное зрение, машинное обучение.

**Key words:** clustering, dimensionality reduction, artificial intelligence, neural networks, spectral analysis, machine vision, machine learning.

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

УДК 004.932.2

Проведённые исследования [2–8] показывают возможность детектирования загрязнений водных объектов при помощи мультиспектральных снимков. Гипотеза состоит в том, что на основе полученных спутниковых изображений можно провести анализ динамики состояния водной поверхности и определить время изменения химического состава вод реки Амур.

В работах [4–6] решается задача классификации загрязнений, в рассматриваемом исследовании не берутся в расчёт знания о возможных загрязнениях. Рассматривается задача анализа нескольких областей в течение продолжительного периода времени и выявления на основе алгоритмов кластеризации изменений водной поверхности реки Амур.

На основе исследований загрязнений водной поверхности [7] и спектральных каналов, применяемых при классическом анализе воды [10], определяются требования к набору данных, описанные в табл. 1. Дополнительным требованием является время получения снимка, позволяющее оценить динамику изменений.

Таблица 1  
Требования к спектральным каналам в обозначениях аппарата Sentinel-2LA

Название	Центральная длина волны, нм
1. Coastal aerosol	442.7
2. Blue	492.4
3. Green	559.8
4. Red	664.6
5. Vegetation red edge	704.1
6. Vegetation red edge	740.5
7. Vegetation red edge	782.8
8. NIR	832.8
9. Narrow NIR	864.7
10. SWIR – Cirrus	1373.5
11. SWIR	1613.7
12. SWIR	2202.4

Для каждой области обрабатывается четыре трёхканальных изображения, включающих все вышеописанные каналы.

На первом этапе производится разметка данных: определяются области, подлежащие анализу, содержащие только воду (см. рис. 1).



Рис. 1. Пример разметки изображения

На втором этапе формируются векторы признаков на основе изображений. Отдельный вектор представляет собой набор из 12 значений спектральных каналов для каждого выделенного пикселя.

На третьем этапе определяются матрицы корреляции спектральных каналов (см. рис. 2).

Полученные коэффициенты корреляции Пирсона свидетельствуют о высокой степени корреляции каналов ближнего инфракрасного спектра, что указывает на необходимость уменьшения количества спектральных каналов для построения конечной модели.



Рис. 2. Матрица корреляций спектральных каналов

Графики распределения значений рассматриваемых каналов, отражённые на рис. 3, имеют схожий вид для значений каналов с высокой корреляцией.

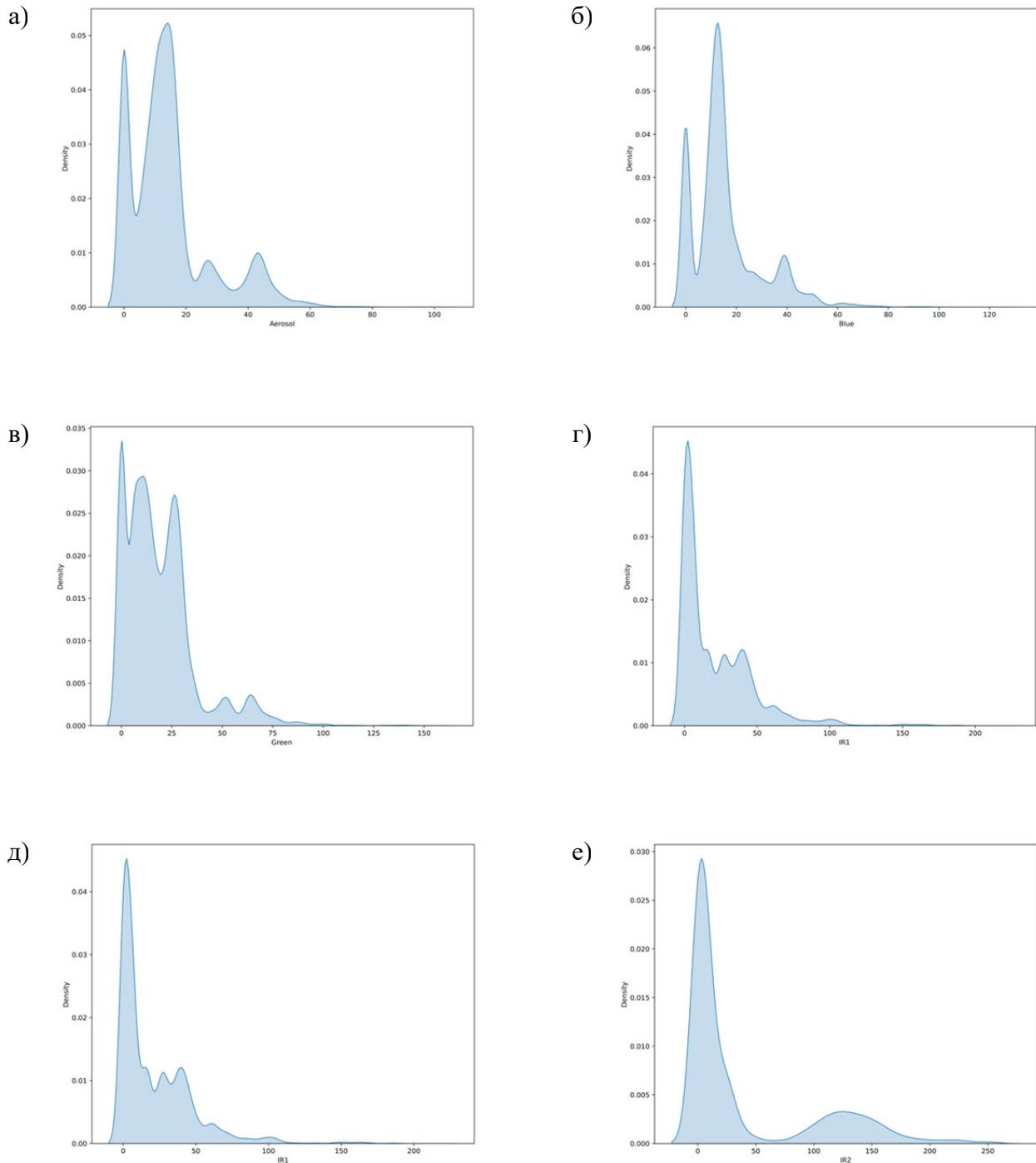


Рис. 3. Графики распределения значений каждого спектрального канала (начало):  
а – Coastal aerosol – 442.7 нм; б – Blue – 492.4 нм; в – Green – 559.8 нм; г – Red – 664.6 нм;  
д – Vegetation red edge – 704.1 нм; е – Vegetation red edge – 740.5 нм; ж – Vegetation red  
edge – 782.8 нм; з – NIR – 832.8 нм; и – Narrow NIR – 864.7 нм; к – SWIR – Cirrus – 1373.5 нм;  
л – SWIR – 1613.7 нм; м – SWIR – 2202.4 нм

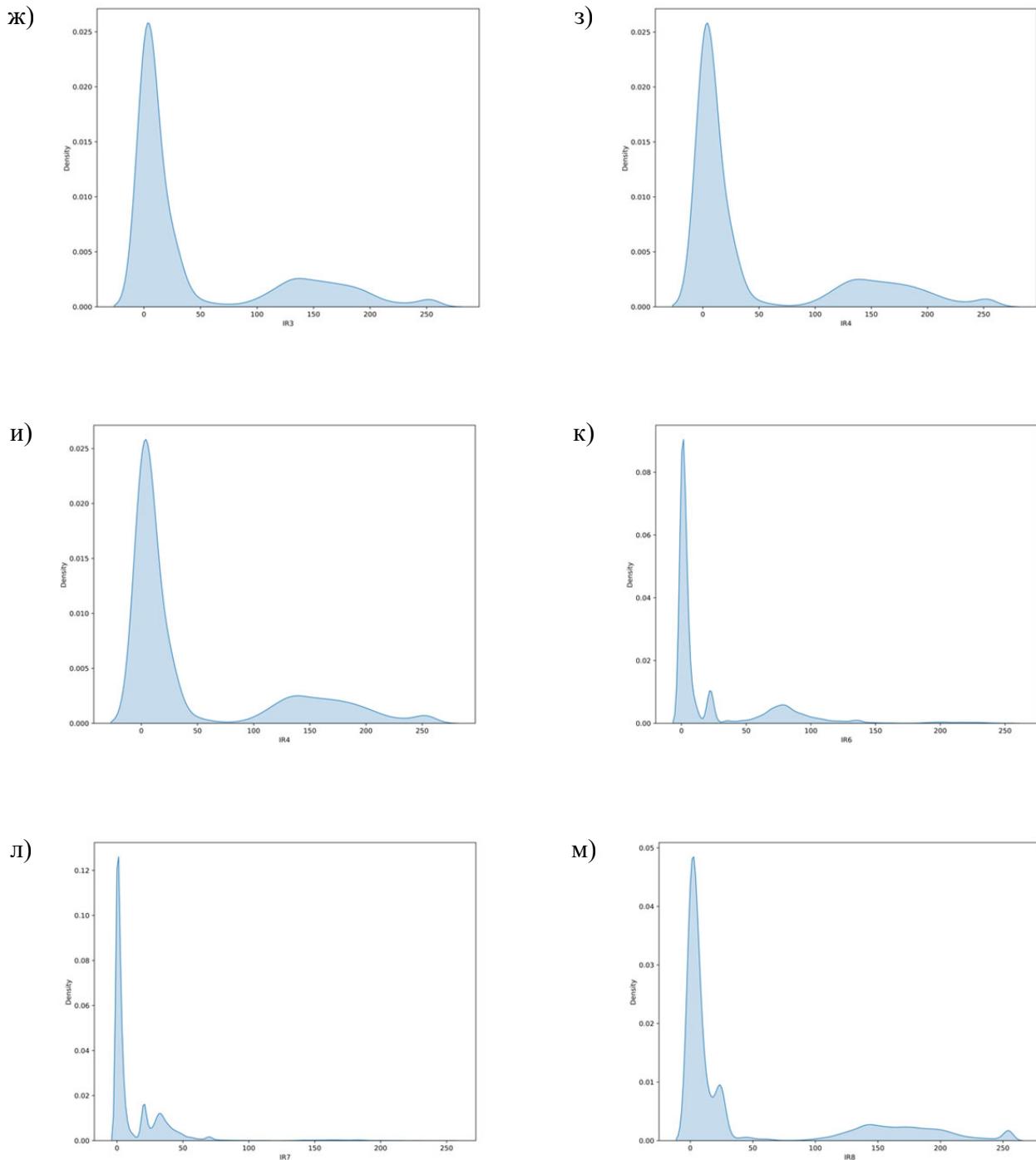


Рис. 3. Графики распределения значений каждого спектрального канала (продолжение):

а – Coastal aerosol – 442.7 нм; б – Blue – 492.4 нм; в – Green – 559.8 нм; г – Red – 664.6 нм;  
д – Vegetation red edge – 704.1 нм; е – Vegetation red edge – 740.5 нм; ж – Vegetation red  
edge – 782.8 нм; з – NIR – 832.8 нм; и – Narrow NIR – 864.7 нм; к – SWIR – Cirrus – 1373.5 нм;  
л – SWIR – 1613.7 нм; м – SWIR – 2202.4 нм

Несмотря на высокую корреляцию между спектральными каналами, первая кластеризация проводится со всеми спектральными каналами. Результат кластеризации для количества кластеров, равного 5 (предполагаемое количество кластеров), отражён на рис. 4.

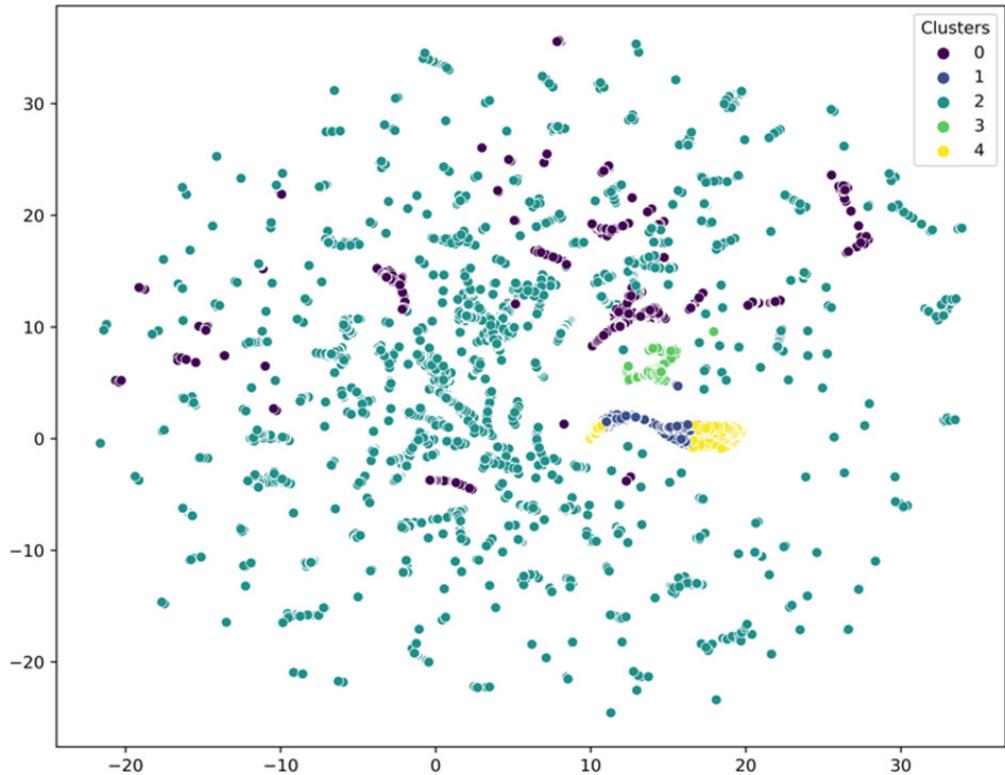


Рис. 4. Результат кластеризации для всего набора данных

Для визуализации и анализа полученных данных используется алгоритм нелинейного снижения размерности Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP). На изображении определяются общая масса и явно выделяющиеся кластеры, но требуется проверка достоверности полученных результатов. Обученная модель применяется к спутниковым снимкам двух областей реки Амур для визуальной оценки (на рис. 5, а – первая область; на рис. 5, б – вторая область).

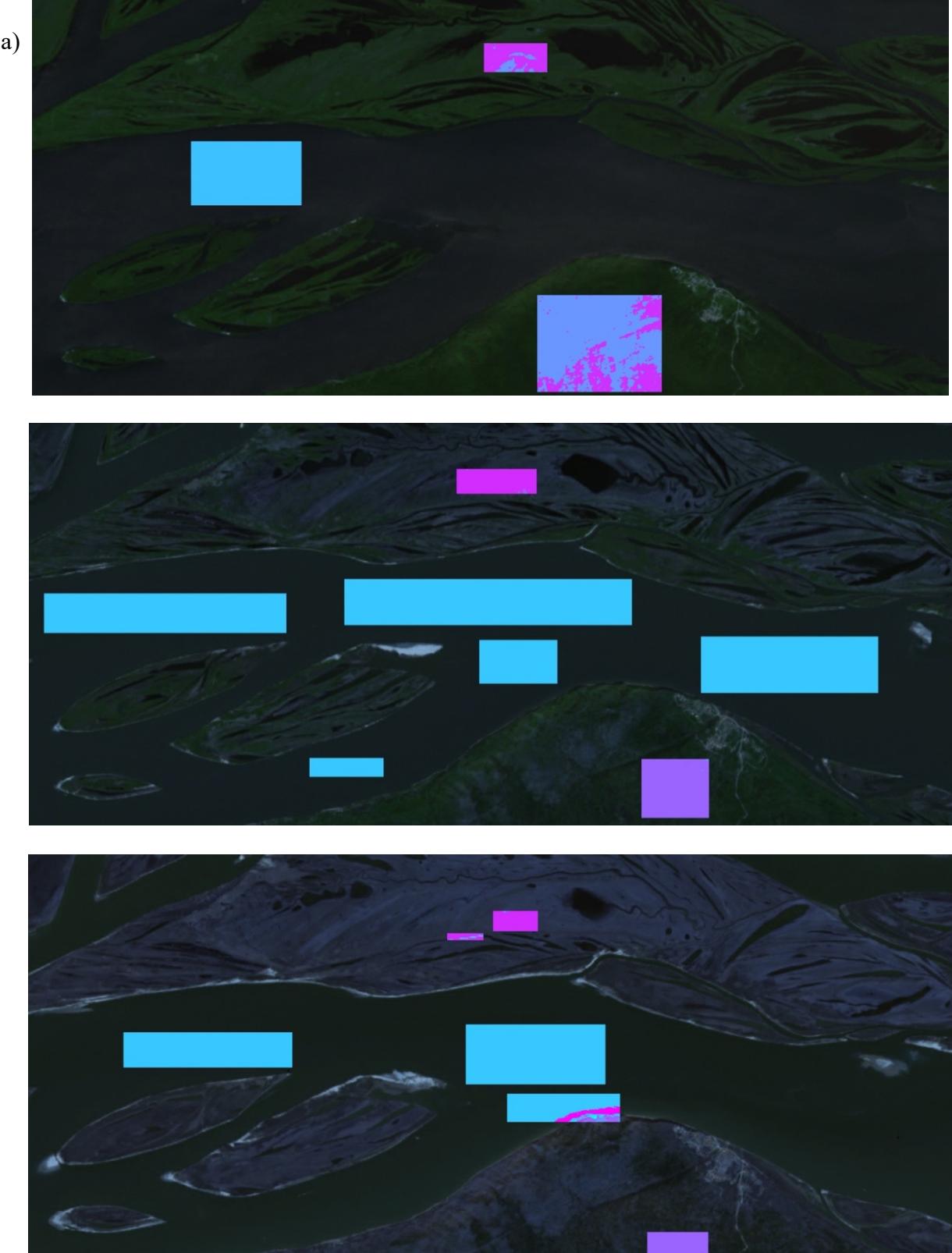


Рис. 5. Результаты обработки изображения обученным алгоритмом (начало):  
а – первая исследуемая область; б – вторая исследуемая область

б)

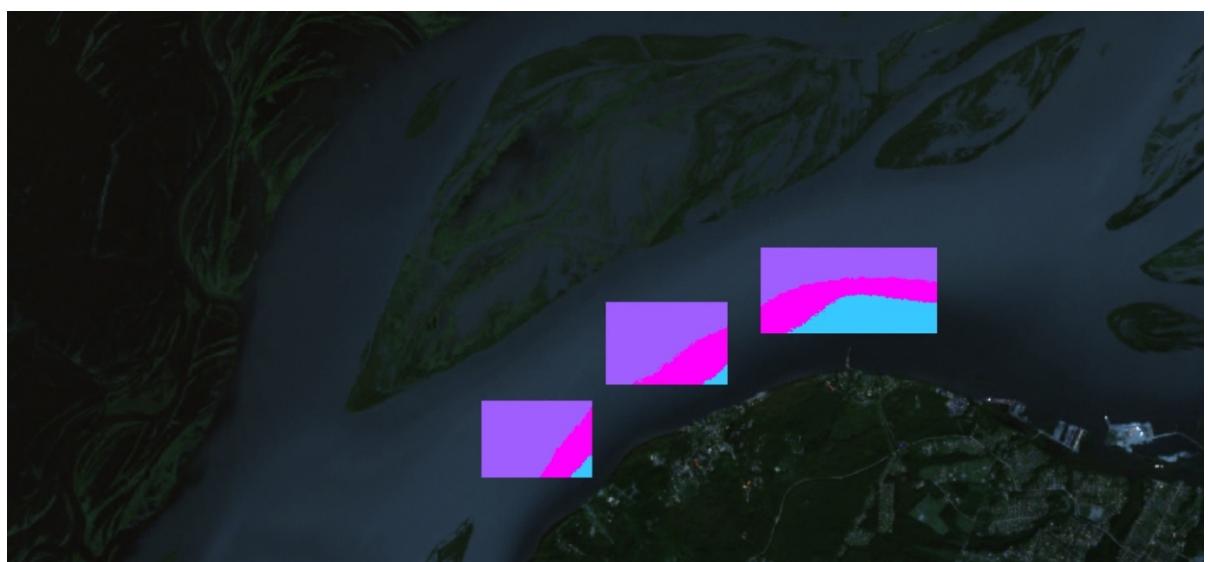
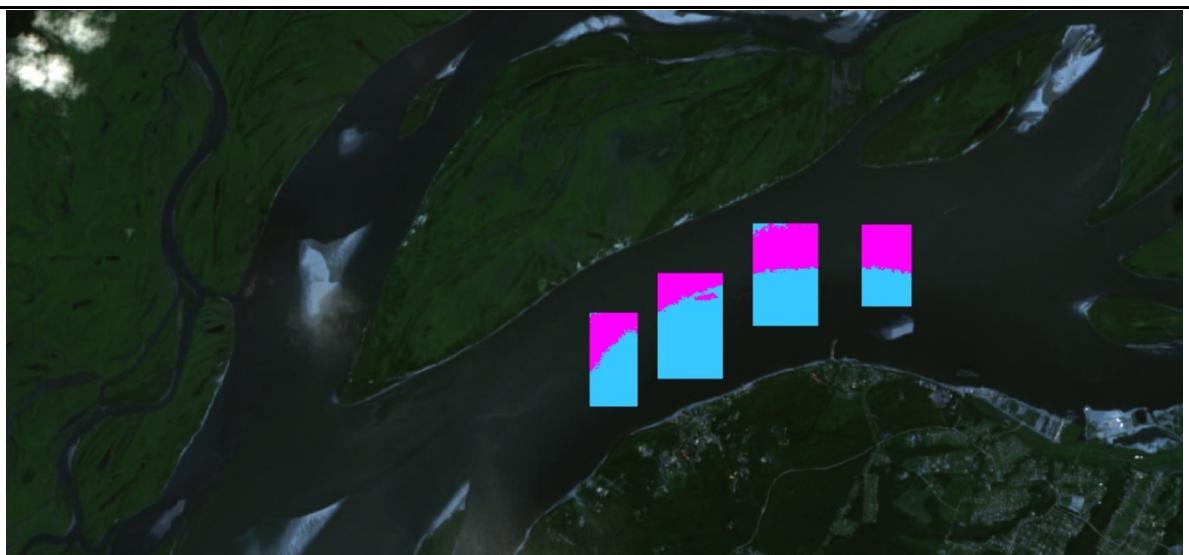


Рис. 5. Результаты обработки изображения обученным алгоритмом (продолжение):  
а – первая исследуемая область; б – вторая исследуемая область

Для обучения алгоритма кластеризации выбираются спектральные диапазоны: Aerosol, Green, Red, R1, R2, R7. Результаты кластеризации представлены на рис. 6.

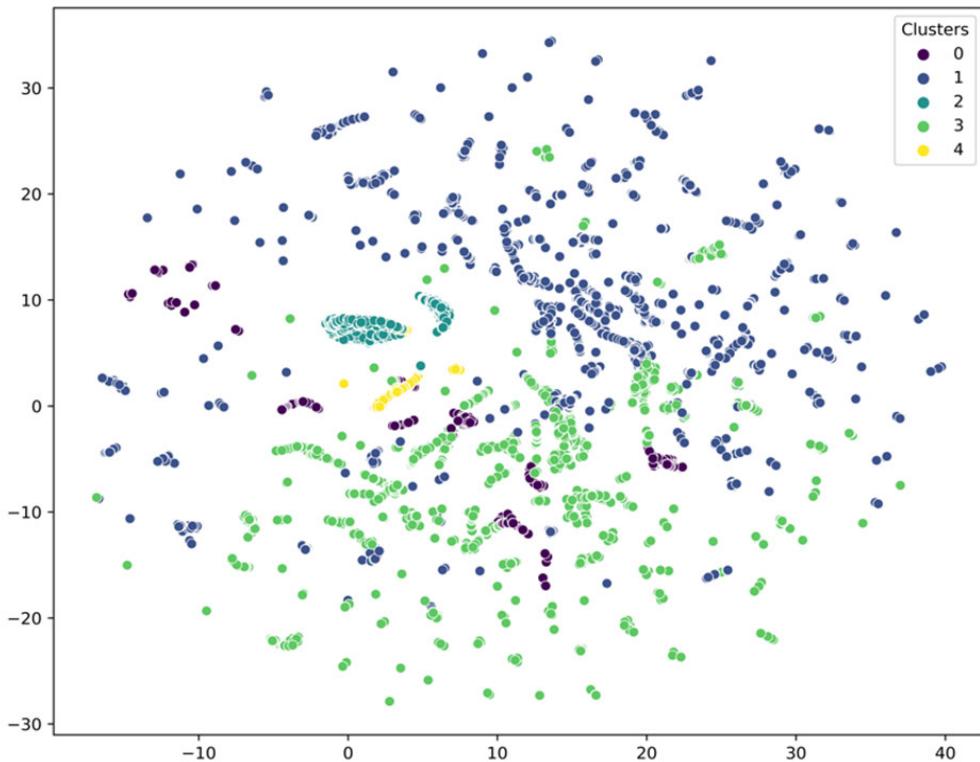


Рис. 6. Результат кластеризации для каналов Aerosol, Green, Red, R1, R2, R7

Новое разбиение набора данных на кластеры отличается от предыдущего результата, но также содержит обособленные кластеры, что может указывать на их схожую природу. Результаты работы обученного алгоритма с явным разделением на кластеры представлены: на рис. 7, а – для первой исследуемой области, на рис. 7, б – для второй исследуемой области.

Кластеризация с меньшим количеством спектральных каналов показывает более однородное разделение.

Анализ полученных результатов для первой области показывает, что изображения в видимом спектре значительно отличаются по цвету. Несмотря на визуальное изменение цвета поверхности акватории, рассматривается предположение о незначительных изменениях состава воды реки Амур в данной области, изменение цвета в видимом диапазоне связано с астрономическим временем съёмки и погодными условиями.

Рассмотрение работы алгоритма для другого участка реки указывает на явные различия в спектральных характеристиках. Изменения поверхности воды на рис. 7, б (нижнее изображение) по своей форме напоминают течения, что свидетельствует о некоторых закономерностях, выявленных алгоритмом. Наиболее часто встречающийся кластер на рис. 7, б (нижнее изображение) также определён на рис. 7, б (среднее изображение) и может свидетельствовать об илистый природе речного дна. Ещё один определённый кластер на рис. 7, б (нижнее изображение) также встречается и на суше, где есть растительность (см. рис. 7, а (верхнее изображение)). На рис. 7, б (верхнее изображение) также определяется данный кластер, где присутствует зелёный цвет, что может свидетельствовать о том, что данный кластер можно интерпретировать как растительность. Очередной кластер встречается только на водной поверхности (см. рис. 7, а (верхнее и среднее изображения), рис. 7, б (верхнее и нижнее изображения)), однако в рамках данного исследования сложно определить, какими свойствами обладает выделенная водная поверхность.

a)

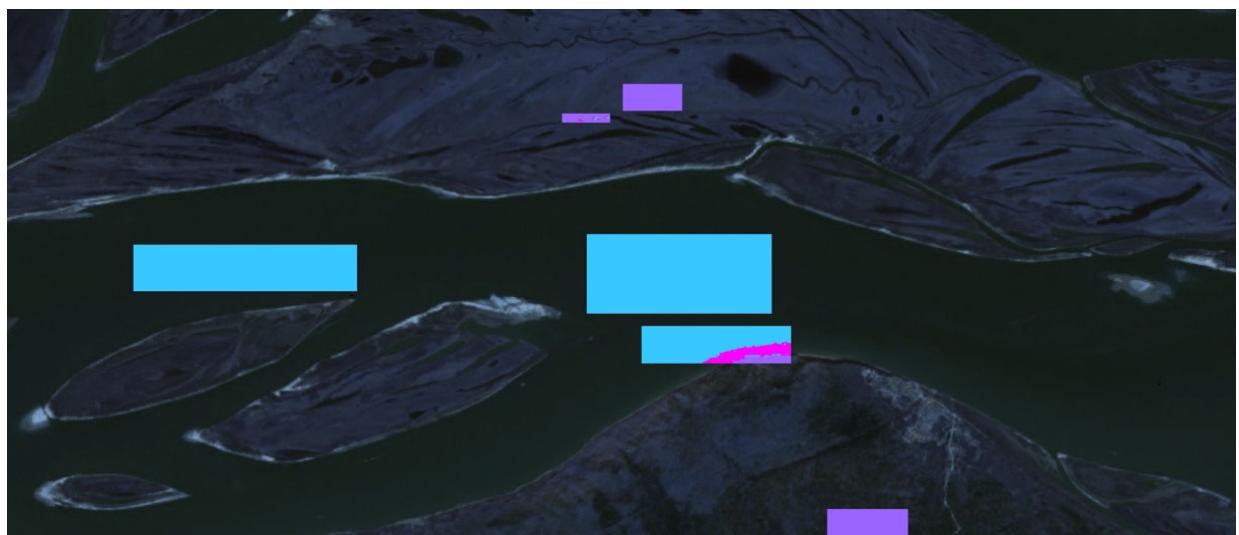


Рис. 7. Результаты обработки изображения обученным алгоритмом  
с явным разделением на кластеры (начало):  
а – первая исследуемая область; б – вторая исследуемая область

б)

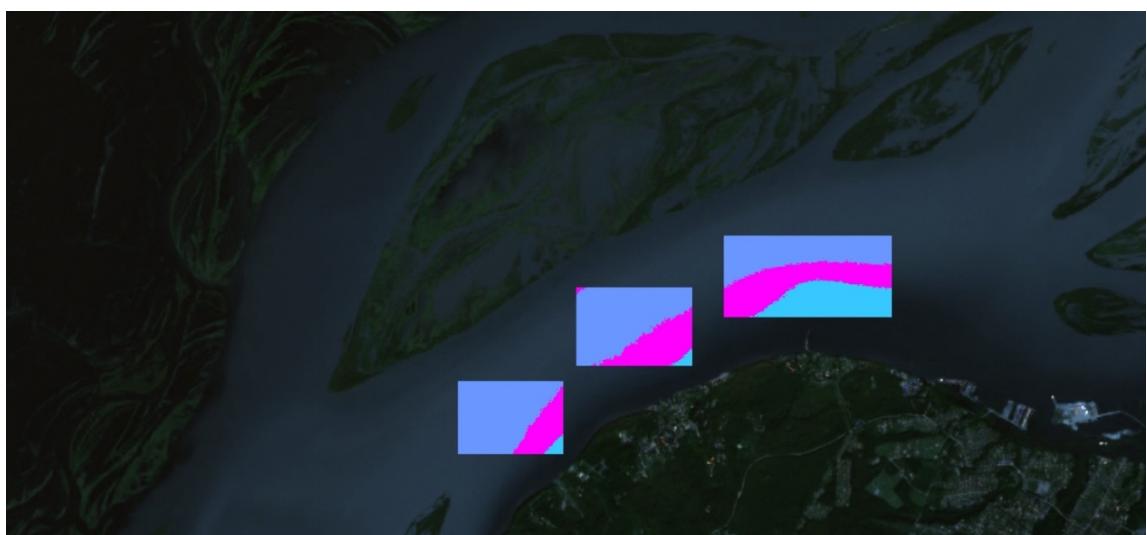
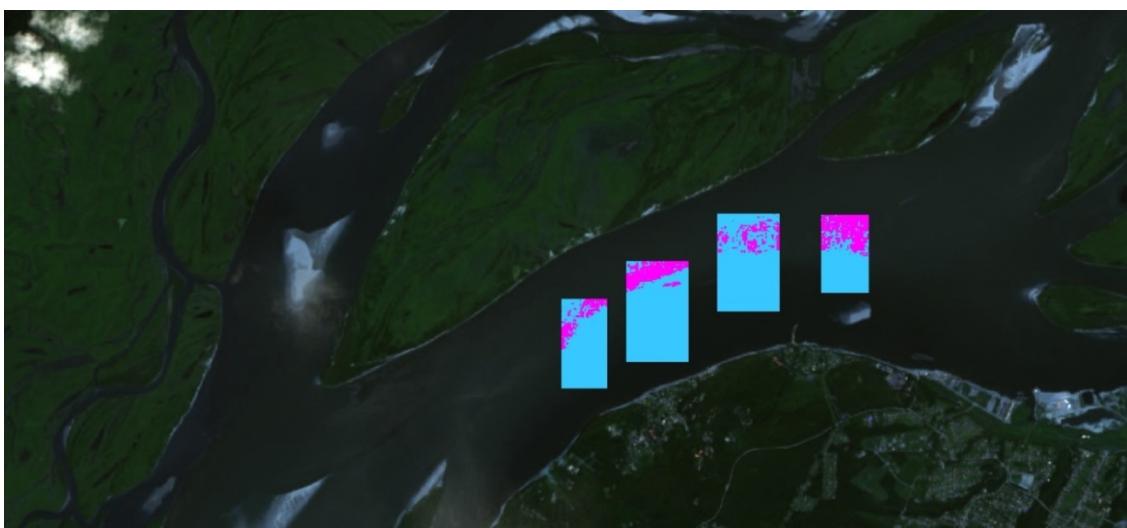


Рис. 7. Результаты обработки изображения обученным алгоритмом с явным разделением на кластеры (продолжение):  
а – первая исследуемая область; б – вторая исследуемая область

Результаты исследования не опровергают гипотезу о возможности определения изменений отдельных областей водной поверхности без начальных представлений об их возможной природе. Сопоставление полученных данных с информацией о нештатных ситуациях на указанных территориях акваторий может способствовать предположению о нормальном составе воды либо отклонении от него. Дальнейшее исследование состоит в построении классификаторов для данных областей, размеченных на основе текущих результатов работы алгоритмов кластеризации. Полученные результаты должны позволять масштабировать исследования за счёт большего охвата площадей водных поверхностей реки Амур и выявлять закономерности спектральных характеристик составов водной поверхности для более глубокого анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gitelson A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: Relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *Int. J. Remote Sens.*, 1992., 13, p. 3367-3373.
2. Жарикова, Е. П. Модели расчёта и фильтрации вегетационных индексов / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: сборник материалов 4-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 162-164.
3. Жарикова, Е. П. Сравнение вегетационных индексов в задачах оценки поверхностей / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: сборник материалов 4-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 165-167.
4. Модели компьютерного зрения в задачах дистанционного зондирования / Е. П. Жарикова, И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Постулат. Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема. – 2018. – № 4 (30). – С. 73.
5. Zharikova, E. P. Artificial intelligence methods for detecting water pollution / E. P. Zharikova, J. Y. Grigoriev, A. L. Grigorieva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. «International Science and Technology Conference «Earth Science», ISTC EarthScience 2022 – Chapter 1». 2022. – Р. 022082.
6. Формирование набора данных для решения задач детектирования нештатных ситуаций в экологии / И. Н. Альхименко, Е. П. Жарикова, М. А. Чепурных, А. И. Базюк, Я. Ю. Григорьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: сборник материалов 5-й Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 360-362.
7. Жарикова, Е. П. Применение искусственного интеллекта в задачах анализа состояния акваторий / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2 (52). – С. 129-133.
8. Applications of computer vision in cross-sectoral tasks / Zharikova E. P., Grigoriev Y. Y., Grigorieva A. L. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. T. 200. P. 415-426.
9. Surface state detection / Zharikova E. P., Grigoriev Ya. Yu., Grigoryeva A. L. // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. P. 8934205.
10. Титоренко, А. В. Разработка системы автоматизированного анализа состояния водных объектов с применением технологий дистанционного зондирования / А. В. Титоренко, Я. Ю. Григорьев // Материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 480.
11. Амосов, О. С. Быстродействующие численные нейросетевые и нечёткие методы стохастического оценивания состояния динамических систем / О. С. Амосов, С. Г. Баена // Информатика и системы управления. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2014. – С. 118-129.



Горьковый М. А., Горьковый А. И., Мельниченко М. А., Егорова В. П.  
M. A. Gorkavyy, A. I. Gorkavyy, M. A. Melnichenko, V. P. Egorova

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА КИНЕМАТИКИ ШЕСТИОСЕВОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕГО ТРАЕКТОРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

### AUTOMATION OF THE CALCULATION OF THE SIX-AXIS INDUSTRIAL ROBOT KINEMATICS AND MODELING OF ITS TRAJECTORY MOVEMENTS

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

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

**Горьковый Александр Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gorkavyy\_ai51@mail.ru.

**Aleksandr I. Gorkavyy** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorkavyy\_ai51@mail.ru.

**Мельниченко Маркел Андреевич** – аспирант, преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: markel.96dk@mail.com.

**Markel A. Melnichenko** – Postgraduate Student, Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: markel.96dk@mail.com.

**Егорова Валерия Павловна** – аспирант, старший преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Valeria P. Egorova** – Postgraduate Student, Senior Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Ler4ik\_007\_94@mail.ru.

**Аннотация.** Для передовых промышленных предприятий, использующих роботизированные технологические комплексы (РТК) для повышения производительности и качества выпускаемой продукции, наиболее важными критериями при реализации роботизированных технологических процессов (ТП) являются быстродействие и энергетическая эффективность. Механизмы обеспечения выполнения критериев эффективности базируются на комплексных моделях роботизированных процессов. В работе представлено решение прямой задачи кинематики (ПЗК) типового промышленного робота средней грузоподъёмности с целью формирования его кинематической модели, используемой при синтезе интеллектуальных методов, алгоритмов и систем управления РТК. Был сформирован ряд кинематических моделей, обеспечивающих расчёт инерционных сил и графическую визуализацию процессов перемещения манипуляционного механизма. Разработанные модели агрегированы в единую структуру расчёта динамических параметров промышленного робота-манипулятора.

**Summary.** For advanced industrial enterprises using robotic technological complexes (RTCs) to increase productivity and product quality, the most important criteria for the implementation of robotic technological processes are speed and energy efficiency. Mechanisms for ensuring the fulfillment of efficiency criteria are based on complex models of robotic processes. The paper presents a solution to the direct kinematics problem (MPC) of a typical industrial medium-duty robot in order to form its kinematic model used in the synthesis of intelligent methods, algorithms and control systems of RTK. A number of kinematic models were formed that provide the calculation of inertial forces and graphical visualization of the processes of movement of the manipulation mechanism. The de-

veloped models are aggregated into a single structure for calculating the dynamic parameters of an industrial robot manipulator.

**Ключевые слова:** роботизированный технологический комплекс, цифровизация, кинематическая модель, пространственная конфигурация, промышленный робот-манипулятор, пространственные перемещения, энергоэффективность, оптимизация технологических процессов.

**Key words:** robotic technological complex, digitalization, kinematic model, spatial configuration, industrial robot manipulator, spatial displacement, energy efficiency, optimization of technological processes.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-71-10093  
<https://rscf.ru/project/22-71-10093/>).*

УДК 004.896

**Введение.** Экономический рост России и промышленных предприятий невозможен без развития научно-технического прогресса во всех сферах производства [1; 2]. Для совершенствования производственных и технологических процессов необходим широкий научноёмкий инструментарий, с помощью которого возможно получение наиболее высоких показателей эффективности производства [3; 4]. Устойчивое развитие технологических процессов предприятия возможно за счёт применения автоматизированных или роботизированных технологических комплексов (РТК), оснащённых интеллектуальными системами управления [5; 6]. В связи с этим разработки в области интеллектуализации РТК являются актуальными и должны быть направлены на оптимизацию наиболее важных интегральных показателей роботизированного комплекса, таких как быстродействие и энергетическая эффективность [7–10].

Достижение высоких показателей энергетической эффективности РТК возможно за счёт применения имитационных моделей управления, оснащённых интеллектуальными алгоритмами [11–13; 23].

Такие модели позволяют обеспечить определение оптимальных по критерию энергопотребления комплексов траекторий перемещения конечного эффектора промышленного робота (ПР) в оперативном режиме, а также поддержку принятия решения оператором РТК при отладке управляющих программ. Более того, комплексная имитационная модель, включающая в себя модули расчёта параметров механической, электрической и программной части, а также оснащённая интеллектуальными алгоритмами, например, на базе нечётких и нейронных систем, является элементом цифрового двойника [12] и может быть интегрирована в общую цифровую инфраструктуру производства для формирования рекомендаций системам управления вышестоящих уровней.

При наличии готового инструментария, т. е. подобных «открытых» имитационных моделей, архитектор технологических процессов имеет возможность быстро и качественно синтезировать модули цифрового двойника РТК, используя минимум временных, финансовых и интеллектуальных затрат [14–16].

Целью данной работы является синтез автоматизированной системы расчёта кинематики шестиосевого промышленного робота-манипулятора в среде MATLAB с учётом специфики программного пакета Simscape Multibody и возможностью интеграции расчёта прямой задачи кинематики (ПЗК) с графическими моделями для определения динамических параметров и визуализации траекторий перемещений промышленного робота.

Для достижения представленной цели авторами поставлены следующие задачи исследования:

- решение ПЗК промышленного робота-манипулятора в общем виде;
- формирование кинематической модели механизма промышленного робота на базе примитивов в программной среде;
- создание графически адекватной трёхмерной модели механизма манипулятора для обеспечения визуализации перемещения звеньев.

Решение поставленного ряда задач позволит синтезировать качественную кинематическую модель ПР для разработки алгоритмов формирования оптимальных траекторий перемещения, в частности по критерию минимизации энергопотребления, с визуализацией динамики изменения параметров.

**Методология.** Прямой задачей кинематики является определение декартовых координат в пространстве по обобщённым координатам, т. е. по углам поворота каждой оси ПР. Для пространственных механизмов наиболее эффективным способом решения этой задачи является векторный метод и метод преобразования координат [17].

Для проведения исследований выбран типовой промышленный робот средней грузоподъёмности KUKA KR10 R1100 sixx [18], входящий в состав Научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии» (НОЦ ПРИПТ) при ФГБОУ ВО «КнАГУ», поскольку данный ПР имеет классическую шестиосевую конструкцию. Кроме того, благодаря небольшой массе механизма и большим значениям коэффициентов передач редукторов инерционные силы не оказывают существенного влияния на динамику системы и могут не учитываться при формировании модели энергопотребления.

Математическая модель кинематики шестивалкового ПР представлена в части решения ПЗК и визуализации геометрии звеньев робота в пространстве.

**Решение прямой задачи кинематики промышленного робота-манипулятора.** При решении прямой задачи о положении звеньев, как правило, используют метод преобразования координат. Из различных методов преобразования координат, отличающихся друг от друга правилами выбора осей локальных систем координат, наиболее простым и распространённым является метод Денавита – Хартенберга [19; 20].

Согласно методу Денавита – Хартенберга, решение ПЗК включает в себя:

- привязку систем координат к звеньям;
- определение параметров Денавита – Хартенберга;
- построение матриц однородного преобразования;
- расчёт углов Эйлера по итоговой матрице вращения.

Благодаря методу Денавита – Хантерберга появляется возможность сократить количество координат, определяющих систему координат в пространстве, с четырёх до трёх, известных как параметры Денавита – Хантерберга.

На рис. 1, а представлен общий вид промышленного робота-манипулятора KUKA KR10 R1100 sixx. На рис. 1, б представлена схема привязки систем координат звеньев.

а)



б)

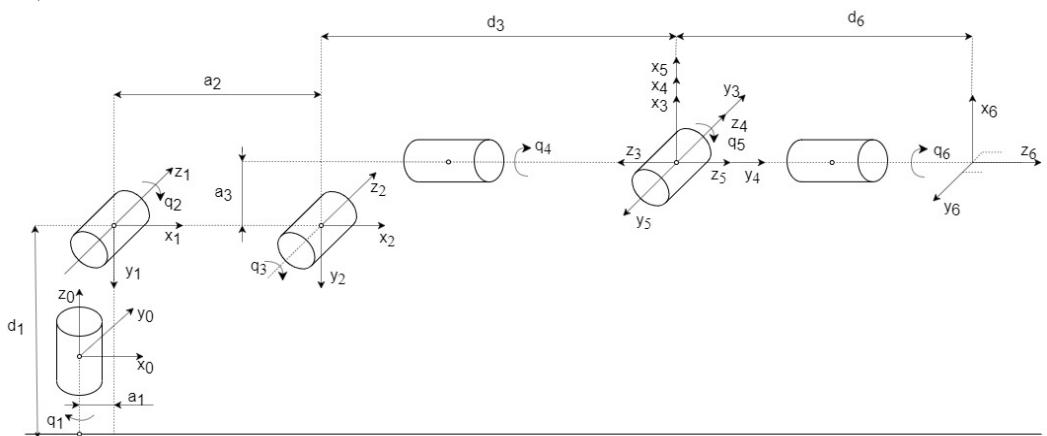


Рис. 1. Общий вид промышленного робота-манипулятора KUKA KR-10 R1100 sixx (а) и схема привязки систем координат звеньев (б)

Схема привязки систем координат (см. рис. 1, б) выполнена в соответствии со следующими правилами:

1. Ось  $Z$  всегда совпадает с осью вращения.
2. Ось  $x_i$  перпендикулярна оси  $Z_{i-1}$  и пересекает её.
3. Ось  $Y$  выбирается так, чтобы тройка  $XYZ$  была правой.

Параметры  $a_1 a_2 a_3 \dots d_1 d_3 d_6 \dots$  получены согласно технической документации [1].

В соответствии с полученной кинематической схемой матрица Денавита – Хантерберга имеет следующий вид:

$$DH = \begin{bmatrix} -\frac{\pi}{2} & a_1 & d_1 & \theta_1 \\ 0 & a_2 & 0 & \theta_2 \\ \frac{\pi}{2} & a_3 & d_3 & -\frac{\pi}{2} + \theta_3 \\ -\frac{\pi}{2} & 0 & 0 & \theta_4 \\ -\frac{\pi}{2} & 0 & 0 & \theta_5 \\ 0 & 0 & d_6 & \theta_6 \end{bmatrix}.$$

Согласно формуле

$$\begin{aligned} T_i &= T_{z,\theta_i} T_{z,d_i} T_{x,a_i} T_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} R_{z,\theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & \rho_{d_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & \rho_{a_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{x,\alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где  $R_{z,\theta_i}$  и  $R_{x,\alpha_i}$  – базовые матрицы вращения, равные

$$\begin{aligned} R_{z,\theta_i} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ R_{x,\alpha_i} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$\rho_{d_i}$  и  $\rho_{a_i}$  – векторы с ненулевыми компонентами  $p_z = d_i$  и  $p_x = a_i$ .

Следовательно,

$$\rho_{d_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_i \end{bmatrix}, \quad \rho_{a_i} = \begin{bmatrix} a_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае матрицы однородного преобразования будут иметь вид

$$\begin{aligned} T_1^0 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_3^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & d_3 \\ -1 & 0 & 0 & -a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ T_4^3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_5^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_6^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{1}$$



Итоговую матрицу, связывающую все системы координат, как и в случае с матрицами вращения, можно получить последовательным перемножением:

$$T_n^0(q) = T_1(q)T_2(q) \dots T_n(q) = \begin{bmatrix} R_n^0(q) & \rho_n^0(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда для рассматриваемой конфигурации манипулятора итоговая матрица однородного преобразования Денавита – Хантерберга, связывающая все системы координат, будет иметь вид

$$T_6^0 = T_1^0 \times T_2^1 \times T_3^2 \times T_4^3 \times T_5^4 \times T_6^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & a_1 + a_2 + d_3 + d_6 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Полученная итоговая матрица однородного преобразования Денавита – Хантерберга содержит матрицу вращения и вектор смещения. Поскольку матрица вращения в общем случае имеет вид

$$\begin{aligned} R_{zyz} = R_{z,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} &= \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi & 0 \\ s_\varphi & c_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta c_\psi - s_\varphi s_\psi & -c_\varphi c_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\theta \\ s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi & -s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}, \\ R_n^0(q) &= \begin{bmatrix} c_\varphi \times c_\theta \times c_\psi - s_\varphi \times s_\psi & -c_\varphi \times c_\theta \times s_\psi - s_\varphi \times c_\psi & c_\varphi \times s_\theta \\ s_\varphi \times c_\theta \times c_\psi + c_\varphi \times s_\psi & -s_\varphi \times c_\theta \times s_\psi + c_\varphi \times c_\psi & s_\varphi \times s_\theta \\ -s_\theta \times c_\psi & s_\theta \times s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Углы Эйлера могут быть найдены из соотношений:

$$\begin{cases} \cos \theta = 0 \\ \cos \varphi \times \sin \theta = 1 \\ \sin \theta \times \cos \varphi = 0 \end{cases}$$

**Формирование кинематической модели промышленного робота-манипулятора.** Согласно схеме, представленной на рис. 1, б, построена кинематическая модель промышленного робота-манипулятора KUKA KR10 R1100 sixx в программном продукте MATLAB (пакет Simscape Multibody) (см. рис. 2).

Массогабаритные характеристики звеньев манипулятора представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Массогабаритные характеристики звеньев исследуемого ПР

Наименование звена ПР	Длина звена, м	Приближённый радиус звена, м	Масса звена, кг
1. Base	0.215	0.1146	16
2. Rotating column	0.185	0.0955	7
3. Link arm	0.560	0.0637	15.5
4. Arm	0.105	0.0764	6
5. In-line wrist	0.410...0.150	0.0573	8
6. Wrist	0.08	0.0446	2
7. Flange	0.005	0.0318	0.5

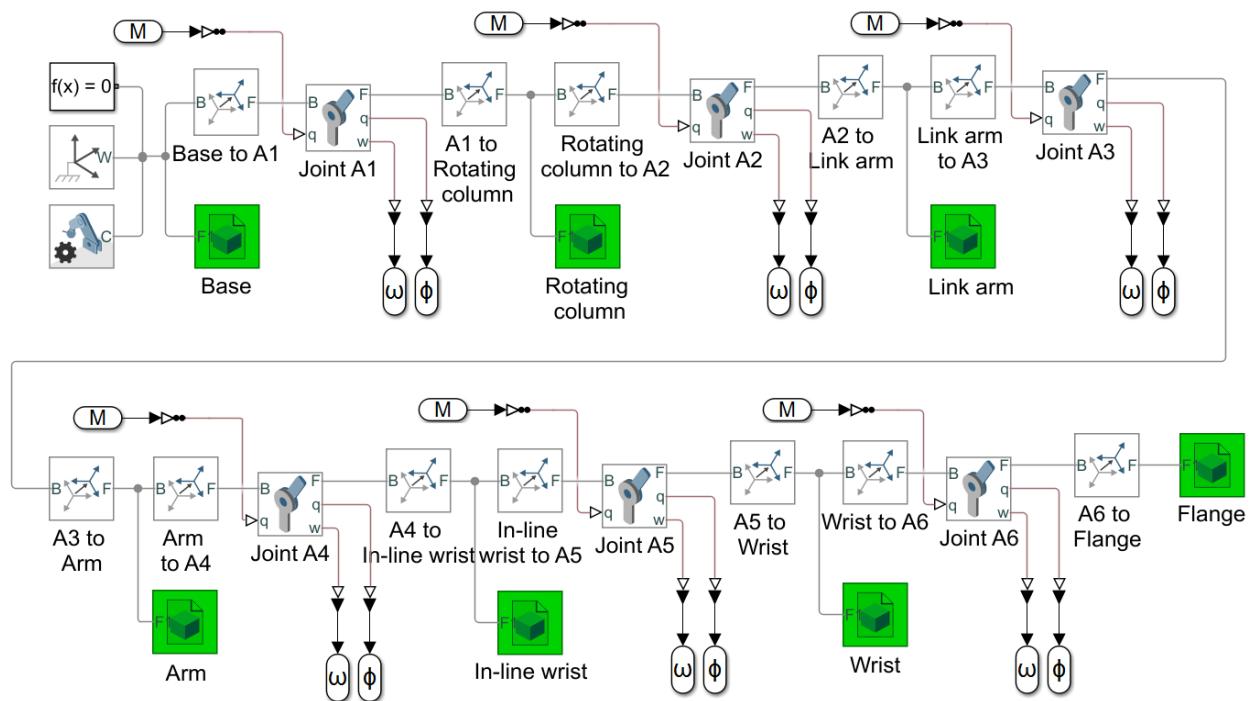


Рис. 2. Кинематическая модель исследуемого промышленного робота-манипулятора в среде MATLAB

Для формирования кинематической модели исследуемого промышленного робота-манипулятора в представленной схеме (см. рис. 2) необходимо произвести задание массогабаритных характеристик в блоках, имитирующих твёрдые тела (звенья), а также матриц однородного преобразования (1) в блоках преобразования систем координат.

На рис. 3 представлены полученные 3D-модели: графическая модель на базе примитивов для последующего подключения физических моделей и расчёта энергопотребления; графически адекватная модель для визуализации внутреннего интерфейса цифрового двойника промышленного робота.

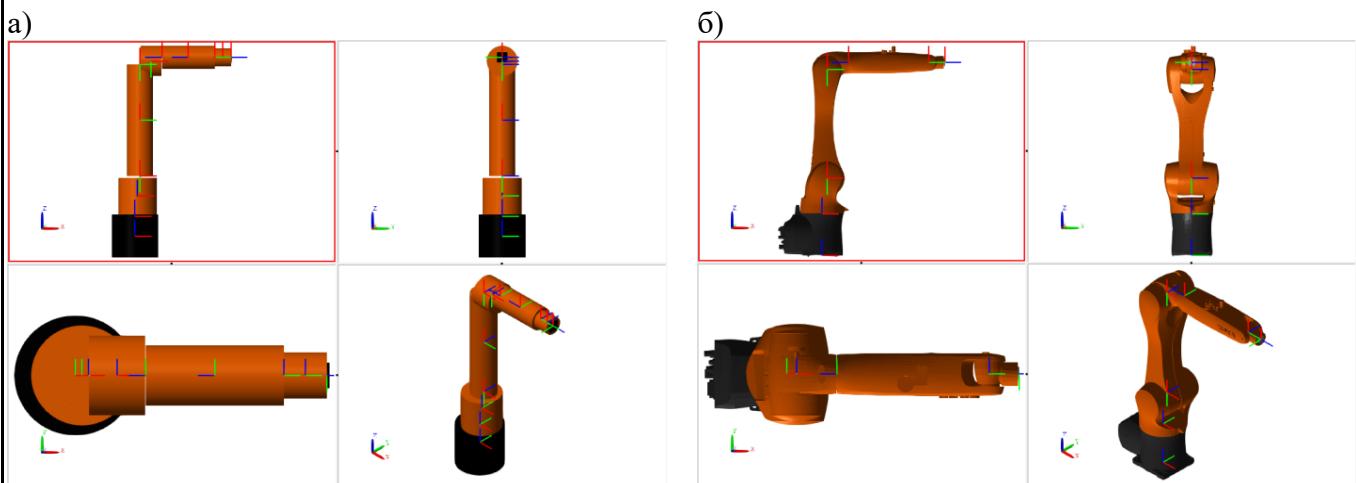


Рис. 3. Графическая модель на базе примитивов (а) и адекватная графическая модель (б)

При разработке графически адекватной модели использованы трёхмерные модели в формате STEP.

При построении кинематической модели в среде MATLAB (пакет Simscape Multibody) осуществляется координатное представление текущего состояния механизма в целом, изменения положения, скорости и ускорения механизма промышленного робота по всем шести независимым координатам.

Модель на базе примитивов (см. рис. 3, *а*) позволяет быстро рассчитывать и учсть моменты инерции, возникающие в процессе перемещения ПР, а также в случае моделирования коллaborативных роботизированных процессов упростить и ускорить расчёт коллизий. Графически адекватная модель (см. рис. 3, *б*) необходима для интерактивной визуализации всех подвижных звеньев при реализации траекторного перемещения промышленным роботом-манипулятором [21; 22; 24].

Укрупнённая структурная схема аппроксимированной модели расчёта динамических параметров ПР, включающая блок автоматического решения ПЗК, представлена на рис. 4.

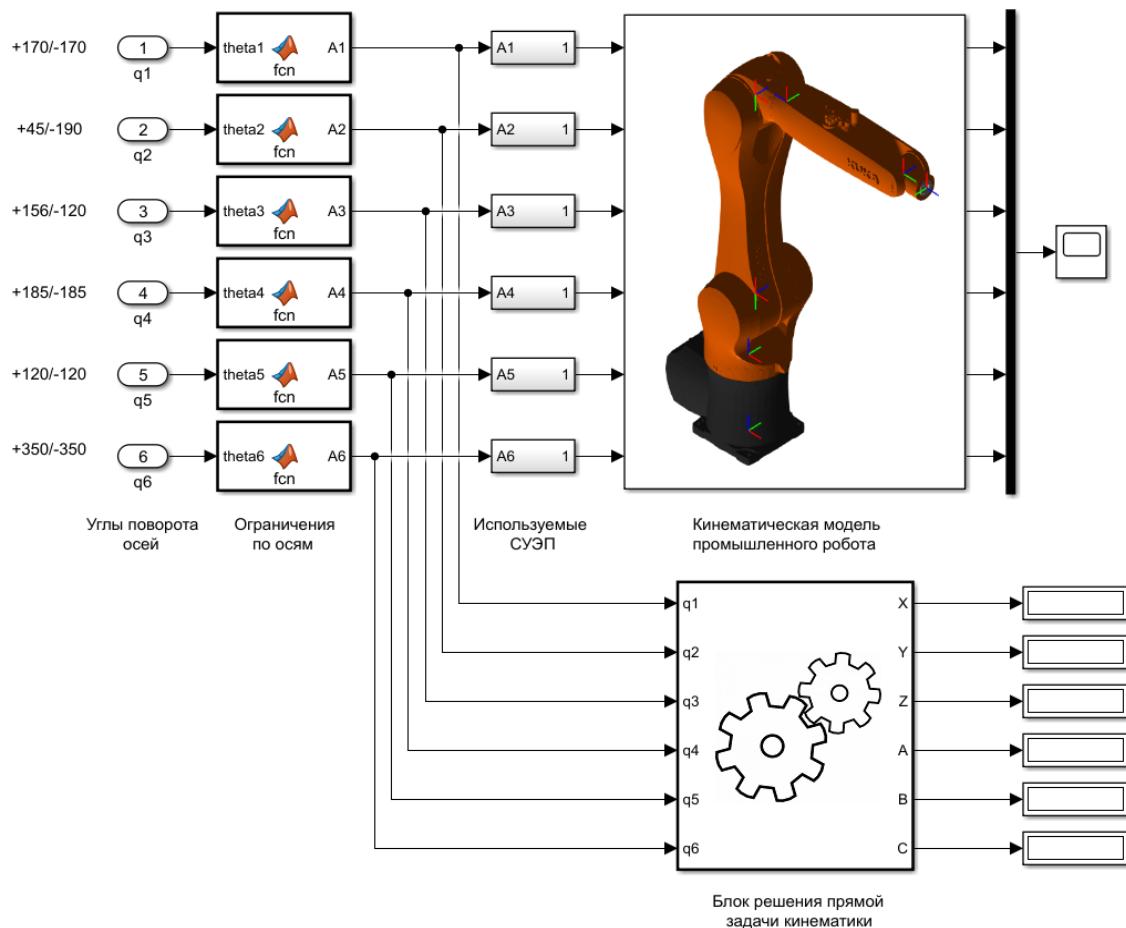


Рис. 4. Структурная схема расчёта динамических параметров ПР

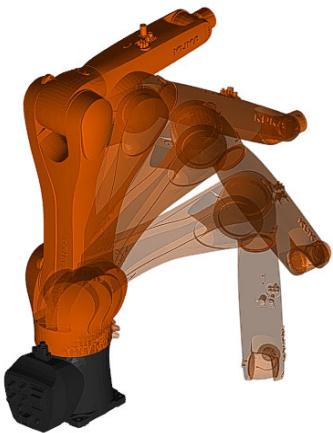
Работа с представленной схемой осуществляется в следующей последовательности:

1. задание желаемых углов поворота шести осей ПР;
2. моделирование системы;
3. анализ переходных процессов перемещения механизма ПР.

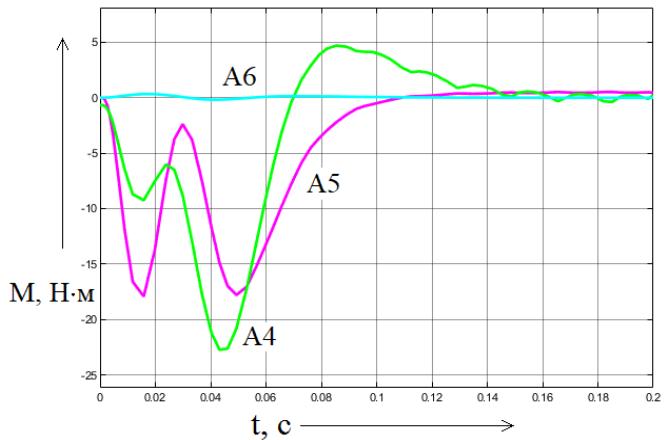
Результаты моделирования перемещения механизма манипулятора согласно сигналам угла поворота ( $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ ) с системой управления электрическим приводом представлены на рис. 5.

Представленные графики (см. рис. 5, б, в, г) демонстрируют изменение переменных на выходе модели (положение, скорость). Также для рассматриваемого траекторного перемещения в качестве примера приведены графики изменения входных переменных (механических моментов (см. рис. 5, б) осей A4-A6, поскольку эти оси являются ориентирирующими и обладают малой инерционностью.

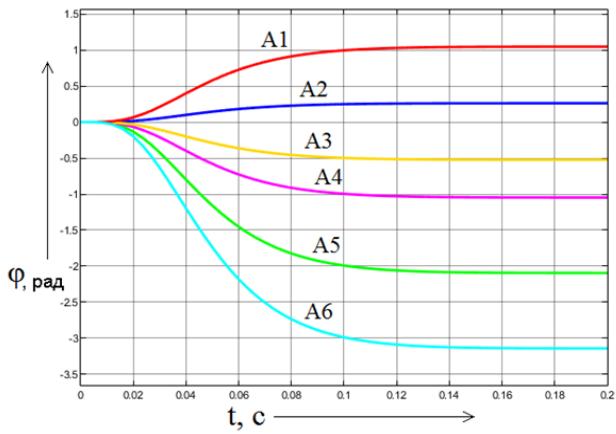
а)



б)



в)



г)

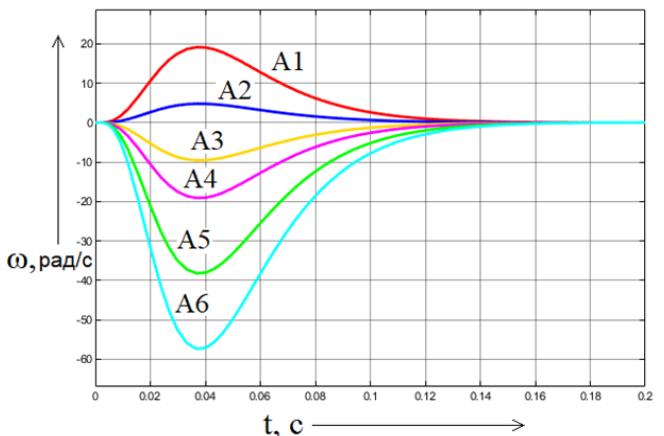


Рис. 5. Результат моделирования перемещения механизма манипулятора (а), графики изменения механических моментов осей A3-A6 (б), графики изменения углов поворота осей ПР (в) и графики изменения скоростей поворота осей ПР (г)

По представленным графикам (см. рис. 5, б, в, г) можно сделать вывод о том, что качественные характеристики разработанных моделей являются адекватными, поскольку характер переходных процессов по положению соответствует классической биномиальной форме [25], на которую в большинстве случаев производится настройка систем управления электрическими приводами (СУЭП) промышленного робота.

Таким образом, представленные модели реализуют требуемый функционал расчёта инерционных сил и графическую визуализацию изменения динамических параметров промышленного робота-манипулятора (положение, скорость, ускорение по всем шести обобщённым координатам), что обеспечивает оператора РТК данными, необходимыми для проведения оптимизационных процедур, а благодаря реализации предложенных решений в специализированном программном продукте MATLAB (Simscape Multibody) разработанная комплексная модель расчёта динамических параметров ПР (см. рис. 5) может быть интегрирована в общую цифровую среду производства и



использоваться в качестве универсальной платформы для моделирования кинематических структур промышленных роботов-манипуляторов.

**Заключение.** Прямая задача кинематики является важным этапом разработки и настройки роботизированного оборудования. Решение ПЗК роботизированного оборудования включает в себя математические и геометрические вычисления, которые позволяют определить точное положение рабочего органа. В общем случае моделирование и визуализация результата позволяют проверить правильность проектирования и настройки робота.

В рамках данной статьи произведено решение ПЗК манипуляционного механизма промышленного робота KUKA KR10 R1100 sixx для формирования его кинематической модели в среде MATLAB с целью разработки перспективных интеллектуальных алгоритмов и систем управления промышленным роботом в составе РТК.

В качестве ключевых результатов предложенных решений необходимо отметить:

1. Решение ПЗК в общем виде для промышленного робота KUKA KR10 R1100 sixx методом Денавита – Хантерберга.

2. Формирование кинематической модели механической части исследуемого ПР в специализированном программном продукте MATLAB.

3. Предложение гибкого подхода к использованию синтезированной кинематической модели промышленного робота, которая представлена в двух вариантах: модель на базе примитивов (для обеспечения высоких показателей быстродействия при расчёте инерционных сил); графически адекватная модель (с целью обеспечения высокого качества визуализации).

Стоит отметить, что разработанные модели способны работать автономно, что существенно расширяет функционал решения и его применимость для узких задач, таких как разработка моделей энергопотребления специализированных робототехнических комплексов, в том числе коллaborативных, где крайне востребована высокая скорость работы модели для контроля и визуализации процесса, а также прогнозирования сценариев его развития с целью проведения ТП в рамках принятой системы критериев (минимум энергопотребления, максимум безопасности, минимум брака и т. д.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сухарев, О. С. Технологическая независимость России: способы обеспечения / О. С. Сухарев // Россия: общество, политика, история. – 2023. – № 1 (6). – С. 24-39.
2. Nikonorova, A., Perskaya, V., Itao, T., Morkovkin, D., Shmanev, S., Kerimov, V. (2023). Assessment of the Impact of Technological Trends on Business Activities in the Context of Digital Transformation of Industry. In: Gibadullin, A. (eds) Digital and Information Technologies in Economics and Management. DITEM 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 683. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30926-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30926-7_16).
3. Никонова, А. А. Ориентиры изменения модели научно-технологического развития России и выхода из кризиса, по академику Д. С. Львову / А. А. Никонова // Russian Journal of Economics and Law. – 2023. – № 17 (2). – С. 289-306.
4. Жаров, М. В. Обзор программных средств имитационного моделирования для исследования технологий и производств машиностроения / М. В. Жаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 85-92.
5. Petrova, D., Vlahova, B., Lengerov, A., Zlateva-Petkova, T. (2023). Improvement of Constructive-Technological Approaches Reducing Innovative Obsolescence of Industrial Technologies in the Context of Industry 4.0. Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. Volume 1, 180-186. <https://doi.org/10.17770/etr2023vo11.7238>.
6. Alakwe, K. (2023). Human Dignity in the Era of Artificial Intelligence and Robotics: Issues and Prospects. Journal of Humanities and Social Sciences Studies, 5(6), 87–97. <https://doi.org/10.32996/jhsss.2023.5.6.10>.
7. Zhang, L. (2022). Electric Automation Control Simulation System Based on Intelligent Technology. In: Xu, Z., Alrabaee, S., Loyola-González, O., Zhang, X., Cahyani, N. D. W., Ab Rahman, N. H. (eds) Cyber Security Intelligence and Analytics. CSIA 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 125. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97874-7\\_98](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97874-7_98).

8. Dahl, M.; Bengtsson, K.; Falkman, P. Application of the Sequence Planner Control Framework to an Intelligent Automation System with a Focus on Error Handling. *Machines* 2021, 9, 59. <https://doi.org/10.3390/machines9030059>.
9. Caiazzo, C., Nestić, S., Savković, M. (2023). A Systematic Classification of Key Performance Indicators in Human-Robot Collaboration. In: Mihić, M., Jednak, S., Savić, G. (eds) Sustainable Business Management and Digital Transformation: Challenges and Opportunities in the Post-COVID Era. SymOrg 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 562. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-18645-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18645-5_30).
10. R. Omar, «AI And Energy Efficiency», 2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C), L'Aquila, Italy, 2023, pp. 141-144, doi: 10.1109/ICSA-C57050.2023.00040.
11. Dahl, M.; Erős, E.; Bengtsson, K.; Fabian, M.; Falkman, P. Sequence Planner: A Framework for Control of Intelligent Automation Systems. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5433. <https://doi.org/10.3390/app12115433>.
12. Li, W., Wang, Z., Mai, R. et al. Modular design automation of the morphologies, controllers, and vision systems for intelligent robots: a survey. *Vis. Intell.* 1, 2 (2023). <https://doi.org/10.1007/s44267-023-00006-x>.
13. Abuzar Yaqoob Mulla, Gauri Ansurkar, «AI and Robotics: Designing Intelligent and Adaptive Robots for Industrial Automation», International Journal of Scientific Research in Science and Technology (IJSRST), Online ISSN : 2395-602X, Print ISSN : 2395- 6011, Volume 10 Issue 2, pp. 817-824, March-April 2023. Available at doi: <https://doi.org/10.32628/IJSRST523102126>.
14. Головцова, И. Г. Цифровой двойник как инструмент повышения эффективности и качества бизнес-процессов / И. Г. Головцова, А. А. Ким // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2022. – № 11-1 (93). – С. 85-94.
15. Фролов, Е. Б. Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории MES / Е. Б. Фролов, А. С. Климов, М. М. Зин Мин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 12 (73). – С. 66-73.
16. Кубриков, М. В. Цифровой двойник в системе внешнего адаптивного управления роботами-манипуляторами / М. В. Кубриков // Инновации космической отрасли. – 2023. – Т. 7. – № 2 (44). – С. 171-176.
17. Лавров, В. Ю. Введение в теорию механизмов и машин: учеб. пособие / В. Ю. Лавров. – СПб.: БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2016. – 143 с.
18. KUKA system software 8.3 rus: инструкция по эксплуатации и программированию для конечного пользователя // robotforum.ru, сайт. – URL: [http://robotforum.ru/assets/files/Kuka/KUKA\\_KR\\_AGILUS\\_sixx.pdf](http://robotforum.ru/assets/files/Kuka/KUKA_KR_AGILUS_sixx.pdf) (дата обращения: 02.11.2023). – Текст: электронный.
19. Раин, Т. Разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора / Т. Раин // Прикладная математика & Физика. – 2023. – Т. 55. – № 1. – С. 70-83.
20. Раин, Т. Описание программного комплекса для моделирования робота-манипулятора / Т. Раин // Вестник российских университетов. Математика. – 2023. – Т. 28. – № 141. – С. 90-96.
21. Горитов А. Н. Построение трёхмерной модели рабочего пространства промышленного робота / А. Н. Горитов // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20. – № 4. – С. 117-121.
22. Ashhepkova, N. (2021). Devising a method to analyze the current state of the manipulator workspace. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7 (109), 63–74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225121>.
23. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. С. Мешков, Д. А. Киба // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII (47). – С. 26-33.
24. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Присолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III (51). – С. 29-38.
25. Мирошник, И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И. В. Мирошник. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.



Младова Т. А., Муллер Н. В., Васильев А. А., Беседин М. А.  
T. A. Mladova, N. V. Muller, A. A. Vasiliev, M. A. Besedin

## ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА

### APPROACHES TO MATHEMATICAL MODELING OF OCCUPATIONAL INJURY PROCESSES

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

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

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

**Nina V. Muller** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: only\_nina@mail.ru.

**Васильев Алексей Александрович** – студент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Alexey A. Vasiliev** – Student, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Беседин Максим Александрович** – студент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Maxim A. Besedin** – Student, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В статье проведены исследование и анализ травматизма на примере предприятия metallurgischen производства. Применительно к массиву данных по травматизму предложена модель, которая позволит установить закономерности, вызывающие несчастные случаи. В ходе исследования проанализированы зависимости возникновения производственных травм от различных причин, сформированы группы категорий опасности травмирования персонала по профессиям и в соответствии с выявленными приоритетными группами риска персонала рекомендованы к принятию соответствующие превентивные меры.

**Summary.** The article presents a study and analysis of injuries on the example of a metallurgical production enterprise. In relation to the data set on injuries, a model is proposed that will allow us to establish patterns that cause accidents. In the course of the study, the dependences of the occurrence of occupational injuries from various causes were analyzed, groups of personnel injury hazard categories were formed by profession, and in accordance with the identified priority risk groups of personnel, it is recommended to take appropriate preventive measures.

**Ключевые слова:** производственный травматизм, статистика, зависимость, математическая модель, мероприятия.

**Key words:** occupational injuries, statistics, dependence, mathematical model, events.

УДК 504.054

Многовековой практический опыт человеческой деятельности позволяет утверждать, что любой труд потенциально опасен, т. к. он связан с энергией. Причины травматизма, которые приводят к нетрудоспособности работников, можно классифицировать по признакам: организационные, технические, санитарно-гигиенические, психофизиологические.

Наиболее известными методами анализа прогнозирования процессов производственного травматизма, взаимодополняющими друг друга, являются: монографический, экономический, статистический и эргономический. В основе данных методов лежит расчёт коэффициентов травматизма: коэффициент частоты ( $K_n$ ), коэффициент тяжести ( $K_T$ ), коэффициент со смертельным исходом ( $K_c$ ), коэффициент потерь ( $K_\Pi$ ).

Для реализации управления уровнем риска травматизма необходимо знать значение не только этих коэффициентов, но и относительной величины уровня риска травматизма, по которой мы можем определять, является ли исследуемая фактическая величина уровня риска травматизма «положительной» или «отрицательной», т. е. превышает ли исследуемый уровень риска ориентировочное значение или находится в пределах допустимых норм.

Существуют относительные характеристики, применяемые в развитых странах, которые мы можем выбрать в качестве относительной оценки, характеризующей способность эффективного функционирования системы.

На функционирование предприятия влияет множество как внешних, так и внутренних аспектов, поэтому эффективная деятельность системы – это не точка, а область значений показателей, в которую следует стремиться. Если система способна длительно находиться в этой области, такую деятельность системы можно считать устойчивой. Уровень риска – это не что иное, как аккумуляция баланса сил и интересов как внутри самой системы, так и вне её. Можно предположить, что для разных систем (стран, городов) уровень допустимого риска имеет своё значение и это зависит от уровня развития системы, её социального и экономического благополучия. Чем выше уровень развития системы, чем более эффективно она функционирует, соответственно, тем меньше значение допустимого риска.

На рис. 1 изображена схема комплексных решений по систематизации несчастных инцидентов и происшествий для последующего расчёта критерииев травматизма.

На рис. 2 наглядно представлена схема показателей и коэффициентов травматизма, принятых в общемировой и Российской системе учёта несчастных случаев.

В статье в качестве объекта исследования рассмотрим одно из металлургических предприятий, поскольку львиную долю экономики составляет именно металлургическое производство. Оно объединяет предприятия судостроения, авиационной, электротехнической промышленности, производство подъёмно-транспортного оборудования, оборудования для пищевой промышленности, производство транспортных средств.

В работе проведён анализ состояния травматизма по годам. На рис. 3 представлено общее количество несчастных случаев за период с 2018 по 2022 год.

Применим математическую модель прогнозирования производственного травматизма, главной задачей которой является установление закономерностей, вызывающих несчастные случаи.

Установленные категории риска травматизма позволяют расставить приоритеты при разработке комплексных мероприятий по снижению уровня производственного травматизма и распределении денежных средств на их реализацию, а также разработать персонифицированные мероприятия для конкретных работников.

В целях решения проблем травматизма используем данные исследуемой группы работников за определённый период времени и применим вейвлет-анализ. В области линейного преобразования, представленного функцией времени и частот, выделяются сигналы, недоступные в исходном виде. Мы рекомендуем использовать распределение по самоподобным функциям через прямое вейвлет-преобразование:

$$W_s(a, b) = (s(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi * \left( \frac{t-b}{a} \right) dt,$$

где  $t$  – ось времени;  $b$  – момент времени;  $\psi(t)$  – вейвлет-функция;  $s(t)$  – параметр, обратный частоте; (\*) означает комплексно-сопряжённое.

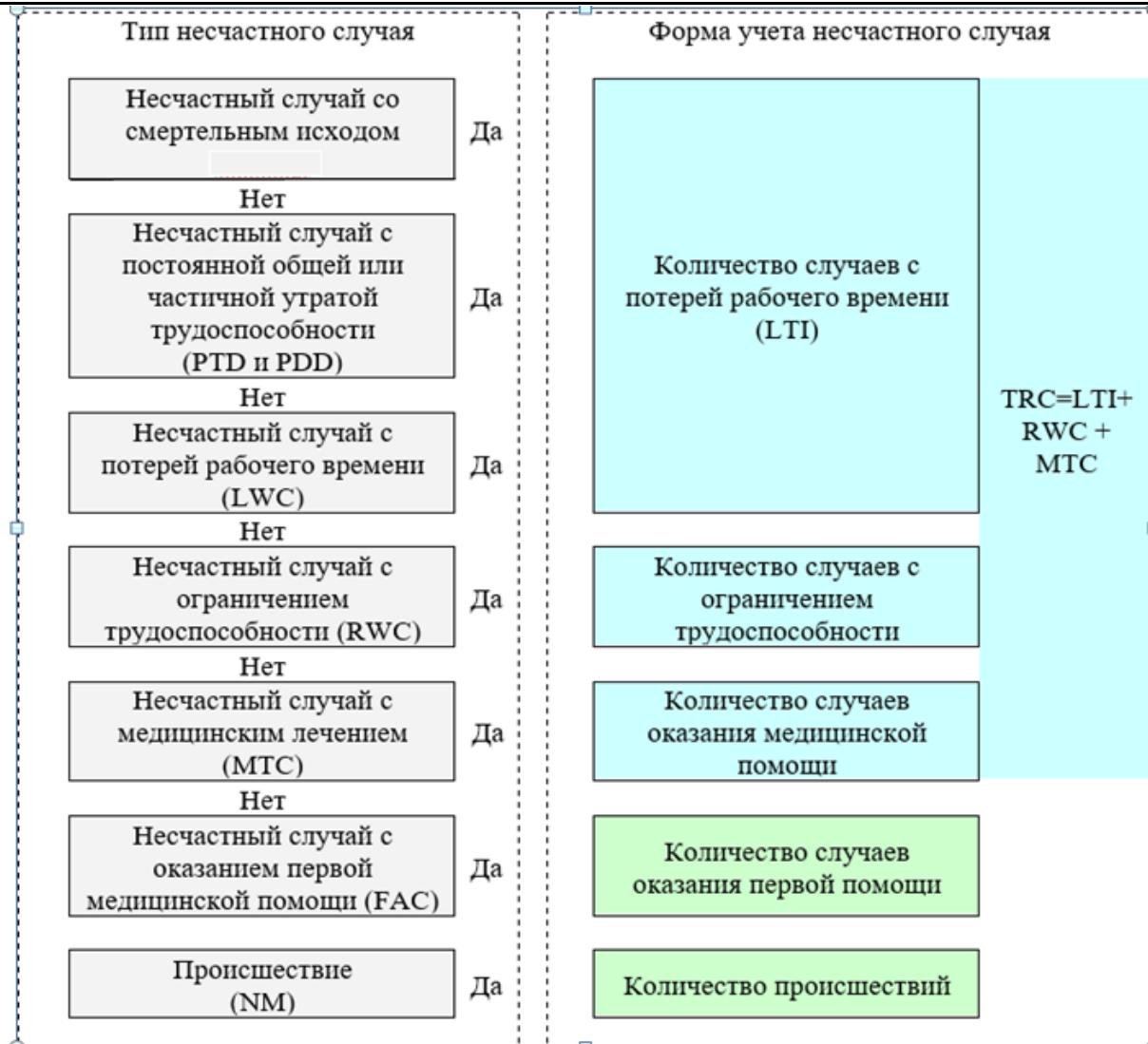


Рис. 1. Схема комплексных решений

Используем совокупность алгоритмического вычисления для вейвлет-преобразования во временной и частотной областях.

Для временной области рекомендуется применять следующий метод расчёта. Вначале определяем материнский вейвлет. Введём допущения, что имеется функция, удовлетворяющая нужным критериям:  $\psi_0(\eta)$ , где  $\eta$  – безразмерный период.

Показатели и коэффициенты	Fatality	LTI, LTIF	TRC, TRCF	$K_u$	$K_{\Pi}$	$K_C$
PTD и PDD						
LWC						
RWC						
MTC						
FAC						
NM						

Рис. 2. Схема показателей и коэффициентов

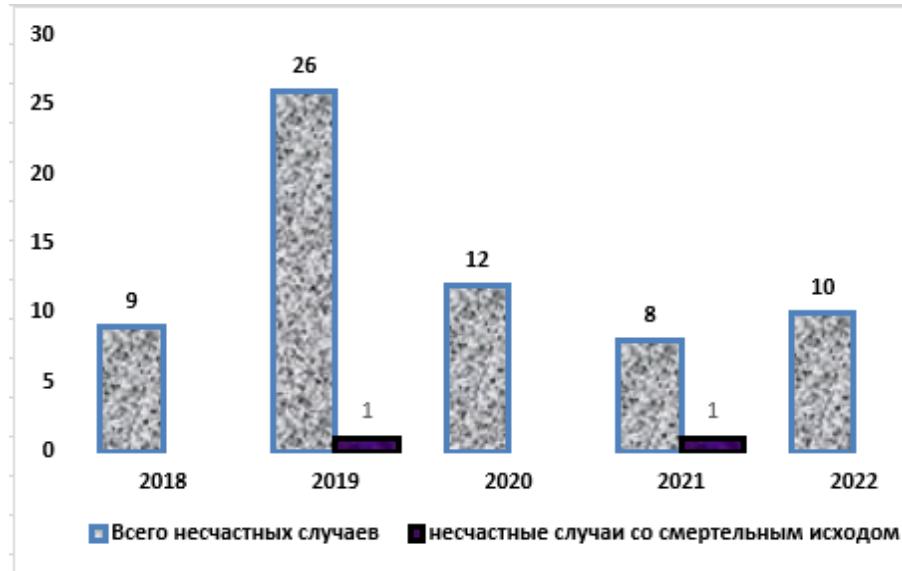


Рис. 3. Общее количество несчастных случаев

Имеются значения  $x_n$ , в моменты времени  $n[0, N-1]$ , где  $N$  – количество измерений и основная формула для материнского вейвлета; необходимо по возможности изменять размеры вейвлета. С этой целью строим «масштабированный» вейвлет следующего вида:

$$\psi\left(\frac{(n'-n)dt}{a}\right) = \left(\frac{dt}{a}\right)^{1/2} \psi_0\left(\frac{(n'-n)dt}{a}\right),$$

где  $a$  – параметр, обратный частоте.

Вычисление вейвлет-преобразования является свёрткой искомой временной серии с функцией-вейвлетом:

$$W_n(a) = \sum_{n'=1}^{N-1} x_{n'} \psi * \left( \frac{(n'-n)dt}{a} \right),$$

где (\*) означает комплексно-сопряжённое.

Результатом расчёта  $W_n(a)$  будет комплексное число.

В частотной области предлагается использовать следующий алгоритм вычисления. Изначально определяем материнский вейвлет. Преобразование Фурье самого вейвлета сконцентрировано вокруг некоторой выделенной частоты  $\omega_0 \neq 0$ . Поэтому преобразование Фурье вейвлета, который растянут в  $a$  раз, сконцентрируется вокруг частоты  $\omega_0 / a$ :

$$W_n(a) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\psi}^*(a\omega_k) e^{i\omega_k ndt},$$

где (\*) означает комплексно-сопряжённое, а знак (^) – преобразование Фурье;

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i kn/N},$$

$$\hat{\psi}(a\omega_k) = \left( \frac{2\pi a}{dt} \right)^{1/2} \hat{\psi}_0(a\omega_k).$$



Для вычисления дискретного вейвлет-преобразования предлагается применение следующего вычислительного комплекса, основанного на свойстве вейвлетов по эффективной обработке случайных сигналов.

Идея вейвлет-представления сигнала  $s(t)$  заключается в разбивке приближения  $\tilde{s}_j(t)$  к сигналу на две составляющие: грубую (аппроксимирующую)  $\tilde{s}_{j-1}(t_i)$  и утончённую (детализирующую)  $\tilde{s}_{j-1}^d(t_i)$  – с последующим их уточнением итерационным методом:

$$\tilde{s}_j(t_i) = \tilde{s}_{j-1}(t_i) + \tilde{s}_{j-1}^d(t_i) = \sum_{k \in Z} a_{j-1,k} \phi_{j-1,k}(t_i) + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(t_i),$$

где  $j$  характеризует уровень разрешения;  $\phi_{j-1,k}(t_i), \psi_{j-1,k}(t_i)$  – соответственно масштабирующая (аппроксимирующая) и вейвлет-функция (детализирующая функция);  $Z = \{..., -1, 0, 1, ...\}$  – множество целых чисел;  $a_1 = \{a_{j-1,k}\}$ ,  $d_1 = \{d_{j-1,k}\}$  – соответственно наборы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов разложения ( $j-1$ ) уровня разрешения.

Аппроксимирующие функции  $\phi(t)$  – множество целых чисел. Аппроксимирующие функции  $\phi(t)$  присущи далеко не всем вейвлетам, а только тем, которые относятся к ортогональным. Приближению соответствует начальный набор коэффициентов  $a_0 = \{a_{j,k}\}$ . В качестве  $a_0 = \{a_{j,k}\}$  выбираем массив значений сигнала  $s(t), a_{ji} = s(t_i)$ .

Повторяя процедуру  $m$  раз,  $m = 1..M$ , разлагая каждый раз сглаженную функцию  $\tilde{s}_{j-m}(t_i)$  на ещё более сглаженную часть  $\tilde{s}_{j-m-1}(t_i)$  и детализирующую часть  $\tilde{s}_{j-m-1}^d(t_i)$ , получим вейвлет-разложение аппроксимации  $j$ -го уровня разрешения  $\tilde{s}(t)$  для глубины разложения  $m$ :

$$\tilde{s}_j(t_i) = \tilde{s}_{j-m}(t_i) + \tilde{s}_{j-m}^d(t_i) + \dots + \tilde{s}_{j-1}^d(t_i);$$

$$\tilde{s}_j(t_i) = \sum_{k \in Z} a_{j-m,k} \phi_{j-m,k}(t_i) + \sum_{k \in Z} d_{j-m,k} \psi_{j-m,k}(t_i) + \dots + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(t_i).$$

Вейвлет-разложение изобразим в виде следующей схемы нахождения коэффициентов:

$$\tilde{s}_j(t_i) = a_0 \rightarrow \{a_1, d_1\} \rightarrow \{a_2, d_2, d_1\} \rightarrow \dots \rightarrow \{a_M, d_M, d_{M-1}, \dots, d_1\}.$$

Практическая обработка и представление реальных сигналов базируются на трактовке вейвлет-преобразований в частотной области и позволяют плодотворно использовать аппарат частотной фильтрации и методы быстрого вейвлет-преобразования.

Графическое представление обработки сигнала представлено на рис. 4.

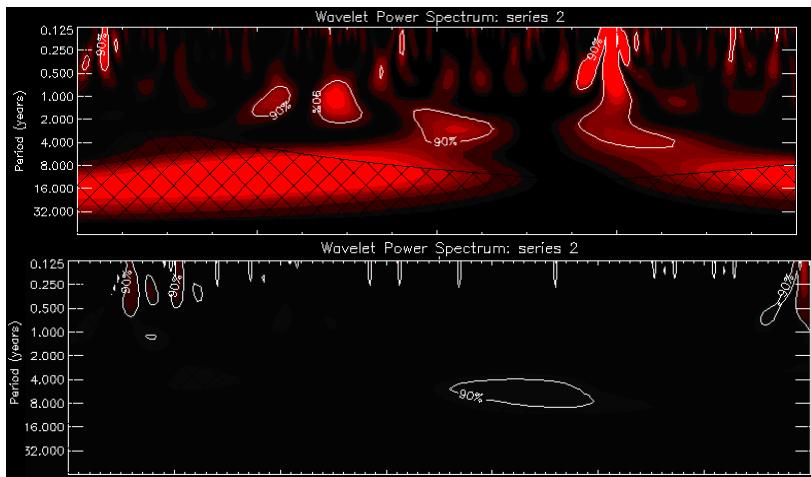
По результатам обработки массива данных применительно к предложенной модели получили, что самыми травмоопасными профессиями являются следующие профессии: слесарь-ремонтник, электромонтёр, ИТР и подручный сталевара, газорезчик и электросварщик, оператор машин. Все эти профессии связаны со сложными условиями работы, т. к. требуются постоянное внимание и опыт работы.

На основе вышеисследованных факторов можно провести суперпозиционирование групп риска путём наложения полученных графиков. При анализе уровня риска по профессиям в группу риска попали следующие профессии: шихтовщик, кузнец, прессовщик лома и отходов, обжигальщик известни, подручный сталевара.

Разделим всех работников на категории опасности травмирования.

1-я категория – «Чрезвычайно травмоопасная». В эту категорию вошла группа работников, занятых на производстве по профессии подручный сталевара. Данная группа является самой трав-

моопасной, необходимо применять не только меры предосторожности во время работы, но и предventивные меры.



Участок яркого цвета – максимальная вероятность появления травм.

Участок тёмного цвета – минимальная вероятность возникновения травм

Рис. 4. Вейвлет-спектры

2-я категория – «Высоко травмоопасная». В эту категорию вошли группы работников, занятых на производстве по следующим видам профессий: шихтовщик, газорезчик и электросварщик, электромонтёр, оператор машин, слесарь-ремонтник, ИТР.

3-я категория – «Умеренно травмоопасная». В эту категорию попали группы работников: кузнец, прессовщик лома и отходов, огнеупорщик, разливщик стали, машинист. Это группы работников, которые попали в травмоопасную зону по 3 факторам.

4-я категория – «Малотравмоопасная» – группа работников, попавших в травмоопасную зону по 2-3 факторам. При этом также необходимо учитывать степень важности факторов. Это такие профессии, как вальцовщик, обжигальщик известняка, станочник, сталевар, кладовщик, котельщик, водитель, уборщик.

Для более углублённого анализа производственного травматизма проведём позиционирование по таким факторам, как подразделение, причины несчастных случаев и факторы, повлиявшие на образование несчастного случая.

Высокий уровень риска производственного травматизма создают такие причины, как неудовлетворительная организация работ и рабочих мест, личная неосторожность работников предприятия, нарушение инструкций по технике безопасности и недостаточность обучения персонала безопасным методам работы. Наиболее опасным производственным фактором является воздействие движущихся, врачающихся механизмов и движущихся, врачающихся и разлетающихся деталей, падение предмета, затем – воздействие вредных веществ и падение пострадавшего.

Основные направления разработки плана мероприятий:

- модернизация оборудования и транспортных средств;
- внедрение дистанционного управления оборудованием, подъёмно-транспортными средствами;
- совершенствование технологических процессов;
- изменение последовательности операций с перепланировкой рабочих мест;
- улучшение инженерно-технических средств безопасности (монтаж ограждений, предохранительных устройств, установка сигнальных цветов и знаков безопасности);
- общее улучшение условий труда;
- улучшение состояния воздушной среды, освещённости рабочих мест, борьба с шумом и вибрацией.



Материально-техническое обеспечение и приобретение:

- приборов для контроля за вредными факторами;
- СИЗ;
- сатураторных установок;
- моющих средств.

Предложенные в работе эффективные мероприятия позволяют добиться улучшения условий труда и снижения производственного травматизма.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко, Е. Г. Программа оценки результативности систем менеджмента качества предприятия / Е. Г. Кравченко, А. А. Китаева, Н. Ю. Коровина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 13-18.
2. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон РФ от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 07.03.2017) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9046058> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
3. Об утверждении Рекомендаций по организации работы Службы охраны труда в организациях: Постановление Минтруда России от 08 февраля 2000 г. № 14 (ред. от 12.02.2014) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901758673> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
4. Трудовой кодекс Российской Федерации: Федеральный закон РФ от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
5. Носенко, А. М. Исследование и методология оценки профессиональных рисков в организациях нефтехимического комплекса / А. М. Носенко // Электронное периодическое издание «Аллея науки». – 2018. – № 5. – URL: [http://alleyscience.ru/domains\\_data/files/514MAY2018/ISSLEDOVANIE%20I%20METODOLOGIYa%20OCENKI%20PROFESSIONALNYH%20RISKOV%20V%20ORGANIZACIYaH%20NEFTEHIMICHESKOGO%20KOMPLEKSA.pdf](http://alleyscience.ru/domains_data/files/514MAY2018/ISSLEDOVANIE%20I%20METODOLOGIYa%20OCENKI%20PROFESSIONALNYH%20RISKOV%20V%20ORGANIZACIYaH%20NEFTEHIMICHESKOGO%20KOMPLEKSA.pdf) (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный.
6. ГОСТ Р 12.0.230-2007. Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда. Общие требования = Occupational safety standards system. Occupational safety and health management systems. General requirements: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 июля 2007 г. № 169-ст // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200052851> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
7. Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: Федеральный закон РФ от 24 июля 1998 г. № 125-ФЗ (ред. от 07.03.2018) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901713539> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
8. Об организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасном производственном объекте: Постановление Правительства РФ от 10 марта 1999 г. № 263 (ред. от 28.02.2018) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901728088> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
9. Денисов, Э. И. Управление профессиональными рисками: прогнозирование, каузация и биоинформационные технологии / Э. И. Денисов, Л. В. Прокопенко, И. В. Степанян // Вестник РАМН. – 2012. – № 6. – С. 51-56.
10. Соколова, Л. А. Оценка и управление профессиональным риском нарушения здоровья работников промышленного комплекса г. Архангельска / Л. А. Соколова, Л. В. Прокопенко // Медицина труда и промышленная экология. – 2009. – № 8. – С. 25-29.
11. Иванов, В. М. Интеллектуальные системы: учеб. пособие для вузов / В. М. Иванов; под науч. ред. А. Н. Сесекина. – М.: Юрайт, 2017. – 91 с.
12. Кудрявцев, К. Я. Методы оптимизации: учеб. пособие для вузов / К. Я. Кудрявцев, А. М. Прудников. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2019. – 140 с.

**Стельмащук С. В., Лакеев Ю. И.**

СИСТЕМА ПОДЧИНЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ СКАЛЯРНЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С НЕЗАВИСИМЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Стельмащук С. В., Лакеев Ю. И.**

**S. V. Stelmashchuk, Yu. I. Lakeev**

## **СИСТЕМА ПОДЧИНЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ СКАЛЯРНЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С НЕЗАВИСИМЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

### **SUBORDINATE CONTROL SYSTEM OF A SCALAR FREQUENCY-CONTROLLED MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE WITH A SEPARATE CONNECTION OF ASYNCHRONOUS MOTORS**

**Стельмащук 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 Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

**Лакеев Илья Юрьевич** – бакалавр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ilya\_12\_04@mail.ru.

**Ilya Yu. Lakeev** – Bachelor's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ilya\_12\_04@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрена одноконтурная система подчинённого управления многодвигательным электроприводом, объект управления которого представляет собой независимое соединение частотно-регулируемых асинхронных двигателей со скалярным управлением. Осуществляется регулирование скорости рабочего органа без ограничения тока двигателей с общим регулятором скорости для всех двигателей. Задача равномерного распределения нагрузки между двигателями осуществляется с помощью частотной коррекции, которая не учитывается при стандартной настройке системы подчинённого управления. Система управления скоростью и система распределения нагрузки, реализуемой частотной коррекцией, разрабатываются независимо друг от друга, т. е. настройка многодвигательного электропривода как объект управления является независимой от частотной коррекции. В статье рассмотрена стандартная настройка как на модульный, так и на симметричный оптимум с учётом того, что многодвигательный электропривод как объект управления имеет различные значения жёсткости и электромагнитной постоянной времени.

**Summary.** The paper considers a single-circuit system of subordinate control of a multi-motor electric drive, the control object of which is an independent connection of frequency-controlled asynchronous motors with scalar control. The speed of the working body is regulated without limiting the current of the motors with a common speed controller for all motors. The task of evenly distributing the load between the engines is carried out using frequency correction, which is not taken into account in the standard configuration of the subordinate control system. The speed control system and the load distribution system implemented by frequency correction are developed independently of each other, i.e. the setting of a multi-motor electric drive as a control object is independent of frequency correction. The paper considers the standard settings for both modular and symmetrical optimum, taking into account the fact that a multi-motor electric drive as a control object has different values of stiffness and electromagnetic time constant.

**Ключевые слова:** стандартная настройка, частотная коррекция, общий механический вал, контур скорости.

**Key words:** standard tuning, frequency correction, common mechanical shaft, speed contour.

УДК 62-882:621.3.078:621.316.728

**Введение.** Среди общепромышленных механизмов существуют случаи, когда необходимо вращать рабочий орган несколькими двигателями. Это связано с конструктивными особенностями некоторых механизмов, где требуется равномерное пространственное распределение мощностей



привода. В таких случаях используются многодвигательные электроприводы (МЭП), где валы двух или нескольких двигателей механически жёстко связаны с общим валом рабочего органа.

Основной задачей в управлении двигателями в МЭП является равномерное распределение нагрузки на валу рабочего органа между валами двигателей. В силу различий активного и индуктивного сопротивлений статора и ротора, механические характеристики асинхронных двигателей будут иметь различные жёсткости, и, как следствие, это приведёт к распределению суммарного момента нагрузки на различные значения нагрузок на валах двигателей. Одни двигатели будут недогружены, другие перегружены. Перегруженные двигатели выходят из строя раньше срока эксплуатации, что ведёт к ухудшению амортизации оборудования. Поэтому равномерное распределение нагрузки является актуальной задачей.

Разработке различных способов выравнивания нагрузки посвящено много работ. Одним из способов является выравнивание нагрузки через выравнивание токов статора [1; 2]. Для этого используют скалярное управление частотным приводом, где каждый двигатель питается собственным преобразователем частоты. Система управления МЭП реализуется в виде системы подчинённого двухконтурного управления, где каждый двигатель имеет свой собственный внутренний контур тока статора, а также имеется общий на весь привод контур скорости. Идея заключается в том, что ток статора пропорционален выходной мощности двигателя. С другой стороны, выходная мощность – это момент двигателя, умноженный на скорость, а скорость у всех механически жёстко связанных двигателей одинакова. Таким образом, регулируя ток статора, регулируем мощность, а следовательно, и момент двигателя. Предполагается, что контуры тока статора, имеющие одинаковую стандартную настройку, должны одинаково регулировать моменты двигателей от одного сигнала с общего регулятора скорости. Однако практика показала, что выравнивание моментов осуществляется только в статике, но не в динамике [3].

Ещё одним способом выравнивания нагрузки является использование схемы «ведущий-ведомый» [3; 4]. Здесь предлагается использовать векторный частотный привод с прямым управлением момента. На вход каждого частотного привода подаётся сигнал задания момента с выхода общего регулятора скорости, который измеряется на ведущем приводе. Также предлагается вариант по системе «ведущий-ведомый», где каждый привод имеет свой контур регулирования момента и скорости. Выравнивание нагрузок между приводами осуществляется через управление соотношением моментов, которое выполняется на уровне регулируемого ограничения момента ведомых приводов, по величине момента ведущего привода [5]. Здесь также предлагается использовать векторное управление частотными приводами.

Безусловно, частотные привода с векторным управлением однозначно решают задачу равномерного распределения нагрузки. Но преобразователи частоты с векторным управлением являются дорогостоящими. Учитывая, что МЭП может содержать большое количество двигателей и для каждого двигателя необходим дорогостоящий преобразователь, можем сделать вывод, что подобный МЭП имеет недостаток, обусловленный высокой стоимостью электрооборудования.

**Постановка проблемы.** Все рассматриваемые выше способы можно охарактеризовать одним подходом – это непосредственное, прямое или косвенное (через ток статора) влияние на момент каждого двигателя в МЭП. Для этого обязательно наличие контура момента или тока статора. Устройство измерения момента двигателя является технологически сложным, а следовательно, дорогостоящим.

Выравнивание нагрузок между частотно-регулируемыми асинхронными двигателями с независимым соединением к общему механическому валу прежде всего это параллельное смещение механических характеристик двигателей таким образом, чтобы они пересекались на среднем значении моментов нагрузки двигателей при заданной скорости. Для параллельного смещения механических характеристик необходимо регулировать синхронные скорости частотных приводов.

В статье предлагается использовать частотные преобразователи со скалярным управлением и одноконтурную систему регулирования скорости с общим регулятором скорости со стандартной настройкой. Скалярное управление позволяет реализовать общий выпрямитель на суммарную мощность МЭП и для каждого двигателя отдельный инвертор, с помощью которого определяется

частота статора и, следовательно, синхронная скорость двигателя  $\omega_{0i}$  (см. рис. 1). Данная техническая реализация значительно снижает стоимость электрооборудования.

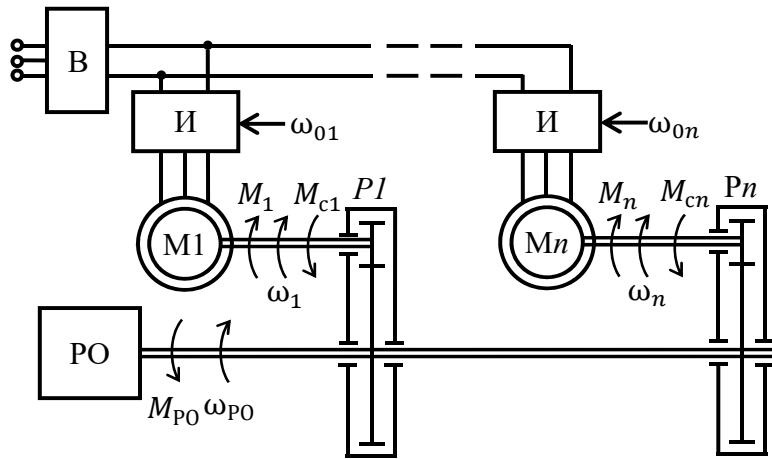


Рис. 1. Частотный многодвигательный электропривод со скалярным управлением

Формирование для каждого двигателя отдельной синхронной скорости  $\omega_{0i}$  осуществляется с помощью частотной коррекции, где параллельное смещение механической характеристики двигателя осуществляется небольшим изменением заданной синхронной скорости МЭП  $\omega_0$  на некоторую величину  $\Delta\omega_i$ . Условием частотной коррекции является не только равномерное распределение нагрузки, но и независимость настройки МЭП как объекта управления от частотной коррекции, т. е. реакция объекта управления с коррекцией на управляющее воздействие должна быть той же, что и объекта управления без коррекции. Это позволяет использовать те же формулы стандартной настройки регуляторов, что и для индивидуального частотного электропривода со скалярным управлением.

Подход, основанный на частотной коррекции, можно реализовать в соответствии с принципом «ведущий-ведомый», где на ведущий привод задаётся основная синхронная частота  $\omega_{01} = \omega_0$ , а для остальных осуществляется подкоррекция  $\omega_{0i} < \omega_0$  [6]. Но в этом случае жёсткость механической характеристики МЭП обусловливается только жёсткостью ведущего двигателя. В рамках данной статьи осуществляется равноправная коррекция всех двигателей, и жёсткость МЭП является суммирующей характеристикой всех двигателей.

**Структурная схема объекта управления.** За основу выбрана структурная схема одиночного асинхронного двигателя с частотным преобразователем со скалярным управлением [7; 8]. Так как двигатели жёстко связаны с валом рабочего органа, то механическая часть в структурной схеме МЭП является общей и в операторном виде описывается уравнением

$$J_{\Sigma} p\omega = M - M_c, \quad (1)$$

где  $\omega = \omega_i = i_p \omega_{PO}$  – скорость одного из двигателей (они все равны);  $M_c = M_{PO}/i_p = \sum M_{ci}$  – нагрузка на валу рабочего органа, приведённая к валам двигателей (суммарная нагрузка на всех валах двигателей  $M_{ci}$ ), здесь  $i_p$  – передаточное число редуктора (у всех двигателей также равны);  $\omega_{PO}$  – скорость вала рабочего органа;  $M_{PO}$  – нагрузка на валу рабочего органа;  $M = \sum M_i$  – суммарный электромагнитный момент на всех валах двигателей  $M_i$ ;  $J_{\Sigma} = \delta_p n J_d + J_{PO}/i_p^2$  – суммарный момент инерции МЭП, здесь  $\delta_p$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;  $J_d, J_{PO}$  – моменты инерции двигателя и рабочего органа соответственно;  $i = 1 \dots n$ ;  $n$  – количество двигателей в МЭП.

У каждого двигателя своя электрическая часть на структурной схеме МЭП как объекта управления, каждая из которых описывается операторным уравнением:

$$M_i = \frac{\beta_i}{T_{\vartheta i} p + 1} (\omega_{0i} - \omega), \quad (2)$$

где  $T_{\vartheta i}$ ,  $\beta_i$ ,  $\omega_{0i}$  – соответственно электромагнитная постоянная времени, модуль жёсткости линеаризованной механической характеристики и синхронная скорость  $i$ -го асинхронного электродвигателя.

С учётом уравнений (1) и (2) структурная схема частотного МЭП со скалярным управлением представлена на рис. 2.

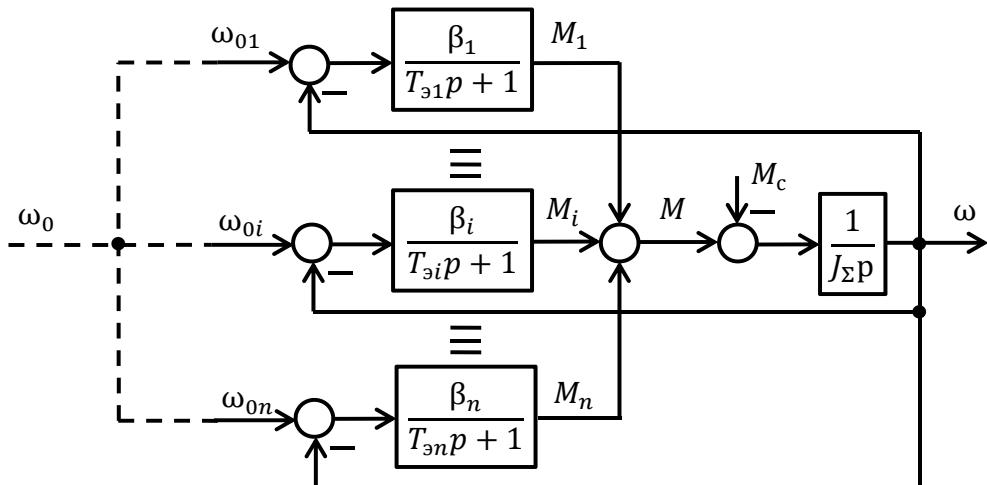


Рис. 2. Структурная схема частотного МЭП с независимым соединением асинхронных двигателей как объекта управления

**Частотная коррекция.** Для решения задачи равномерного распределения нагрузки на двигателях используем частотную коррекцию для каждого двигателя:

$$\omega_{0i} = \omega_0 - \Delta\omega_i, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  – управляющее воздействие объекта управления.

Для выполнения условия равномерного распределения нагрузки приравняем механическую характеристику для  $i$ -го двигателя с равномерно распределённой нагрузкой и механической характеристикой МЭП:

$$\omega = \omega_{0i} - \frac{M}{n\beta_i}; \quad \omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta},$$

где  $\beta = \sum \beta_i$  – жёсткость линеаризованной механической характеристики МЭП.

Из первого уравнения выразим синхронную скорость двигателя  $\omega_{0i}$ , а из второго – суммарный электромагнитный момент  $M$ , который подставим в первое уравнение:

$$\omega_{0i} = \omega + \frac{\beta}{n\beta_i} (\omega_0 - \omega).$$

Приведя подобные, приравняем к выражению (3) для удовлетворения условия независимости настройки объекта управления от частотной коррекции:

$$\frac{\beta}{n\beta_i} \omega_0 - \left( \frac{\beta}{n\beta_i} - 1 \right) \omega = \omega_0 - \Delta\omega_i. \quad (4)$$

Выразим из (4) величину частотной коррекции:

$$\Delta\omega_i = \alpha_i (\omega_0 - \omega),$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент частотной коррекции,

$$\alpha_i = 1 - \frac{\beta}{n\beta_i}.$$

На рис. 3 представлена структурная схема двигателя МЭП с частотной коррекцией.

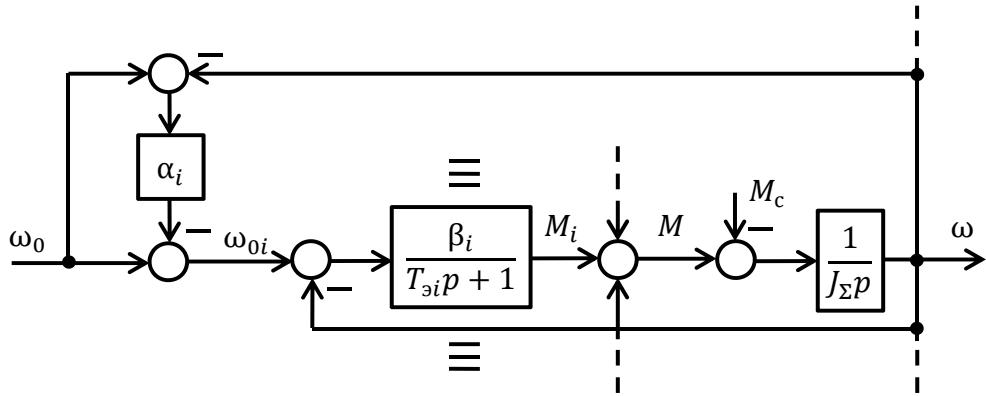


Рис. 3. Структурная схема асинхронного электродвигателя с частотной коррекцией

**Стандартная настройка объекта управления.** Независимость настройки объекта управления от частотной коррекции позволяет не учитывать звенья с коэффициентами  $\alpha_i$  при определении общей передаточной функции объекта управления. Следовательно, можно принять, что  $\omega_{0i} = \omega_0$  для  $i = 1 \dots n$ . Тогда для определения общей передаточной функции объекта управления из (1) можно представить скорость как

$$J_\Sigma p \omega = \sum M_i - M_c.$$

Учитывая (2) и  $\omega_{0i} = \omega_0$  получим

$$J_\Sigma p \omega = (\omega_0 - \omega) \sum \frac{\beta_i}{T_{\vartheta i} p + 1} - M_c. \quad (5)$$

Если частоты сопряжения  $1/T_{\vartheta i}$  располагаются в частотной области в пределах полдекады, то можно принять что

$$\sum \frac{\beta_i}{T_{\vartheta i} p + 1} \approx \frac{\beta}{T_\vartheta p + 1}, \quad (6)$$

где  $T_\vartheta = \sum T_{\vartheta i} / n$  – электромагнитная постоянная времени МЭП.

Тогда по выражению (5) с учётом (6) можно составить структурную схему частотного МЭП (см. рис. 2). Без учёта частотной коррекции обобщённая структурная схема системы автоматического регулирования (САР) скорости системы ЧП-АД будет представлять собой систему в классическом виде (см. рис. 4).

Обобщённая структурная схема МЭП в классическом виде позволяет осуществлять стандартную настройку частотного МЭП по известным формулам [9; 10] без учёта частотной коррекции:

- для настройки на модульный оптимум

$$W_{PC}(p) = K_{pc};$$

- для настройки на симметричный оптимум

$$W_{\text{PC}}(p) = K_{\text{pc}} \frac{T_{\text{pc}}p + 1}{T_{\text{pc}}p},$$

где  $K_{\text{pc}}$ ,  $T_{\text{pc}}$  – коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости,

$$K_{\text{pc}} = \frac{T_m}{2T_\mu K_\pi K_{dc}}, \quad T_{\text{pc}} = 4T_\mu, \quad (7)$$

здесь  $T_\mu = T_\pi + T_\vartheta$  – малая некомпенсируемая постоянная времени;  $T_m = J_\Sigma/\beta$  – электромеханическая постоянная времени;  $K_\pi = \omega_{0\text{H}}/u_{\max}$ ,  $T_\pi$  – коэффициент пропорциональности и постоянная времени частотного преобразователя;  $K_{dc} = u_{\max}/\omega_{0\text{H}}$  – коэффициент пропорциональности датчика скорости;  $u_{\max}$  – максимальное значение сигнала управления;  $\omega_{0\text{H}}$  – номинальная синхронная скорость.

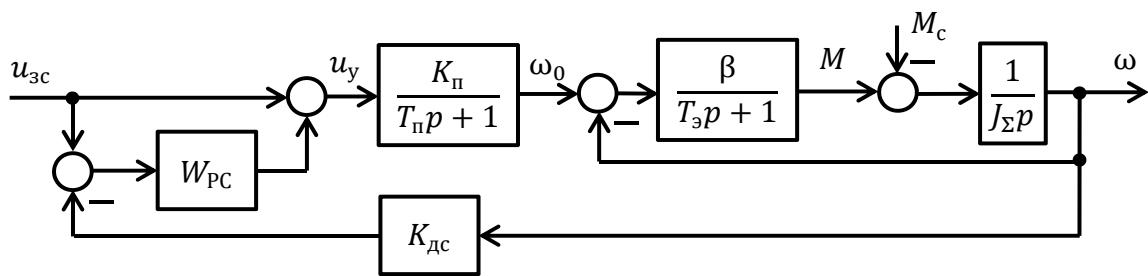


Рис. 4. Структурная схема САР скорости частотного МЭП с независимым соединением асинхронных двигателей в упрощённом виде

**Математическое моделирование МЭП.** Так как коэффициенты пропорциональности преобразователя и датчика скорости обратно пропорциональны  $u_{\max}/\omega_{0\text{H}} = K_{dc} = 1/K_\pi$  и можно принять  $T_\pi \approx 0$ , то можно допустить, что  $(T_\pi p + 1)/K_\pi \approx K_{dc}$ . Тогда узел частотной коррекции для  $i$ -го частотного привода представлен на рис. 5.

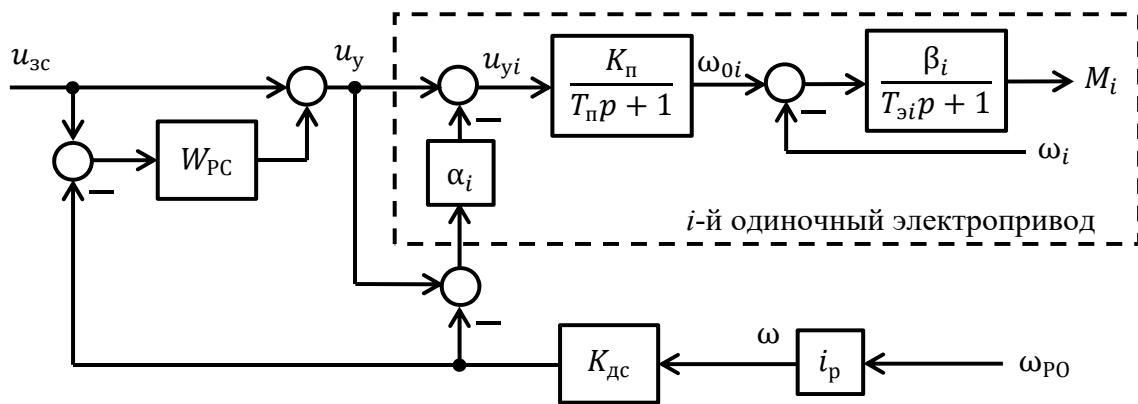


Рис. 5. Структурная схема частотной коррекции  $i$ -го одиночного электропривода в МЭП с учётом преобразователя частоты

Для примера выбран асинхронный двигатель серии МТМ мощностью 50 кВт. Имитационная модель МЭП из трёх двигателей представлена на рис. 6. Предполагается, что в двигателях с небольшим отклонением отличаются активные сопротивления роторов  $R'_{2i}$ . Это означает, что у двигателей будут различные критические скольжения  $s_{ki} = R'_{2i}/\sqrt{R_1^2 + X_k^2}$ , а следовательно, и раз-

личные жёсткости  $\beta_i = 2M_k/(\omega_{0h}s_{ki})$  и электромагнитные постоянные времени  $T_{\vartheta i} = 1/(2\pi f_{1h}s_{ki})$ , где  $M_k$  – критический момент, который не зависит от  $R_{2i}^f$  и поэтому у всех двигателей одинаковый;  $f_{1h}$  – номинальная частота статора;  $R_1$  – активное сопротивление статора;  $X_k$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Момент инерции механизма подобран таким образом, чтобы  $T_m > 4T_\vartheta$ . После вычисления параметров двигателей (на модели b1, b2, b3 – жёсткости, Te1, Te2, Te3 – электромагнитные постоянные времени, Kp, Tr – параметры частотного преобразователя, J – суммарный момент инерции), вычисляются коэффициенты частотной коррекции (на модели a1, a2, a3), коэффициент датчика скорости (на модели Kds) и параметры регулятора скорости (на модели Krs и Trs), рассчитанные по формулам (7).

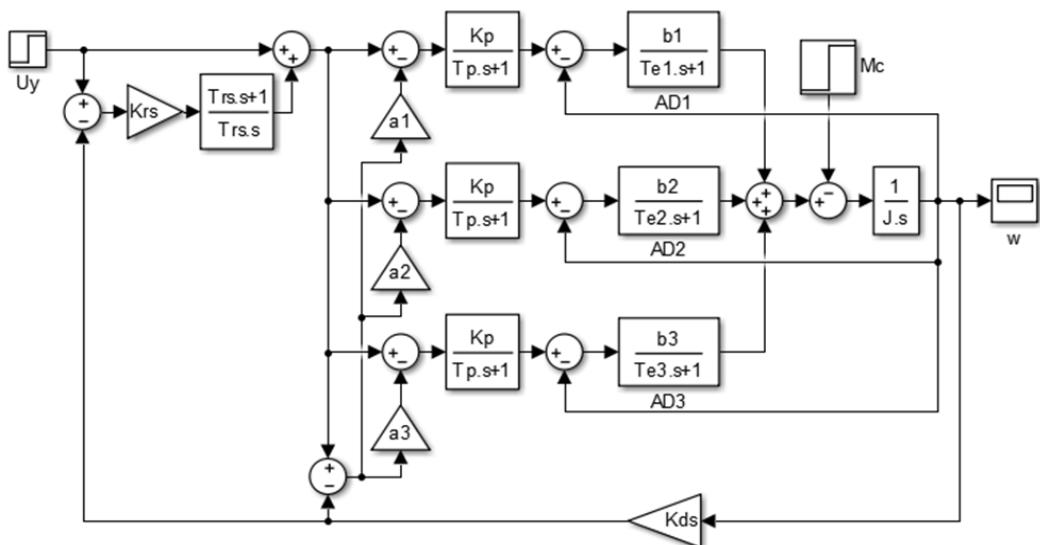


Рис. 6. Имитационная модель МЭП из трёх двигателей серии МТМ

На рис. 7 приведены результаты моделирования, характеризующие изменение скорости САР МЭП, соответствующие малой постоянной времени  $T_\mu = 0,0166$  с. Видно, что переходные процессы соответствуют требованиям стандартных настроек.

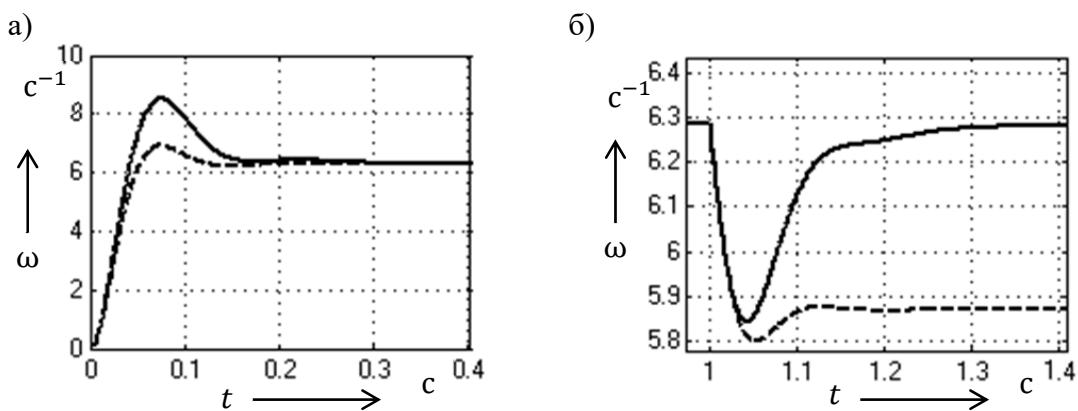


Рис. 7. Результаты моделирования изменения скорости имитационной модели САР МЭП, настроенной на модульный (пунктирная линия) и симметричный (сплошная линия) оптимум по управлению (а) и возмущению (б)

На рис. 8 представлены графики изменения моментов отдельных двигателей с отключённой и включённой частотной коррекцией при настройке на симметричный оптимум. Несмотря на то что частотная коррекция разрабатывалась на основе механической характеристики, т. е. по статическим характеристикам, равномерное распределение нагрузки осуществляется и в динамическом режиме. Это видно по графикам на рис. 8: не только установившиеся значения, но и переходные процессы моментов двигателей совпадают.

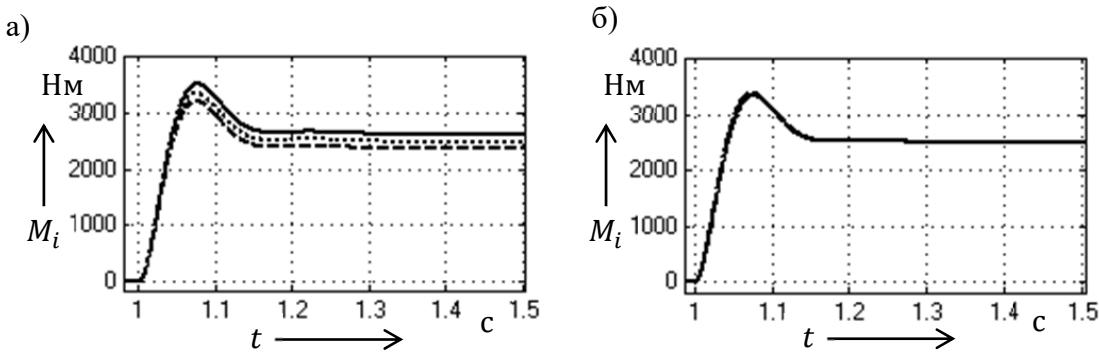


Рис. 8. Графики переходных процессов моментов двигателей МЭП при отключённой (а) и включённой (б) частотной коррекции

При отключённой частотной коррекции переходные процессы скорости не изменяются и также соответствуют стандартной настройке, что говорит о независимости настройки объекта управления от частотной коррекции. САР и система частотной коррекции работают независимо друг от друга.

#### Выводы:

1. Проблема равномерного распределения нагрузки между двигателями МЭП осуществляется без использования дорогостоящего оборудования, с помощью скалярного частотно-регулируемого электропривода с общим выпрямителем и одноконтурной системы подчинённого управления. Это достигнуто благодаря независимому соединению двигателей и использованию частотной коррекции, позволяющей параллельно смещать механические характеристики частотно-регулируемых двигателей.

2. Независимость настройки МЭП как объекта управления от частотной коррекции позволяет использовать те же формулы стандартной настройки, что и для одиночного скалярного частотно-регулируемого электропривода.

3. Равноправная частотная коррекция без разделения двигателей на ведущего и ведомых позволяет формировать динамические и статические характеристики МЭП как суммирующие те же характеристики отдельных двигателей. Это позволило равномерно распределять нагрузку как в статике, так и в динамике.

4. Недостатком является изменчивость коэффициентов частотной коррекции в зависимости от изменчивости параметров двигателей (активного и индуктивного сопротивления), что заставляет использовать дополнительные меры для учёта этой изменчивости. Данный недостаток можно устранить двумя способами: идентификацией параметров двигателей, что достигается электрическим измерением, и использованием нечётких систем управления электроприводами переменного тока [11].

5. Также недостатком является присущее всем одноконтурным системам отсутствие ограничения токов двигателей. Данный недостаток устраняется с помощью задатчика интенсивности [12]. Равномерное распределение нагрузки на всех двигателях позволяет использовать общий задатчик интенсивности на входе контура скорости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабокин, Г. И. Синтез системы управления многодвигательного регулируемого электропривода горных машин / Г. И. Бабокин, Т. В. Насонова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S4. – С. 230-233.
2. Исследование неравномерности нагружения двухдвигательного частотно-регулируемого электропривода скребкового конвейера / Д. М. Шпрехер, Г. И. Бабокин, Е. Б. Колесников, Д. С. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – № 4-5. – С. 37-45.
3. Шпрехер, Д. М. Система управления выравниванием нагрузки в многодвигательном электроприводе скребкового конвейера / Д. М. Шпрехер, Г. И. Бабокин, Д. С. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 3. – С. 56-65.
4. Шпрехер, Д. М. Разработка и исследование систем управления многодвигательным электроприводом шахтного скребкового конвейера / Д. М. Шпрехер, Д. С. Овсянников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 524-531.
5. Лицин, К. В. Реконструкция многодвигательного электропривода тянуше-правильной машины / К. В. Лицин, А. В. Цуканов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 214-219.
6. Копысов, А. В. Двухдвигательный электропривод с жёсткой механической частью в режиме «ведущий-ведомый» / А. В. Копысов, С. В. Стельмащук // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 10-14 апреля 2023 г. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 233-235.
7. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учеб. / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – Москва: Academica, 2005. – 304 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. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011. – 213 с.
10. Аминов, К. С. Проблема внутренней обратной связи в типовой настройке частотного асинхронного электропривода со скалярным управлением / К. С. Аминов, С. В. Стельмащук // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 года. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 176-178.
11. Бузикаева, А. В. Анализ многокаскадных нечётких регуляторов Сугено и Мамдани во внешнем каскаде для систем управления электроприводами переменного тока / А. В. Бузикаева, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII (47). – С. 76-84.
12. Послов, С. В. Особенности моделирования интеллектуальных задатчиков интенсивности / С. В. Послов, А. В. Бузикаева, С. П. Черный // 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. 52-54.



Лямин М. А., Черный С. П.

M. A. Lyamin, S. P. Cherny

## СИСТЕМА СОВМЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МОТОР-КОЛЕСО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

### JOINT CONTROL SYSTEM OF MOTOR-WHEEL ELECTRIC DRIVES OF ROBOTIC TRANSPORTATION SYSTEM FOR TRUNK PIPELINES

**Лямин Михаил Андреевич** – студент магистратуры 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: lyamin.ma@email.knastu.ru.

**Mikhail A. Lyamin** – Master's Degree Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: lyamin.ma@email.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: kerapu@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: kerapu@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе предложена концепция модульной робототехнической транспортной системы широкого назначения для проведения комплексного обслуживания трубопроводов. Особенностью рассматриваемой системы является реализация системы позиционирования на основе ряда блоков функционально связанных электроприводов. В статье описывается синтез системы совместного управления электроприводами типа мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов. Расчетана классическая система управления на основе ПИД-регулятора для случаев усреднённого и относительного движения. Выполнено моделирование системы совместного управления электроприводами с использованием ПИД-закона, и получена переходная характеристика с учётом влияния возмущающего воздействия.

**Summary.** The paper proposes the concept of a modular robotic transport system with a broad name for carrying out complex maintenance of pipelines. A feature of the system under consideration is the implementation of a positioning system based on a number of blocks of functionally connected electric drives. The article describes the synthesis of a system of joint control of motor-wheel electric drives of a robotic transport complex for trunk pipelines. A classical control system based on a PID controller is calculated for cases of averaged and relative motion. The simulation of the system of joint control of electric drives using the PID law is carried out and a transient characteristic is obtained taking into account the influence of the disturbing effect.

**Ключевые слова:** совместное управление, робототехнический транспортный комплекс, взаимосвязанный электропривод.

**Key words:** joint control, robotic transport complex, interconnected electric drive.

УДК 681.5

**Введение.** Системы и средства автоматизации на сегодняшний момент характеризуются высокой степенью гибкости, роботизации, интеллектуальности и, как следствие, универсальности [8–10]. При этом сочетание обозначенных характеристик зачастую приводит к возникновению различных коллизий, связанных как с формализацией технологического процесса, так и с форми-

рованием процедур регулирования в условиях действия ряда критериев, ограничений и требований к объекту управления. Транспортировка энергетических ресурсов с применением магистральных трубопроводов в настоящее время является приоритетной областью в условиях действия ограничений не только технического, экономического, но и политического характера. Это обуславливает создание и разработку специализированных робототехнических устройств для автоматизации целого ряда технологических процессов, протекающих внутри магистральных трубопроводов, при выполнении работ по его прокладке и обслуживанию. К числу таких устройств может быть отнесён и разрабатываемый робототехнический транспортный комплекс (РТК), предназначенный для выполнения технологических операций внутри трубопроводов переменного сечения. Одним из ключевых элементов РТК является система регулируемых автономных электроприводов, располагаемых на регулируемых опорах. Техническую реализацию электропривода предложено выполнять в виде законченного конструктива мотор-колесо, основное назначение которого обеспечить перемещение РТК по внутренней поверхности трубопровода. Поскольку система автономно регулируемых приводов жёстко привязана к телу РТК, то возникает необходимость оценки целесообразности построения системы совместного управления электроприводами.

**Описание объекта управления.** На рис. 1 приведён общий вид одного из возможных вариантов технического исполнения РТК. Данный робот оснащён набором радиально расположенных упорных ног с зафиксированными на концах каждой мотор-колёсами. Система упоров выполнена регулируемой, снабжена системой датчиков, осуществляющих измерение расстояния от тела транспортной платформы до поверхности трубы, что в итоге позволяет центрировать положение РТК в трубе и осуществлять повороты робота за счёт смещения его центра относительно центральной оси трубопровода. Кроме того, изменение длины упора позволяет регулировать усилие прижима мотор-колеса к поверхности трубы. Реализация системы перемещения на основе группы автономных электроприводов предполагает два возможных варианта построения систем управления электроприводами:

- с индивидуальной системой регулирования скорости каждого мотор-колеса с контролем его скорости;
- с совместным управлением скоростями мотор-колёс с контролем среднего значения скорости.

Первый вариант относительно прост в реализации, ориентирован на стандартные настройки регуляторов и обеспечит приемлемые характеристики электропривода в статических режимах работы.

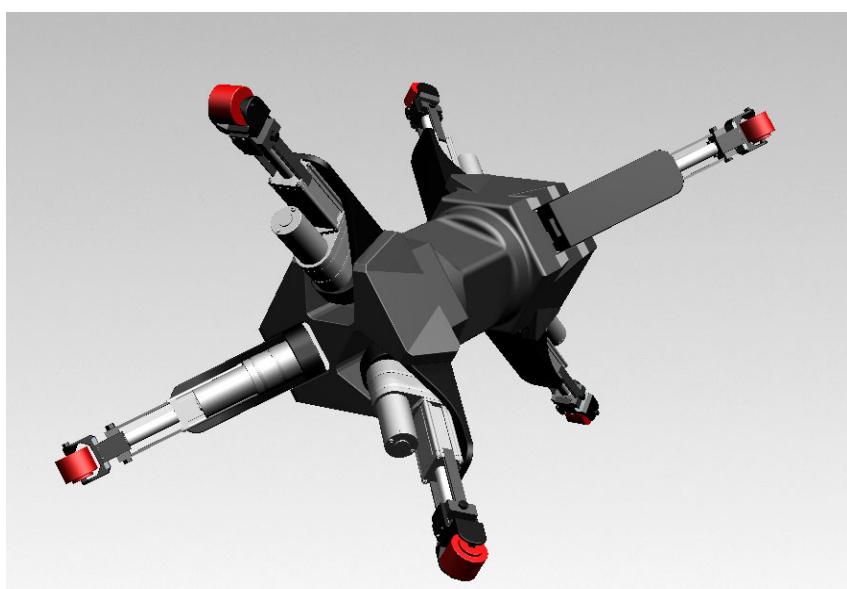


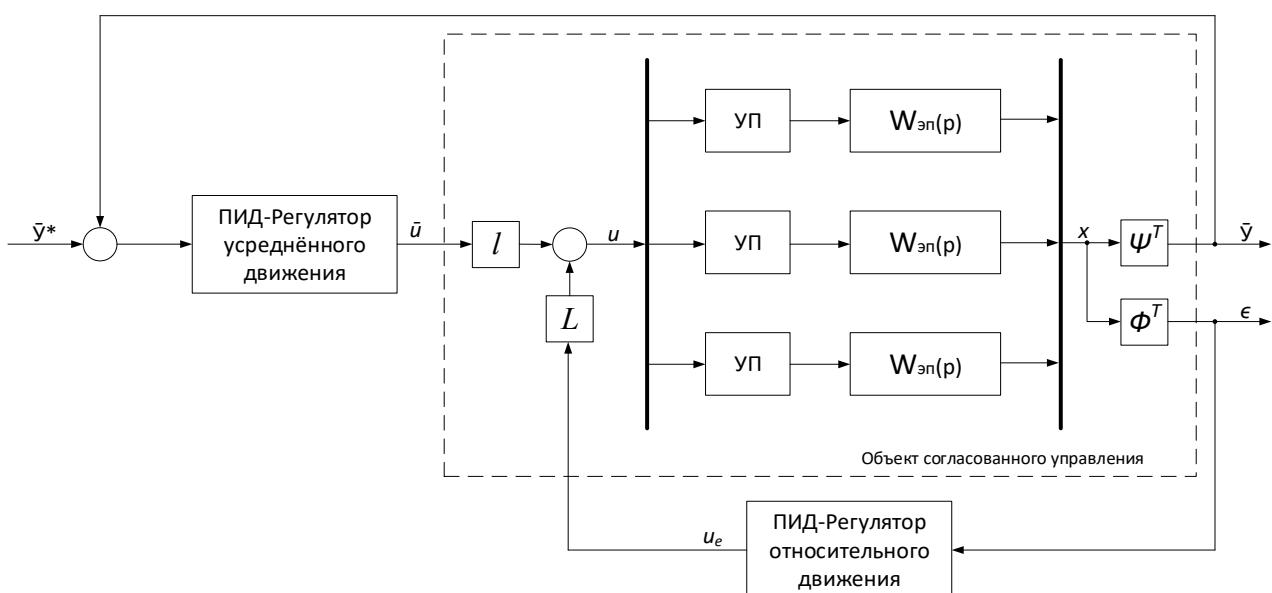
Рис. 1. Модель РТК для магистральных трубопроводов

В динамических режимах работы, при необходимости учёта специфических особенностей трубопровода (наличие поворотных сегментов, изменение диаметра, различная структура поверхности, загрязнённость и т. п.), предпочтение следует отдать второму варианту.

Дальнейший материал ориентирован на исследование второго варианта системы управления перемещением РТК.

**Постановка задачи.** При разработке и исследовании будем полагать, что каждая система мотор-колесо представляет собой систему автономного электропривода, содержащую собственно двигатель с индивидуальным управляемым преобразователем. Связь между электроприводами абсолютно жёсткая. Электроприводы реализованы на базе машины постоянного тока. За базовый электропривод, контролирующий среднее значение скорости перемещения принимается любой из трёх электроприводов.

В таком случае функциональную схему совместного управления перемещением РТК можно представить в виде, показанном на рис. 2.



УП – управляющий преобразователь напряжения электропривода;  $W_{\text{зп}}(p)$  – передаточная функция электропривода;  $\Phi$  – матрица коэффициентов уравнения относительного движения;

$\Psi$  – матрица коэффициентов уравнения усреднённого движения;  $L$  – матрица коэффициентов относительного управления;  $l$  – вектор коэффициентов усреднённого управления

Рис. 2. Функциональная схема совместного управления электроприводами РТК

**Синтез регулятора.** Движение РТК обеспечивают мотор-колёса, установленные на конце упоров распорного механизма. Примем следующее допущение: механизм позиционирования идеально фиксирует РТК внутри стенок трубы, за счёт чего нагрузка на мотор-колёса распределена равномерно. Критерием для задачи согласованного управления будет являться регулирование среднего значения скоростей приводов при условии равенства этих скоростей между собой:

$$\bar{y} = \frac{1}{3}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3); \quad \omega_1 = \omega_2; \quad \omega_2 = \omega_3.$$

Тогда матрицы коэффициентов

$$\Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}; \quad \Psi^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}; \quad L = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}; \quad l = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

В электродвигателе постоянного тока протекают как электрические, так и механические процессы в соответствии с законом равновесия моментов (механические) и законом Кирхгофа

(электрические). В соответствии с уравнениями, описывающими эти процессы, составим детализированную структурную схему двигателя, учитывая, что она включает в себя два интегратора (объект второго порядка,  $n = 2$ ), выходы которых являются переменными состояния  $\omega(t)$ ,  $I_{\text{я}}(t)$  (см. рис. 3) [2].

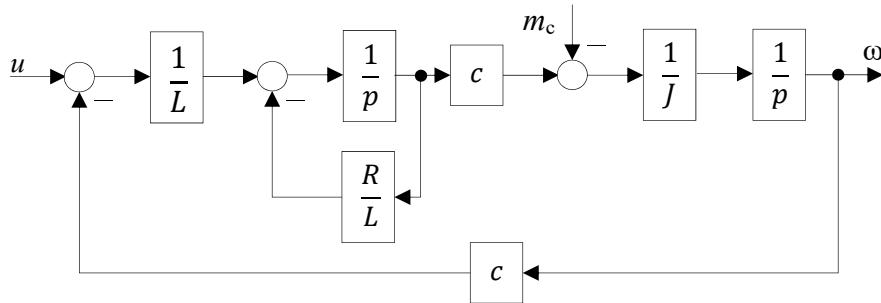


Рис. 3. Детализированная структурная схема электродвигателя

Детализированную структурную схему двигателя при необходимости можно привести к структурной схеме (см. рис. 4) с общепринятыми в электроприводе обозначениями:

$K_{\text{д}} = \frac{1}{c}$  – передаточный коэффициент двигателя;

$T_{\text{я}} = \frac{L}{R}$  – постоянная времени якорной цепи;

$T_{\text{эм}} = \frac{RJ}{c^2}$  – электромеханическая постоянная времени.

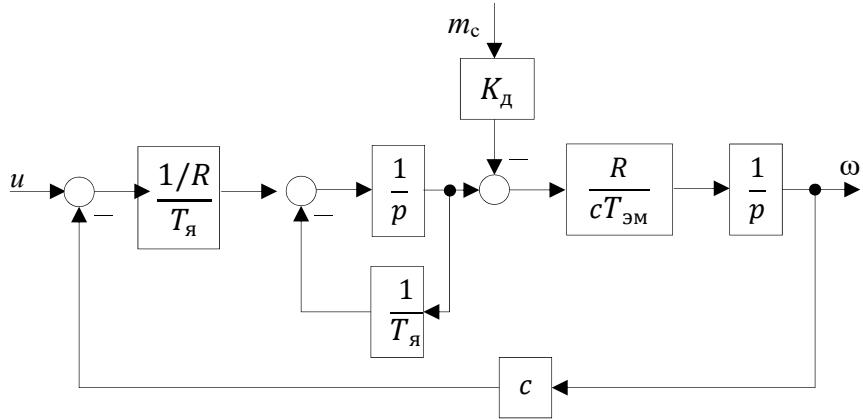


Рис. 4. Структурная схема электродвигателя

За передаточную функцию управляемого преобразователя примем функцию, широко используемую при инженерных расчётах:

$$W_{\Pi} = \frac{K_{\Pi}}{T_{\Pi}p + 1},$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент усиления УП;  $T_{\Pi}$  – постоянная времени цепи управления преобразователем.

Путём преобразований структурной схемы двигателя, а также с учётом наличия управляемого преобразователя напряжения получим передаточную функцию по задающему воздействию:

$$\frac{\omega(p)}{u(p)} = \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\text{д}}}{(T_{\Pi}p + 1) \cdot (T_{\text{эм}}T_{\text{я}}p^2 + T_{\text{эм}}p + 1)}.$$

В соответствии с методом согласованного управления [1, 3] матричная передаточная функция объекта канала относительного движения

$$W_{0e}(p) = \begin{bmatrix} \frac{K_\Pi \cdot K_\Delta}{(T_\Pi p + 1) \cdot (T_{\text{ЭМ}} T_{\text{Я}} p^2 + T_{\text{ЭМ}} p + 1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_\Pi \cdot K_\Delta}{(T_\Pi p + 1) \cdot (T_{\text{ЭМ}} T_{\text{Я}} p^2 + T_{\text{ЭМ}} p + 1)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_\Pi \cdot K_\Delta}{(T_\Pi p + 1) \cdot (T_{\text{ЭМ}} T_{\text{Я}} p^2 + T_{\text{ЭМ}} p + 1)} \end{bmatrix}.$$

Для настройки системы регулирования с учётом возможных возмущений используем ПИД-регулятор. Настройку будем осуществлять на стандартную форму:

$$W_{0e}(p) = \frac{\left(K_{ep} + \frac{K_{ei}}{p} + K_{ead}p\right) \cdot \frac{K_\Pi \cdot K_\Delta}{(T_\Pi p + 1) \cdot (T_{\mathfrak{E}\mathfrak{M}} T_\Delta p^2 + T_{\mathfrak{E}\mathfrak{M}} p + 1)}}{1 + \left(\left(K_{ep} + \frac{K_{ei}}{p} + K_{ead}p\right) \cdot \frac{K_\Pi \cdot K_\Delta}{(T_\Pi p + 1) \cdot (T_{\mathfrak{E}\mathfrak{M}} T_\Delta p^2 + T_{\mathfrak{E}\mathfrak{M}} p + 1)}\right)}$$

$$W_{0e}(p) = \frac{K_\Pi \cdot K_\Delta \cdot (K_{ep}p + K_{ei} + K_{ed}p^2)}{T_\Pi T_{\mathfrak{M}} T_\mathfrak{A} p^4 + (T_{\mathfrak{M}} T_\mathfrak{A} + T_\Pi T_{\mathfrak{M}})p^3 + (T_\Pi + T_{\mathfrak{M}} + K_\Pi K_\Delta K_{ed})p^2 + (K_\Pi K_\Delta K_{ep} + 1)p + K_\Pi K_\Delta K_{ei}};$$

$$T_\Pi T_{\mathfrak{M}} T_\mathfrak{A} p^4 + (T_{\mathfrak{M}} T_\mathfrak{A} + T_\Pi T_{\mathfrak{M}})p^3 + (T_\Pi + T_{\mathfrak{M}} + K_\Pi K_\Delta K_{ed})p^2 + (K_\Pi K_\Delta K_{ep} + 1)p +$$

$$+ K_\Pi K_\Delta K_{ei} = p^4 + 4\omega_0 p^3 + 6\omega_0^2 p^2 + 4\omega_0^3 p + \omega_0^4.$$

Приравнивая коэффициенты членов знаменателей при равных степенях, получим выражения для коэффициентов ПИД-регулятора:

$$K_{ep} = \frac{2.6\omega_0^3 - 1}{K_\Pi K_\Delta}; \quad K_{ei} = \frac{\omega_0^4}{K_\Pi K_\Delta}; \quad K_{ed} = \frac{3.4\omega_0^2 - T_\Pi - T_{\varTheta M}}{K_\Pi K_\Delta},$$

где  $K_{ep}$  – коэффициент пропорциональной части регулятора;  $K_{ei}$  – коэффициент интегрирующей части регулятора;  $K_{ed}$  – коэффициент дифференцирующей части регулятора;  $\omega_0$  – значение модуля корней характеристического уравнения стандартной формы.

По аналогии параметры регулятора канала усреднённого движения будут определяться также, как и регулятора канала относительного движения.

На рис. 5 представлена структурная схема системы управления электродвигателями мотор-колеса.

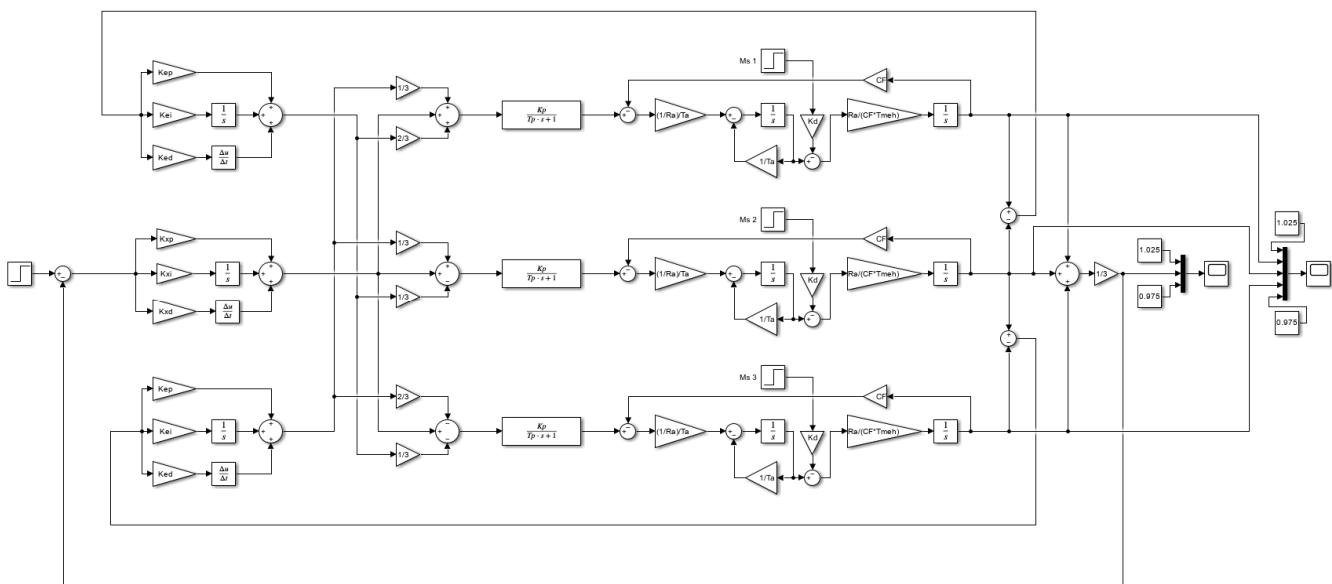


Рис. 5. Структурная схема системы совместного управления электродвигателями мотор-колесо

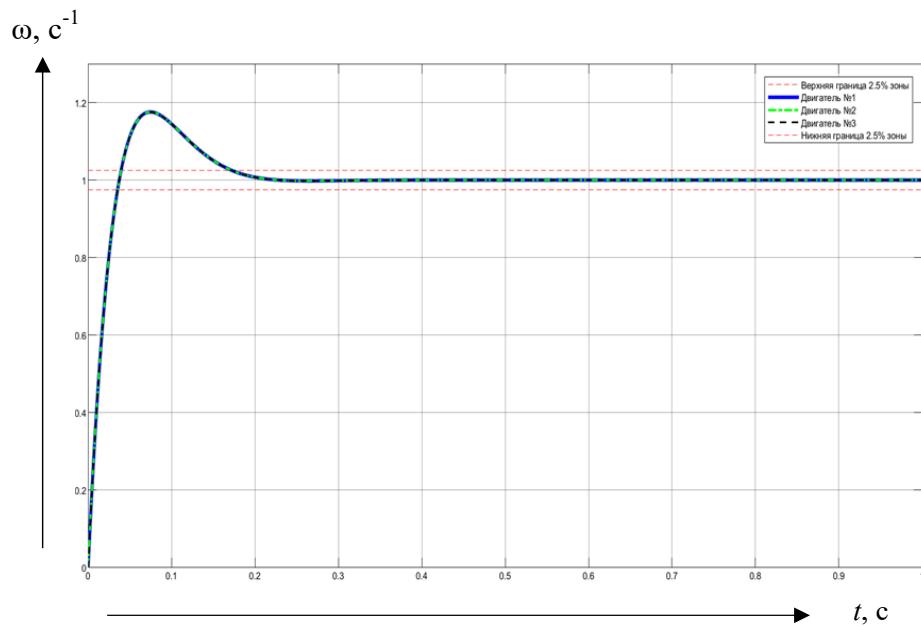


Рис. 6. Переходные характеристики системы управления по скорости электродвигателей типа мотор-колесо

На рис. 6 представлены графики переходных характеристик системы. На рис. 7 показана реакция системы на согласованную нагрузку. На рис. 8-9 показана реакция системы на рассогласованную нагрузку.

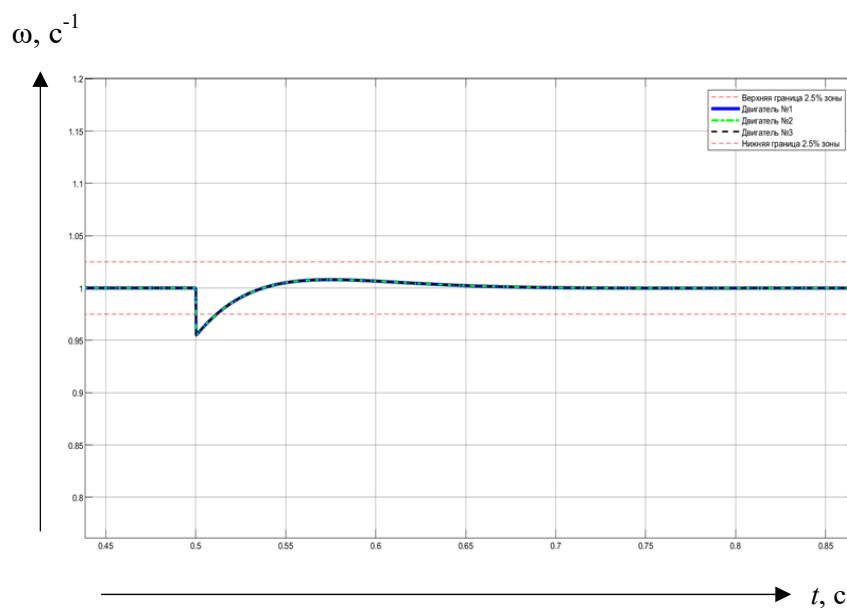


Рис. 7. Реакция системы на согласованное возмущающее воздействие

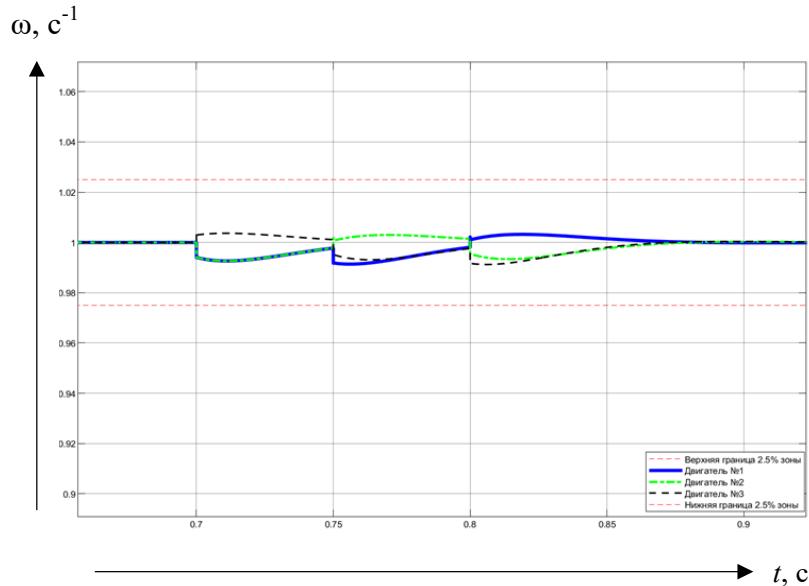


Рис. 8. Реакция системы на рассогласованное по времени возмущающее воздействие

**Выводы.** В рамках предложенной концепции построения робототехнического комплекса для выполнения специальных технологических операций внутри трубопроводных магистралей разработана система совместного управления электроприводами мотор-колёс. Выполнен синтез параметров регуляторов относительного и усреднённого движения. Результаты моделирования показали работоспособность системы управления. Система устранила возникшие возмущения в автономных каналах за сравнительно небольшой промежуток времени (в зависимости от характера нагрузки от 0.1 до 0.15 с). Однако стоит учитывать, что в данной статье расчёт параметров движения проводился с допущением, что движение РТК проходит в линейном участке трубопровода. При введении ряда условий, связанных с возможной криволинейностью траектории, наклоном трубопровода и др., более рациональным видится использование регуляторов на базе нечёткой логики.

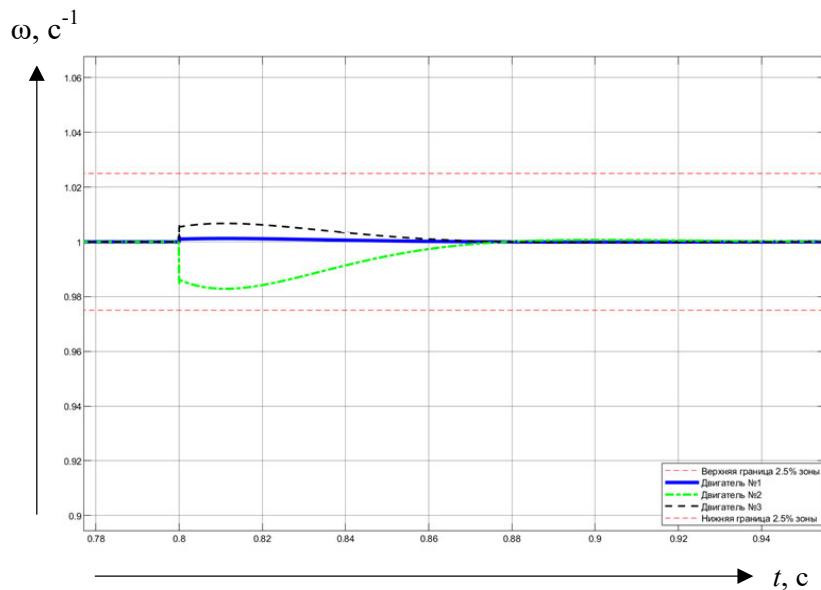


Рис. 9. Реакция системы на рассогласованное по значению возмущающее воздействие

Развитие предложенной концепции с применением развитых нечётких систем управления технологическими процессами в дальнейшем позволит расширить применение таких систем путём внедрения дополнительных модулей приводов. Такой подход позволит гибко адаптировать предложенный робототехнический комплекс для выполнения сварочных и дефектных работ в трубопроводных системах различных масс и диаметров. Интеграция модулей электроприводных систем мотор-колесо в общую систему управления будет реализована на основе многокаскадного нечёткого регулирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стельмащук, С. В. Согласованное управление однотипными объектами без учёта перекрёстных связей между сепаратными каналами / С. В. Стельмащук, В. А. Челухин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 48-58.
2. Горьковый, А. И. Математические основы элементов, систем и процессов управления: учеб. пособие / А. И. Горьковый, М. А. Горьковый. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2016. – 70 с.
3. Мирошник, И. В. Согласованное управление многоканальными системами / И. В. Мирошник. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 128 с.
4. Анализ влияния параметров объекта управления на основные характеристики нечёткого регулятора / С. П. Черный, А. В. Бузикаева, Е. О. Полей, Чжо Мин У // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 28-33.
5. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М.: Высшая школа, 2004. – 365 с.
6. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2010. – 267 с.
7. Аристкин, И. В. Анализ робототехнических устройств, предназначенных для внутритрубной диагностики / И. В. Аристкин // Политехнический молодёжный журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2019. – № 9 (38). – С. 12.
8. Лямин, М. А. Робототехнический транспортный комплекс для магистральных трубопроводов / М. А. Лямин, С. П. Черный // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 235-238.
9. Система управления модулем подачи и позиционирования проволоки для роботизированного комплекса трёхмерной печати металлических изделий / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. В. Бузикаева, А. Р. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 3. – С. 66-73.
10. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.



Табаров Б. Д., Ляпин В. В.  
B. D. Tabarov, V. V. Lyapin

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СОВМЕСТНО С БАТАРЕЯМИ КОСИНУСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

### DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A NEW CONTROL METHOD FOR THE FURNACE TRANSFORMER OF AN ELECTROTHERMAL INSTALLATION TOGETHER WITH BATTERIES COSINE CAPACITORS

**Табаров Бехруз Довудходжаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**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).

**Ляпин Владимир Владимирович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Vladimir V. Lyapin** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В данной статье рассматривается вопрос повышения энергетической эффективности и динамических свойств электротермической установки (ЭУ) за счёт применения предлагаемого тиристорного пускателя и специального способа включения и выключения печного трансформатора и батареи косинусных конденсаторов установки. Предлагаемый тиристорный пускатель и специальный способ включения и выключения обеспечивают безударное включение печного трансформатора и батареи косинусных конденсаторов без бросков токов и снижения напряжения, а также их выключение без возникновения коммутационных потерь, перенапряжения и электрической дуги между контактами сетевого высоковольтного выключателя. Приводятся результаты исследования переходных процессов по известному и новому способу включения печного трансформатора совместно с батареями косинусных конденсаторов посредством упрощённого гибридного аппарата и выключение его без возникновения дуги на механических контактах сетевого высоковольтного выключателя.

**Summary.** This article discusses the issue of improving the energy efficiency and dynamic properties of an electro-thermal installation (EC) with the proposed thyristor starter and its special method of switching on and off the furnace transformer and the battery of cosine capacitors of the installation. The proposed thyristor starter and its special method of switching on and off provides shock-free activation of the furnace transformer and the battery of cosine capacitors without current surges and voltage reduction, as well as their shutdown without the occurrence of switching losses, overvoltage and electric arc between the contacts of the mains high-voltage switch. The results of a study of transients using the known and new method of switching on a furnace transformer together with batteries of cosine capacitors by means of a simplified hybrid apparatus and turning it off without arcing on the mechanical contacts of a high-voltage mains switch are presented.

**Ключевые слова:** печной трансформатор, батареи косинусных конденсаторов, тиристорный пускатель, способ мягкого включения, отключение без электрической дуги, установка электротермического воздействия.

**Key words:** furnace transformer, batteries of cosine capacitors, thyristor starter, method of soft switching on, disconnection without electric arc, installation of electrothermal action.

*Разработка и исследование нового способа управления печного трансформатора электротермической установки совместно с батареями косинусных конденсаторов выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (номер гранта: МК-3799.2022.4).*

УДК 621.316.722.076.12

**Введение.** В настоящее время в электротермической установке (ЭУ) операция включения и выключения высоковольтного электрооборудования осуществляется при помощи коммутационных электрических аппаратов, обладающих механическими контактами, которые создают ряд недостатков, связанных с низкими энергетическими показателями при выполнении операции включения и выключения электротермической установки [1–9].

Приведённые выше недостатки обусловлены тем, что включение ЭУ приводит к возникновению большого пускового тока в одной из фаз сети и просадке фазного напряжения. Помимо этого, возникают асимметричные токи в трёхфазных сетях, ударные электродинамические усилия в катушках и дополнительные пусковые потери в сети. Выключение ЭУ сопровождается возникновением электрической дуги, выжигающей серебряные контакты сетевого выключателя, это усугубляется к тому же всплеском тока и увеличением дуги при разрыве электрической цепи с конденсатором на входе устройства.

Существует научная работа, в которой предлагаются новый способ и устройство для включения и выключения ЭУ [1].

Плюсом данного способа и устройства является то, что установка включается без скачков токов и провалов напряжения, а выключение – без возникновения электрической дуги и перенапряжений на контактах коммутационных аппаратов. Однако устройство имеет недостатки, связанные с низкой энергоэффективностью, вызванной загрузкой электрической сети реактивной мощностью, увеличением тока и, как следствие, значительными электрическими потерями из-за квадрата тока в процессе работы установки. В сочетании с конденсаторной установкой включение и выключение печного трансформатора ЭУ с большими индуктивными сопротивлениями обмоток требуют разработки специального способа управления динамическими процессами для поддержания высоких показателей качества электроэнергии в сети.

С учётом всего вышесказанного, актуальной является разработка нового устройства электротехнических систем с улучшенными энергетическими эффективностями и динамическими свойствами ЭУ. Кроме того, существует необходимость совершенствования электросталеплавильных комплексов с печными трансформаторами мощностью 120 МВА напряжением 35 кВ и токами 2 кА, для которых разработана более сложная электротехническая система [10; 12], но с теми же принципами построения, которым, в частности, посвящена данная статья.

*Целью работы* является улучшение технико-экономических показателей электротермической установки.

Для достижения поставленной цели в работе ставились и решались следующие задачи:

1. выполнить аналитическое исследование информационных источников по проблеме обеспечения нормальной работы ЭУ, улучшения качества электроэнергии и эффективности её работы, а также сохранения срока службы её электрооборудования при стационарных и динамических режимах работы;

2. разработать новое устройство для устранения недостатков существующих механических коммутационных аппаратов и улучшения технико-экономических показателей электротермической установки во всех режимах её работы;

3. разработать новый способ включения и выключения печного трансформатора электротермической установки совместно с батареями косинусных конденсаторов;

4. разработать блочно-модульную модель электротермической установки с известным и предлагаемым устройством для проведения исследований и оценки эффективности работы электротермической установки в стационарных и динамических процессах;

5. исследовать напряжения и токи при одновременном подключении печного трансформатора и батарей косинусных конденсаторов к питающей сети по штатной схеме пускателя;

6. исследовать напряжения и токи при одновременном подключении печного трансформатора и батарей косинусных конденсаторов к питающей сети по новой схеме пускателя.

Применение предлагаемого способа управления ЭУ и устройства для его функционирования позволяет повысить энергетические показатели ЭУ во всех режимах её работы. Помимо этого, улучшается пропускная способность электропередачи и снижаются дополнительные потери электроэнергии при транспортировке и распределении электроэнергии во всех режимах работы электрической сети и ЭУ. Предлагаемый способ и устройство для его функционирования также улучшают работу электрооборудования ЭУ, в частности коммутационных аппаратов, при отключении установки с высокими энергетическими показателями [10–12].

На рис. 1 в трёхфазном исполнении представлена функциональная схема анализируемой системы с предлагаемыми устройствами, которые разработаны на основе электронно-электрических аппаратов. Она состоит из высоковольтного выключателя Q; печного трансформатора ПТ; активно-индуктивной нагрузки Z<sub>Н</sub>; первого блока тиристорного пускателя ТП-1 с управляемыми тиристорными ключами VS1-2 и VS3-4; блока батареи косинусных конденсаторов БКК; второго блока тиристорного пускателя ТП-2 с управляемыми тиристорными ключами VS5-6 и VS7-8; блока формирователя импульсов управления ФИУ с синхронизирующим входом СВ, управляющим входом УВ и четырьмя выходами 1, 2, 3, 4, которые предназначены для подключения к цепям управления соответствующих тиристорных ключей.

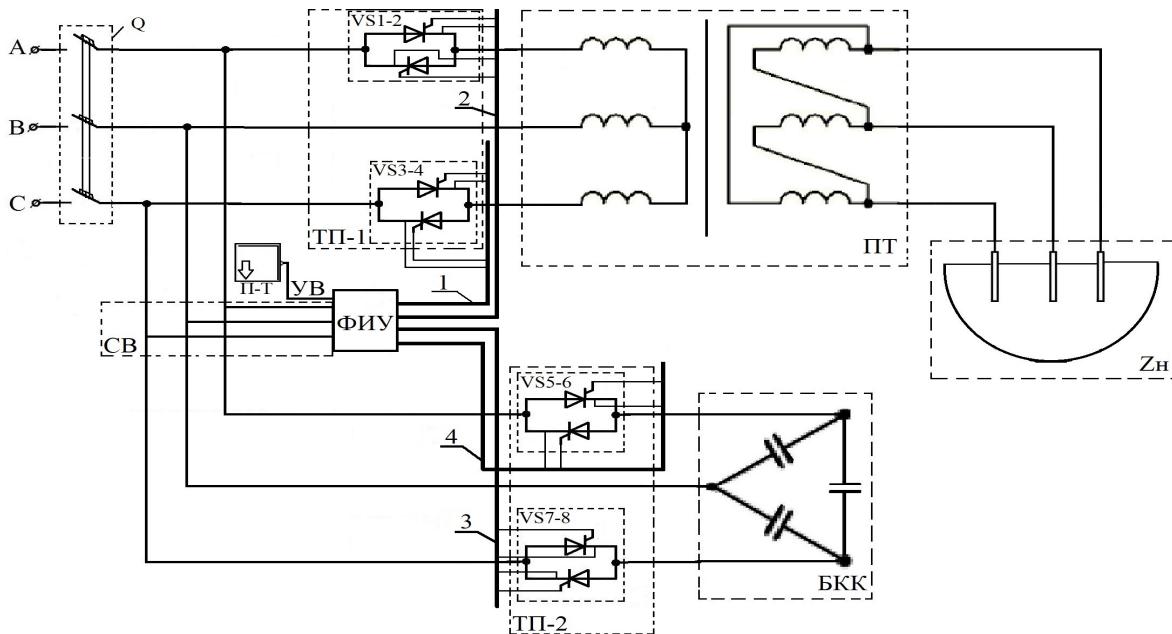


Рис. 1. Функциональная схема анализируемой системы

Предлагаемый способ управления электрооборудованием электротермической установки с высокими технико-экономическими показателями и устройства для его функционирования работают по следующей последовательности.

**Подготовка силовых модулей и блоков к работе.** На этом этапе управления анализируемой системой подготавливают силовые модули и блоки к работе. Здесь после подачи команды на катушку включения высоковольтного выключателя Q и его включения на электронные модули ТП-1 и ТП-2 и блок управления ФИУ поступает напряжение (предвключение установки).

**Первая операция способа включения электрооборудования электротермической установки.** Здесь с блока ФИУ через выход 1 в момент перехода через ноль фазного напряжения фазы «А» для включения тиристорного ключа VS3-4 фазы «С» формируется импульс управления, в результате чего вводится в работу тиристорный ключ VS3-4, и после его включения на печной трансформатор ПТ подаётся линейное напряжение между фазами «В» и «С».

**Вторая операция способа включения электрооборудования электротермической установки.** При переходе линейного напряжения между фазами «В» и «С» трансформатора через ноль, блок ФИУ подаёт одновременно импульсы через выход 2 на управляющие входы тиристорного ключа VS1-2 фазы «А» печного трансформатора ПТ для полного (все три фазы) его включения, и через выход 3 для включения фазы «С» батареи косинусных конденсаторов БКК на тиристорный ключ VS7-8, в результате чего одновременно с плавным включением печного трансформатора на полную мощность на конденсаторы БКК подаётся линейное напряжение между фазами «В» и «С».

**Третья операция способа включения электрооборудования электротермической установки.** После плавного включения печного трансформатора ПТ и двух фаз («В» и «С») батареи косинусных конденсаторов БКК блок ФИУ формирует импульс управления на выходе 4 для включения тиристорного ключа VS5-6 фазы «А», в результате чего тиристорный ключ VS5-6 включается и плавно вводит батарею косинусных конденсаторов БКК в работу на полной мощности с высокими энергетическими показателями.

Выключение электрооборудования электротермической установки без негативного влияния на работу электрооборудования и питающей сети также достигается в три операции, но в обратной последовательности.

**Результаты исследования динамических и стационарных процессов анализируемой системы по известным и предложенным устройствам.** Для проведения исследования динамических и стационарных процессов анализируемой системы по известным и предложенным устройствам в среде MATLAB была разработана имитационная модель электротермической установки [12]. Она представлена на рис. 2 и состоит из трёхфазного источника питания  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ , трёхфазного высоковольтного выключателя  $Q$ , трёхфазного печного трансформатора ПТ, блока трёхфазной активно-индуктивной нагрузки  $Z_h$ , первого тиристорного пускателя с тиристорными ключами VS1 – VS4, блока трёхфазной батареи косинусных конденсаторов БКК, второго тиристорного пускателя с тиристорными ключами VS5 – VS8, блока формирователя импульсов управления ФИУ, который синхронизирован с сетью, а также других измерительных приборов.

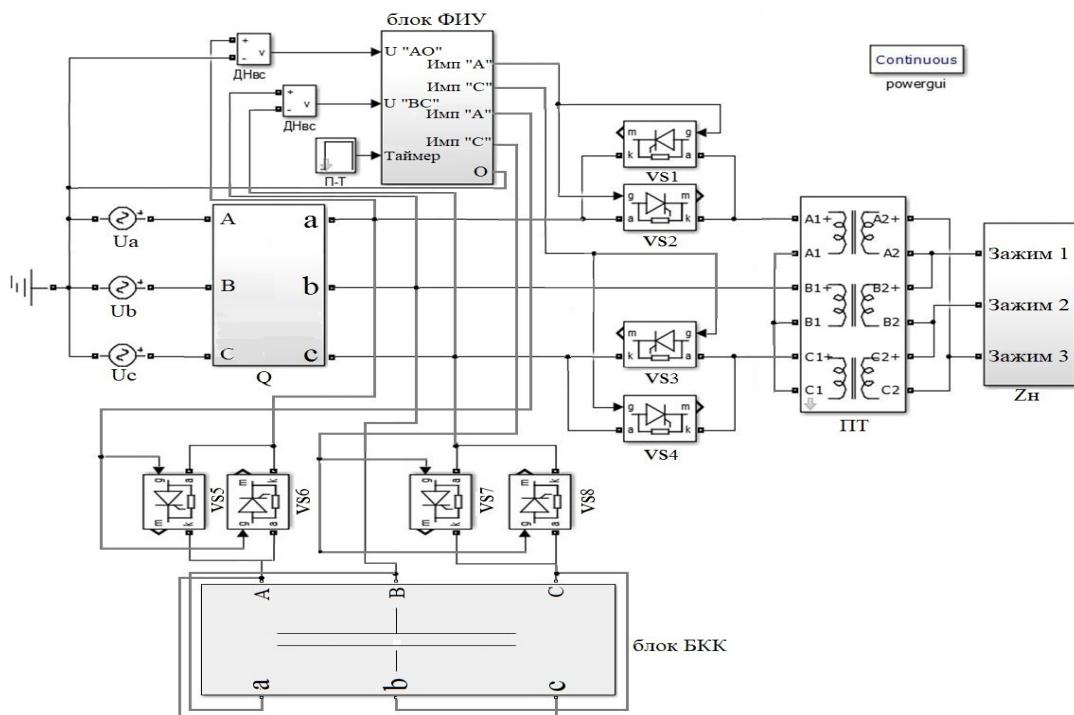


Рис. 2. Имитационная модель анализируемой системы в среде MATLAB

Ниже представлены результаты численных экспериментов токов и напряжений трёхфазного печного трансформатора и БКК, которые были смоделированы в среде MATLAB на имитационной модели анализируемой системы по штатной (см. рис. 3) и новой схеме пускателя (см. рис. 4).

На рис. 3, представлены осциллограммы напряжений и токов при включении и выключении электрооборудования анализируемой системы по известной схеме пускателя. На осциллограммах введены следующие обозначения:  $U_A^*$  и  $U_{BC}^*$  – синхронизирующие сигналы, пропорциональные соответственно фазному  $U_A$  и линейному  $U_{BC}$  напряжениям сети;  $U_A$  – фазное напряжение сети;  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$  – фазные токи сети;  $i_{kA}$ ,  $i_{kB}$  и  $i_{kC}$  – фазные токи батареи косинусных конденсаторов.

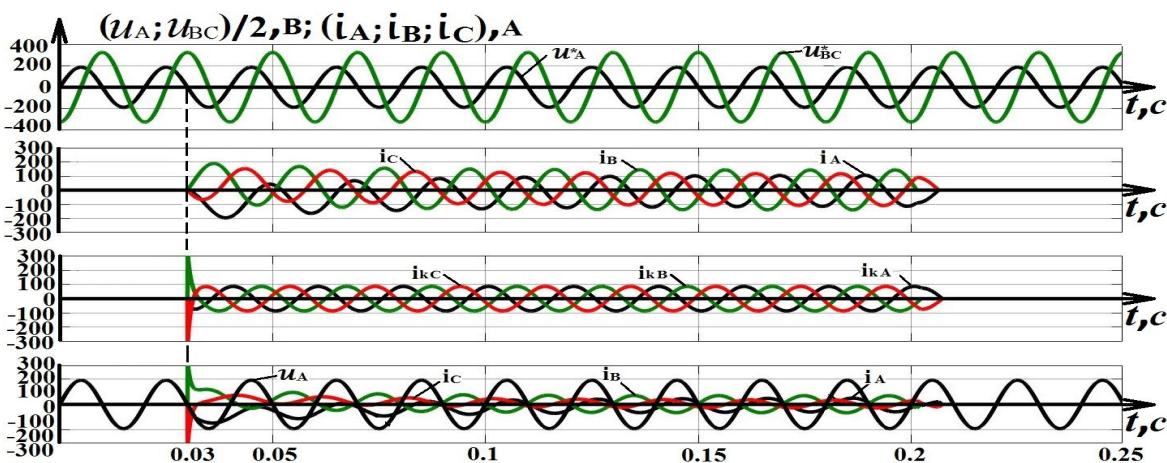


Рис. 3. Осциллограммы фазных напряжений и токов при одновременном подключении печного трансформатора и батарей косинусных конденсаторов к питающей сети по штатной схеме пускателя

Как показано на рис. 3, известный пускатель (механические высоковольтные выключатели) в момент времени  $t = 0.03$  с одновременно с печным трансформатором вводят в работу батареи косинусных конденсаторов. Результат этого физического процесса иллюстрируют осциллограммы, приведённые на рис. 3, и подтверждают, что высоковольтные выключатели к сети подключают одновременно все три фазы печного трансформатора и БКК, в результате чего возникает всплеск тока на конденсаторах, а в печном трансформаторе возникает переходный процесс с неравномерным током по фазам. В результате всё это приводит к изнашиванию изоляции и преждевременному выходу из строя электрооборудования [1; 2; 9].

На рис. 4 приведены осциллограммы напряжений и токов, иллюстрирующие способ включения и выключения электрооборудования анализируемой системы по новой схеме пускателя. На осциллограммах введены следующие обозначения:  $U_A^*$  и  $U_{BC}^*$  – синхронизирующие сигналы, пропорциональные соответственно фазному  $U_A$  и линейному  $U_{BC}$  напряжениям сети;  $U_A$  – фазное напряжение сети;  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$  – фазные токи сети;  $i_{kA}$ ,  $i_{kB}$  и  $i_{kC}$  – фазные токи батареи косинусных конденсаторов.

Полученные результаты исследования включения и выключения печного трансформатора одновременно с батареями косинусных конденсаторов к питающей сети по новой схеме пускателя подтверждают, что применение предлагаемых тиристорных пускателей в реальной установке комплексно улучшает эффективность работы электрооборудования анализируемой системы. Целесообразной областью применения предлагаемого устройства являются ЭУ различного класса напряжения и мощности.

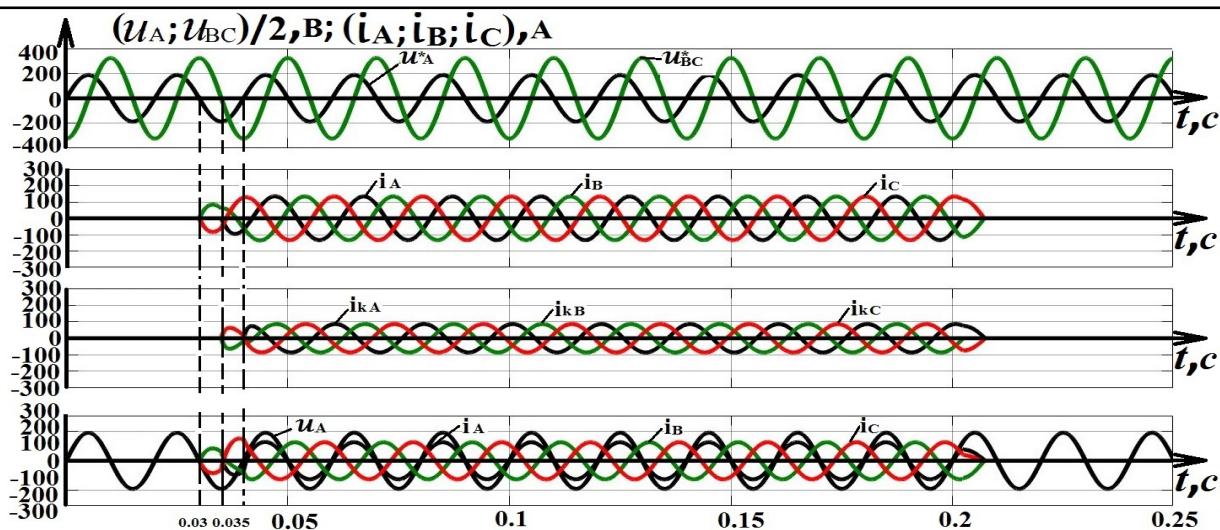


Рис. 4. Осциллограммы фазных напряжений и токов при одновременном подключении печного трансформатора и батареи косинусных конденсаторов к питающей сети по новой схеме пускателя

**Заключение.** По результатам проведения численных экспериментов способа ограничения пускового тока и выключения электрооборудования электротермической установки без возникновения электрической дуги, коммутационных потерь и перенапряжения при помощи предлагаемых тиристорных пускателей можно сделать следующие выводы.

Разработаны новые тиристорные пускатели и способ управления для улучшения энергетических показателей и динамических свойств электрооборудования ЭУ.

Результатами численных экспериментов установлено, что применение предлагаемых тиристорных пускателей обеспечивает плавное включение печного трансформатора одновременно с батареями косинусных конденсаторов без возникновения пусковых токов, просадки напряжения и неравномерного распределения токов по фазам, а также при выполнении операции выключения электротермической установки не создаёт электрической дуги, перенапряжения и коммутационных потерь на контактах высоковольтных выключателей.

Применение предлагаемых тиристорных пускателей позволяет улучшить технико-экономические показатели за счёт сокращения количества тиристорных ключей и упростить схему управления исследуемого объекта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунэр; под ред. А. Е. Слухоцкого. – М.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 270 с.
2. Чунихин, А. А. Электрические аппараты: общий курс: учеб. для вузов / А. А. Чунихин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
3. Тельманова, Е. Д. Электрические и электронные аппараты: учеб. пособие / Е. Д. Тельманова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2010. – 131 с.
4. Родштейн, Л. А. Электрические аппараты: учеб. для техникумов / Л. А. Родштейн. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 304 с.
5. Алексеенко, Г. В. Состояние и перспективы развития электроэнергетики и электропромышленности / Г. В. Алексеенко // Электричество. – 1970. – № 4. – С. 122-131.
6. Кукеков, Г. А. Выключатели переменного тока высокого напряжения / Г. А. Кукеков. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1972. – 336 с.
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems: межгосударственный стандарт: издание официальное: введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: дата введения 2014-07-01 /



Разработан обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

8. Свиридов, В. А. Обеспечение электродинамической стойкости силовых трансформаторов / В. А. Свиридов, Н. П. Бахарев // Молодой учёный. – 2017. – № 32. – С. 20-25.
9. Аншин, В. Ш. Электропечные трансформаторы для металлургической промышленности, выпускаемые ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД» / В. Ш. Аншин // Электро. – 2006. – № 4. – С. 16-20.
10. Климаш, В. С. Способ включения и выключения печного трансформатора электротермической установки и устройство для его реализации / В. С. Климаш, Б. Д. Табаров, Р. Р. Ниматов // Известия ТулГУ. – 2020. – № 6. – С. 255-262.
11. Патент № 2746220 Российская Федерация, МПК H02J 3/12 (2020.08), H02M 5/257 (2020.08). Способ и устройство для включения и выключения электротермической установки: № 2020124993; заявлено 20.07.2020: опубликовано 09.04.2021 / Климаш В. С., Табаров Б. Д.; заявитель и патентообладатель Климаш В. С., Табаров Б. Д. – 11 с.
12. Блочно-модульная модель для исследования физических процессов электротермической установки с компенсацией реактивной мощности: св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2021614296 от 22 марта 2021 г. / Климаш В. С., Табаров Б. Д. – М.: ФИПС, 2021.

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING

**Приходченко О. В., Просолович А. А.**  
**O. V. Prikhodchenko, A. A. Prosolovich**

**РАСЧЁТ ЛОПАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**CALCULATION OF BLADE ELEMENTS OF MACHINE-BUILDING EQUIPMENT**

**Приходченко Оксана Вадимовна** – кандидат технических наук, руководитель группы разработок управления информатизации Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: okpr68@mail.ru.

**Oksana V. Prikhodchenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Development Group of the Informatization Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: okpr68@mail.ru.

**Просолович Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: alpr72@mail.ru.

**Alexey A. Prosolovich** – PhD in Engineering, Associate Professor, Shipbuilding and Computer Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: alpr72@mail.ru.

**Аннотация.** Рассмотрена классификация лопастного оборудования, используемого в машиностроительном оборудовании. Определены допущения, обеспечивающие существенное упрощение расчётов силовых элементов лопастных машин. Показана возможность применения выражений для расчёта подъёмной силы единичного крыла в аэродинамике для нахождения параметров лопастных элементов. Приведены уточняющие коэффициенты, учитывающие конечное число и профиль лопасти, механические, гидравлические и объёмные потери в решётке лопастей. Рассмотрена методика расчёта осевых лопастных машин, и дан пример расчёта лопастного механизма.

**Summary.** The classification of blade equipment used in machine-building equipment is considered. The assumptions that provide a significant simplification of the calculations of the power elements of blade machines are determined. The possibility of using expressions to calculate the lift of a single wing in aerodynamics to find the parameters of the blade elements is shown. Clarifying coefficients are given, taking into account the finite number and profile of the blade, mechanical, hydraulic and volumetric losses in the blade grid. The method of calculating axial blade machines is considered and an example of calculating a blade mechanism is given.

**Ключевые слова:** лопастная машина, подъёмная сила, профиль, потери, методика расчёта.

**Key words:** blade machine, lifting force, profile, losses, calculation method.

УДК 621.5:651

**Введение.** Лопастные машины предназначены для перемещения жидкостей или газов из одной части пространства в другую и широко используются в качестве вентиляторов, компрессоров и насосов. Механическая энергия, необходимая для перемещения среды, создаётся вращающимися лопастями. Под воздействием лопастей изменяются давление (напор)  $H$  и расход (производительность)  $Q$  газа/жидкости. По принципу действия лопастные машины можно классифицировать на центробежные, диаметральные и осевые. В данной статье рассматривается машина с осевыми элементами. Однако независимо от типа машины вопросы выбора размерных соотношений лопастей исполнительного механизма являются наиболее сложными и при практических расчётах связаны с рядом существенных упрощений. Наиболее трудно оценить специфические (объемные, гидравлические и механические) потери в лопастных устройствах, что, в частности, связано с неопределенностью и трудно моделируемой динамикой варьируемых факторов.

При инженерных расчётах эти потери могут быть учтены введением ряда дополнительных коэффициентов, учитывающих конструкционные параметры и эксплуатационные факторы. Например, решётка вращающихся лопастей может рассматриваться в виде эйлеровского (идеализированного) одноступенчатого и однопоточного источника механической мощности с бесконечно большим числом тонких плоских стержней, перемещающих физическую среду, в которой объёмные, гидравлические и механические потери отсутствуют [1; 2].

Для перехода к реальному элементу необходимо учесть:

- конечное число элементов (лопастей);
- геометрические размеры вращающихся лопастей;
- специфические потери лопастного механизма.

Следует отметить, что при установленной мощности только одна из величин (или  $Q$ , или  $H$ ) может рассматриваться как детерминированный проектный параметр, а значение второго определяется по значению мощности с учётом суммарного коэффициента полезного действия (КПД) машины.

**Теоретическая часть.** Для расчёта лопастных машин, работающих при небольшом аэродинамическом сопротивлении сети (когда радиальное перемещение газа/жидкости в решётке лопастей невелико и им пренебрегают), используется хорошо разработанная в аэродинамике теория подъёмной силы единичного крыла [3; 4]. Для аналогичных расчётов устройств, работающих при больших аэродинамических сопротивлениях сети, эта теория даёт неудовлетворительные результаты, и поэтому приходится прибегать к другим методам расчёта.

Суть теории подъёмной силы единичного крыла заключается в следующем. Если на единичное крыло (см. рис. 1) набегает поток со скоростью  $\omega$  и углом атаки  $\alpha$ , то в зависимости от формы и размеров лопасти на неё действует некоторая подъёмная сила  $A$ , перпендикулярная направлению потока.

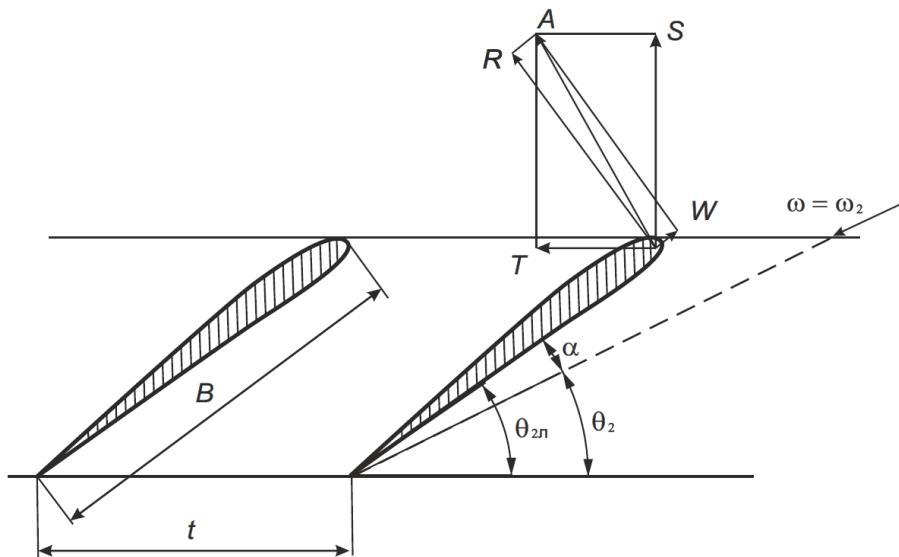


Рис. 1. Силы, действующие на единичное крыло

При этом лопасть будет оказывать потоку сопротивление  $W$ , которое направлено навстречу потоку и обычно мало по сравнению с силой  $A$ . Каждый заданный профиль крыла имеет определённые соотношения подъёмной силы  $A$  и сопротивления  $W$ , зависящие от качества профиля лопасти (крыла).

Если вместо сил, зависящих от размеров крыла и скорости потока, применяется коэффициент подъёмной силы  $c_a$  и коэффициент лобового сопротивления  $c_w$ , то можно получить следующие уравнения:

$$A = c_a p_d F,$$

$$W = c_w p_d F,$$

где  $p_d$  – динамическое давление потока, Па;  $F$  – площадь крыла, м<sup>2</sup>.

Значения коэффициентов  $c_a$  и  $c_w$  для профилей лопастей находятся эмпирическим путём и пересчитываются на бесконечное удлинение лопасти.

При расчётах осевых лопастных машин можно воспользоваться зависимостью  $c_a = f(a)$ , которая в области обычных углов атаки имеет линейный характер. При пересчёте на бесконечное удлинение лопасти характер функции не меняется.

Обозначение размеров профилей приведено на рис. 2, аэродинамические характеристики некоторых из них приведены в [4]. Характерные размеры основных профилей даны в табл. 1.

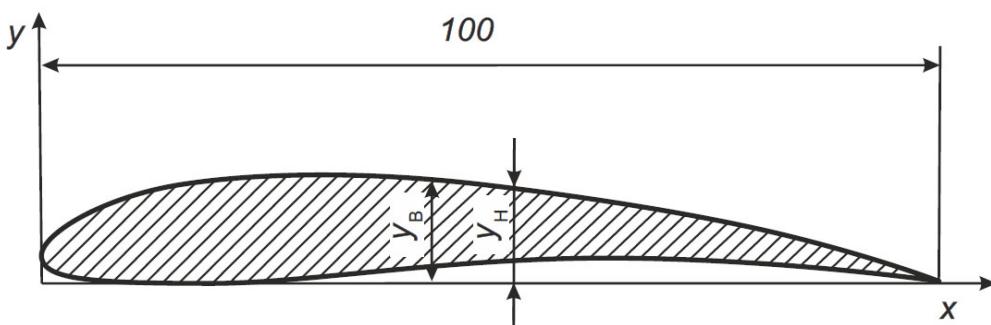


Рис. 2. Обозначение размеров профилей

Таблица 1  
Размеры профилей крыла в процентах от  $x$

$x$	Профиль									
	625		624		682		623		622	
	$y_B$	$y_H$	$y_B$	$y_H$	$y_B$	$y_H$	$y_B$	$y_H$	$y_B$	$y_H$
0,00	5,50	5,50	4,00	4,00	2,50	2,50	3,25	3,25	2,40	2,40
1,25	9,00	3,30	7,15	2,25	4,55	1,05	5,45	1,95	3,75	1,45
2,50	10,80	2,35	8,50	1,65	5,55	0,60	6,45	1,50	4,50	1,05
5,00	13,30	1,25	10,40	0,85	7,00	0,25	7,90	0,90	5,45	0,60
7,50	14,95	0,75	11,75	0,60	8,05	0,10	9,05	0,35	6,15	0,35
10,00	16,35	0,40	12,85	0,40	8,90	0,06	9,90	0,20	6,60	0,25
15,00	18,25	0,15	14,35	0,15	10,00	0,05	10,95	0,10	7,30	0,15
20,00	19,30	0,10	15,30	0,05	10,65	0,20	11,55	0,05	7,70	0,05
30,00	20,00	0,00	16,00	0,00	11,20	0,55	12,00	0,00	8,00	0,00
40,00	19,05	0,00	15,40	0,00	10,90	0,75	11,70	0,00	7,80	0,00
50,00	17,35	0,00	14,05	0,00	10,05	0,80	10,65	0,00	7,10	0,00
60,00	15,05	0,00	12,00	0,00	8,65	0,85	9,15	0,00	6,15	0,00
70,00	12,10	0,00	9,50	0,00	6,90	0,75	7,35	0,00	5,00	0,00
80,00	8,60	0,00	6,60	0,00	4,85	0,60	5,15	0,00	3,55	0,00
90,00	4,75	0,00	3,55	0,00	2,55	0,35	2,80	0,00	1,95	0,00
95,00	2,25	0,00	2,00	0,00	1,35	0,15	1,60	0,00	1,15	0,00
100,00	0,65	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,20	0,00

Согласно опытам Шмитца, применение наиболее трудоёмких и дорогих дуговых профилей целесообразно лишь при работе в области чисел Рейнольдса, превышающих значения  $8 \cdot 10^4 \dots 10 \cdot 10^4$ , и при обязательном условии точного выполнения профиля хорошо защищенной лопасти и шероховатости её поверхности, не превышающей 0,01 мм. Необработанные литые профилированные лопасти, по сравнению с листовыми, имеют небольшие преимущества.



Для расчёта осевых лопастных машин может быть использована методика, в которую внесены некоторые изменения, связанные с использованием в межлопаточных каналах лопастной решётки равенства в данной точке модуля относительной скорости потока  $\omega$  модулю его окружной скорости  $u$ . Эти изменения существенно упрощают процесс расчёта, однако вместе с тем дают некоторое повышение напорных качеств лопастной машины за счёт увеличения угла установки лопастей или длины профиля, главным образом в тех сечениях, которые расположены ближе к втулке.

На первом этапе рассматривается расчёт решётки без учёта сил трения. В этом случае сила лобового сопротивления  $W$  будет отсутствовать, а подъёмная сила  $A$  направлена перпендикулярно направлению относительной скорости  $\omega_2$ .

Эта сила равна

$$A = c_a(\rho/2) \omega_2^2 LB. \quad (1)$$

Окружная  $T$  и осевая  $S$  составляющие силы  $A$  равны

$$\begin{aligned} T &= A \sin \theta_2; \\ S &= A \cos \theta_2. \end{aligned} \quad (2)$$

По закону импульсов, сила, действующая на профиль вдоль оси решётки, будет равна

$$T = m_b v_{2u},$$

где  $m_b$  – расход массы воздуха в межлопаточном канале;  $v_{2u}$  – окружная составляющая абсолютной скорости потока в канале.

Так как

$$m_b = tL v_{2r} \rho,$$

где  $t$  – шаг решётки, то

$$T = \rho t L v_{2r} v_{2u}. \quad (3)$$

Из уравнений (1), (2), (3), следует

$$(\rho/2)c_a\omega^2 u_2 LB \sin\theta_2 = \rho t L v_{2r} v_{2u}.$$

Так как

$$p_t = \rho u_2 v_{2u}, \quad \omega_2 = v_{2r}/\sin\theta_2,$$

то можно написать

$$p_t = (\rho/2)c_a w_2 u_2 B/t.$$

При условии

$$|\omega_2| = |u_2|$$

величина давления

$$p_t = (\rho/2)c_a u_2^2 B/t,$$

или

$$p_t = [\rho/(2\pi D)] c_a B z u_2^2, \quad (4)$$

где  $z$  – число лопастей в рабочем колесе.

Уравнение (4) является исходным для расчёта осевых лопастных машин без учёта их КПД.

Вместо уравнения (4) можно пользоваться формулой

$$p_n = 5,25 \cdot 10^{-4} c_a B D n^2 z,$$

которая справедлива для воздуха при давлении 101,3 кПа и температуре 20 °C.

С учётом гидравлических потерь в решётке лопастей последняя формула примет вид

$$p_n = 5,25 \cdot 10^{-4} c_a B D n^2 z \eta_r. \quad (5)$$

Для практических расчётов, когда расчётное давление является заданным, а частота вращения и число лопастей могут быть заранее выбраны, вместо уравнения (5) удобно пользоваться формулой

$$M = c_a BD, \quad (6)$$

где  $M$  – постоянный коэффициент для данной лопастной машины.

Значение коэффициента вычисляется по формуле

$$M = 1,9 \cdot 10^3 p_n / (n^2 z \eta_r). \quad (7)$$

Расчёт по формуле (6) сводится к определению на каждом данном диаметре  $D$  длины профиля лопатки  $B$  и углов установки профиля  $\theta_{2\text{л}}$ . При этом необходимо задать форму профиля.

Наружный диаметр лопастной машины и её КПД находятся следующим образом.

Сначала находится значение безразмерного коэффициента по формуле

$$\sigma = 4,16 \cdot 10^{-2} Q^{1/2} p_n^{-3/4} n, \quad (8)$$

где  $n$  – частота вращения рабочего колеса, об/мин.

По рис. 3, по заданному коэффициенту скольжения  $\varepsilon$  лопатки выбранного типа и найденному ранее значению  $\sigma$  определяются оптимальные значения коэффициентов давления и производительности  $Q_0$  и  $H_0$ , а также ориентировочное значение КПД лопастной машины  $\eta_r$ .

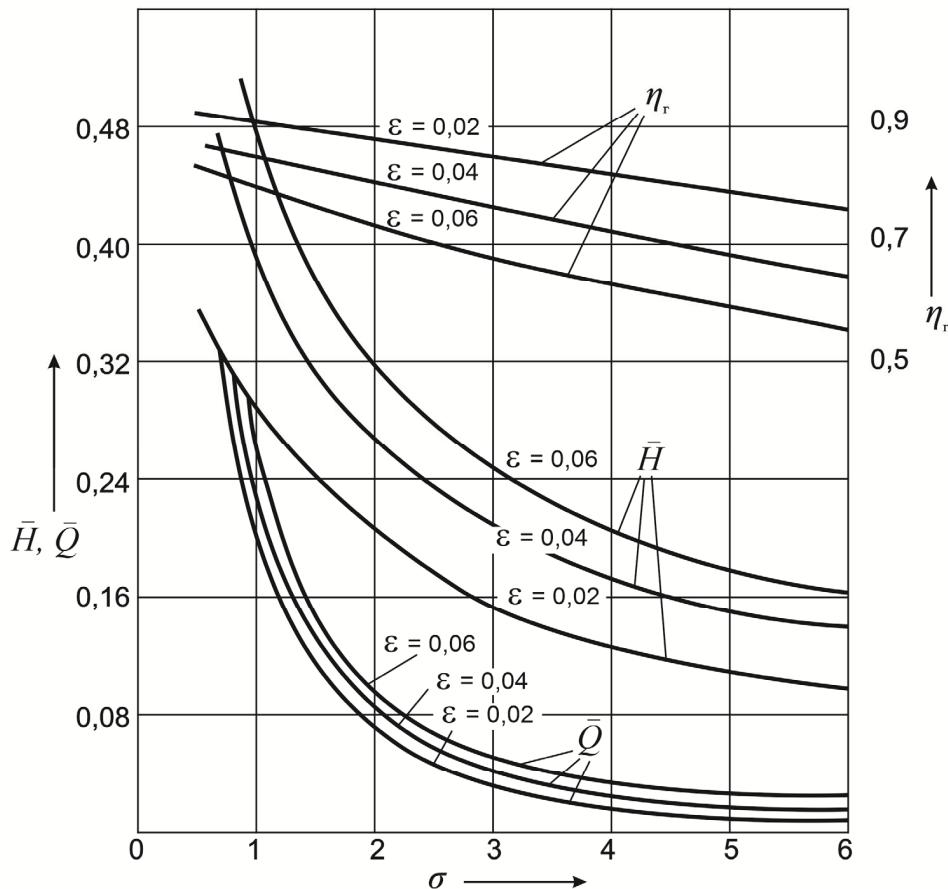


Рис. 3. Оптимальные значения  $Q$ ,  $H$  и  $\eta_r$

Внешний диаметр рабочего колеса  $D_2$  находится по формуле

$$D_2 = (17,4/n) \sqrt{p_n / H_0}, \quad (9)$$



полученной преобразованием уравнения  $p_g = H \rho u_2^2$ .

Минимальный относительный диаметр втулки (втулочное отношение) решётки лопастей определяется по формуле

$$v = D_1/D_2 = 1,27 \sqrt{H_0} . \quad (10)$$

Рассмотренная методика поясняется примером расчёта.

**Пример расчёта.** Рассчитывается лопастная машина по следующим данным: производительность  $Q = 0,117 \text{ м}^3/\text{с}$ , давление  $p_n = 34,5 \text{ Па}$ , частота вращения  $n = 2650 \text{ об/мин}$ .

Из уравнения (8) находим

$$\sigma = 4,16 \cdot 10^{-2} \cdot 0,117^{1/2} \cdot 34,5^{-3/4} \cdot 2650 = 2,196.$$

При данном значении коэффициента  $\sigma$  и при коэффициенте скольжения  $\epsilon = 0,04$  по рис. 3 находятся  $H_o = 0,27$  и  $Q_o = 0,07$ .

По формуле (9) определяется наружный диаметр рабочего колеса:

$$D_2 = (17,4/2650) \sqrt{34,5/0,07} = 0,176 \text{ м.}$$

Принимается  $D_2 = 0,2 \text{ м}$ .

Согласно формуле (10), относительный диаметр втулки

$$v = 1,27 \sqrt{0,07} = 0,336.$$

Расчётный диаметр втулки

$$D_1 = 0,2 \cdot 0,336 = 0,067 \text{ м.}$$

По конструктивным соображениям принимается  $D_1 = 0,09 \text{ м}$ .

Окружная скорость рабочего колеса на диаметре  $D_2$

$$u_2 = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 2650/60 = 23,04 \text{ м/с.}$$

Осевая скорость потока воздуха в лопастной машине

$$v_2 = 4 Q / [\pi (D_2^2 - D_1^2)] = (4 \cdot 0,117 / [3,14(0,2^2 - 0,09^2)]) = 4,66 \text{ м/с.}$$

По рис. 3 полный КПД лопастной машины при коэффициенте скольжения лопаток  $\epsilon = 0,04$  равен  $\eta_r = 0,8$ .

Принимаем число лопаток  $z = 4$ .

По уравнению (7) находим

$$M = 1,9 \cdot 10^3 \cdot 34,5 / (2650^2 \cdot 4 \cdot 0,8) = 0,00432 \text{ или } c_a BD = 0,00432.$$

Полный расчёт лопастной машины сведён в табл. 2, в которой приведены данные по длине профиля лопастей и углу их установки на различных промежуточных диаметрах лопастного колеса, а также некоторые дополнительные коэффициенты, необходимые при расчёте. В качестве расчётного профиля выбрана дужка  $f/L = 0,05$ .

Таблица 2

Данные расчёта вентилятора

$D, \text{ м}$	$u, \text{ м/с}$	$c_a B, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	$C_a$	$\alpha, \text{ град.}$	$\sin\beta_2 = v_2/u$	$\beta_2, \text{ град.}$	$\Theta_{2\text{л}} = \alpha + \beta$
0,20	23,038	0,0212	0,0350	0,605	2,0	0,202	11,65	13,65
0,17	19,580	0,0249	0,0402	0,620	2,2	0,238	13,77	15,97
0,14	16,127	0,0302	0,0476	0,635	2,4	0,289	16,80	19,20
0,11	12,670	0,0385	0,0592	0,650	2,6	0,368	21,59	24,19
0,09	10,370	0,0470	0,0710	0,662	2,8	0,450	26,68	29,48

**Заключение.** Предложенный подход расчёта осевых лопастных машин позволяет определить основные размерные соотношения исполнительных элементов при известном профиле лопасти. Полученные результаты являются основой оптимизационных вычислений с использованием современных программных продуктов, обеспечивающих как создание трёхмерных параметризованных геометрических моделей сложных технических устройств, так и проведение их инженерного анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костышин, В. С. Моделирование режимов центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В. С. Костышин. – Иваново-Франковск: ИФГТУНГ, 2000. – 163 с.
2. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Саратов: Ай Ни Эр Медиа, 2019. – 289 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.
3. Аэродинамика: учеб. пособие / А. Г. Голубев [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 687 с.
4. Краснов, Н. Ф. Основы аэродинамического расчёта / Н. Ф. Краснов. – М.: Высш. шк., 1981. – 496 с.
5. Ким, К. К. Энергосберегающая и энергоэффективная система электроотопления пассажирского вагона / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Энергетические системы. – 2022. – № 1. – С. 62-70.
6. Ivanov, S. Problem statement for the analysis of electromechanical systems by simulation modeling methods / S. Ivanov, K. Kim // IOP Conf. Series: Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) Gelendzhik, 2021. 022060 IOP Publishing doi: 10.1088/1742-6596/2131/2/022060.
7. Algorithmic Bases Of Research Of Combined Energy Converters By Engineering Analysis Methods. Prosolovich A. A., Ivanov S. N., Kim K. K. // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Warsaw, 2021. P. 427-437.
8. Modeling Of Mass Transfer Processes In Special Applications Energy Devices. Prosolovich A. A., Ivanov S. N., Prichodchenko O. V., Kim K. K., Khismatulin M. I. // Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Warsaw, 2021. C. 438-449.
9. Ким, К. К. Электромеханическая система отопления пассажирского вагона / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 566-574.
10. Ким, К. К. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в теплогенерирующих перекачивающих электромеханических преобразователях / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Транспорт шёлкового пути. – 2020. – Вып. 3. – С. 3-14.
11. Иванов, С. Н. Гидродинамическое моделирование гибридных энергетических устройств с использованием CFD-технологий / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 161-169.
12. Алгоритм CFD-моделирования процесса тепломассопереноса в совмешённом электротехническом устройстве / С. Н. Иванов, К. К. Ким, О. В. Приходченко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 65-72.
13. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 573-583.
14. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмешённых энергетических устройствах / О. В. Приходченко, С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 37-44.
15. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов // ТРАНСЭНЕРГОКОМ-2018: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, г. Саратов, 16-17 мая 2018 г. – Саратов: СГТУ, 2018. – С. 124-130.
16. Иванов, С. Н. Компьютерное моделирование напорных элементов перекачивающих электромеханических устройств с повышенным классом электробезопасности / С. Н. Иванов, А. А. Просолович, М. Ю. Сарилов // ИТЭЭ-2017: материалы XI Всероссийской научно-технической конференции, ФГБОУ ВО «Чуваш-



ский государственный университет им. И. Н. Ульянова». – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2018. – С. 75-81.

17. Численное моделирование электромагнитных и тепловых процессов в теплогенерирующих электромеханических преобразователях / К. К. Ким [и др.] // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: межвузовский тематический сборник научных трудов / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск: ОГУПС, 2015. – С. 23-30.

18. Ким, К. К. Электромагнитные и тепловые процессы в теплогенерирующих насосах / К. К. Ким, С. Н. Иванов, Н. С. Карпова // Герметичность, вибронадёжность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования. Гервикон+насосы-2014: сборник докладов участников XIV Международной научно-технической конференции. – Суми: Папирус, 2014. – С. 105-112.

**Федорченко С. К., Давыдов В. М., Иванищев Ю. Г.  
S. K. Fedorchenko, V. M. Davydov, U. G. Ivanishev**

## **ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ МЕТОДОМ ОБКАТЫВАНИЯ**

### **MACHINING OF PARTS BY SURFACE-PLASTIC DEFORMATION USING THE ROLLING METHOD**

**Федорченко Сергей Константинович** – аспирант Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: s.k.fedor@mail.ru.

**Sergey K. Fedorchenko** – Post-Graduate Student, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: s.k.fedor@mail.ru

**Давыдов Владимир Михайлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: davellut@mail.ru.

**Vladimir M. Davydov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Technological Informatics and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: davellut@mail.ru.

**Иванищев Юрий Георгиевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: Ivanishev41@mail.ru.

**Uri G. Ivanishev** – Ph.D., Associate Professor, Technology Computer Science and Information Systems Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: Ivanishev41@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассматривается обработка деталей поверхностно-пластическим деформированием с использованием метода обкатывания на станках с числовым программным управлением. Обозначены преимущества обкатного инструмента разных конфигураций. В работе оценивается влияние технологической наследственности при производстве деталей и при поверхностно-пластическом деформировании. Определены параметры оценки качества поверхности, шероховатости, начальные требования к отделочно-упрочняющей обработке и факторы, влияющие на качество поверхностного слоя.

**Summary.** The article deals with the processing of parts by surface-plastic deformation with the use of the rolling method on numerically controlled machine tools. Advantages of turning tools of different configurations are outlined. The influence of technological heredity in the production of parts and surface-plastic deformation is evaluated. The parameters of surface quality assessment, roughness, initial requirements for finishing and strengthening processing and factors affecting the quality of the surface layer are determined.

**Ключевые слова:** обкатывание, пластическое деформирование, шероховатость, упрочнение, поверхностный слой, технологическая наследственность.

**Key words:** rolling, plastic deformation, roughness, hardening, surface layer, technological heredity.

УДК 621.7

**Введение.** Обкатка поверхностей является довольно простым методом механообработки поверхностей, однако при этом имеет ряд особенностей и нюансов. Метод обкатывания поверхностей является одним из методов поверхностно-пластического деформирования (ППД), относится к холодным методам механообработки. Существует несколько методов ППД: раскатывание, обкатывание, выглаживание, накатывание, дорнование. В данной статье рассматривается процесс обкатывания.

**Методика обработки.** Метод обкатывания поверхности – это статический метод ППД. Обкатывание используется для упрочнения, уменьшения шероховатости, а также образования мак-

симальной площади контакта поверхности за счёт смятия микронеровностей. С помощью обработки таким образом поверхности удаётся обеспечить повышение износостойкости и сопротивления усталости детали в несколько раз. Эти методы позволяют механизировать ручной труд и повысить эффективность и производительность окончательных операций.

Основная проблема заключается в том, что не всегда имеется технологическая возможность получить заданное качество поверхности, для таких поверхностей характерна шероховатость в пределах  $R_a = 0,4 \dots 0,2$  мкм. Для решения данной проблемы необходимо разрабатывать метод обкатывания с точки зрения применения его на современном оборудовании с использованием новейших технологий.

Главное отличие метода обкатывания от остальных методов ППД заключается в том, что при обкатывании рабочая часть инструмента (ролик, шарик) работает как тело качения, в то время как в других инструментах, таких как выглаживатели и дорны, тело неподвижно. На рис. 1 представлены два основных вида обработки поверхности детали, используемых на серийных и на единичных производствах: обкатывание и выглаживание.

Принцип работы обкатывания: на шарик или ролик (см. рис. 1, а) подаётся определённое усилие  $P$  на деталь, и он, катясь по поверхности со скоростью  $M$  и подачей  $F$ , сминает неровности (шероховатости), образуя при этом наклённый поверхностный слой, упрочняя поверхность материала. Принцип действия для выглаживания (см. рис. 1, б) схож с обкаткой, но в качестве инструмента используется неподвижный индентор, который давит с усилием  $P$  и подаётся вдоль детали с подачей  $F$ .

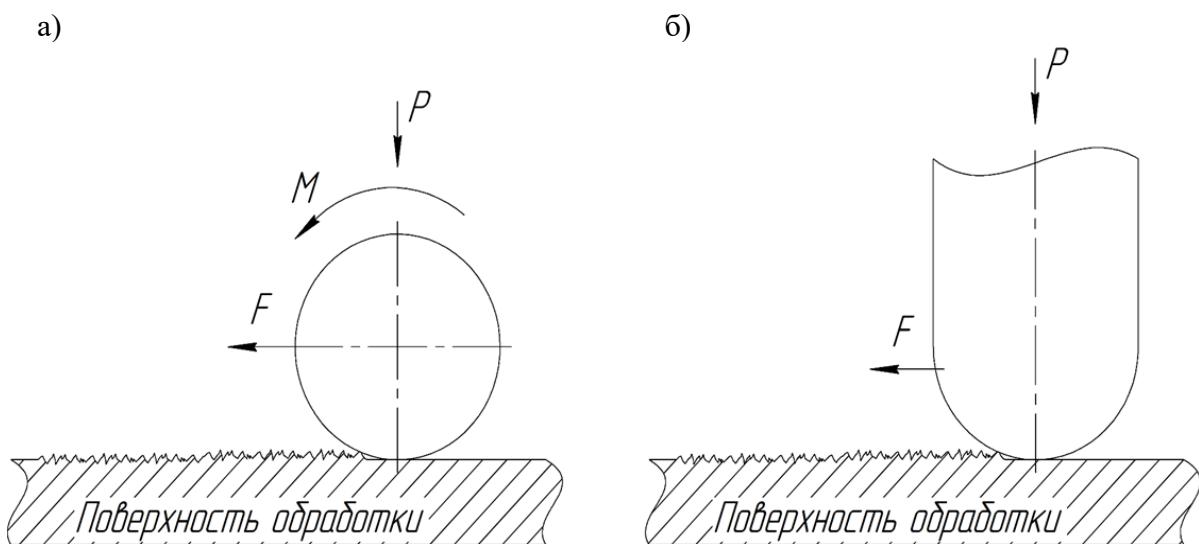


Рис. 1. Основные виды обработки поверхностей ППД  
(микронеровности показаны для наглядности): а – обкатывание; б – выглаживание

Инструментом для обкатывания обычно служат шариковые и роликовые обкатники. Применяются они обычно на универсальных станках, в качестве финишной операции в современных реалиях необходимо развивать применение данного инструмента на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). При применении на станках с ЧПУ появляются возможности к применению этой технологии на сложнопрофильных контурах детали, таких как конус и сфера. В некоторых случаях даже возможна обработка углублений. На рис. 2 представлены типовые обкатывающие инструменты: шариковый, роликовый угловой, роликовый вертикальный.

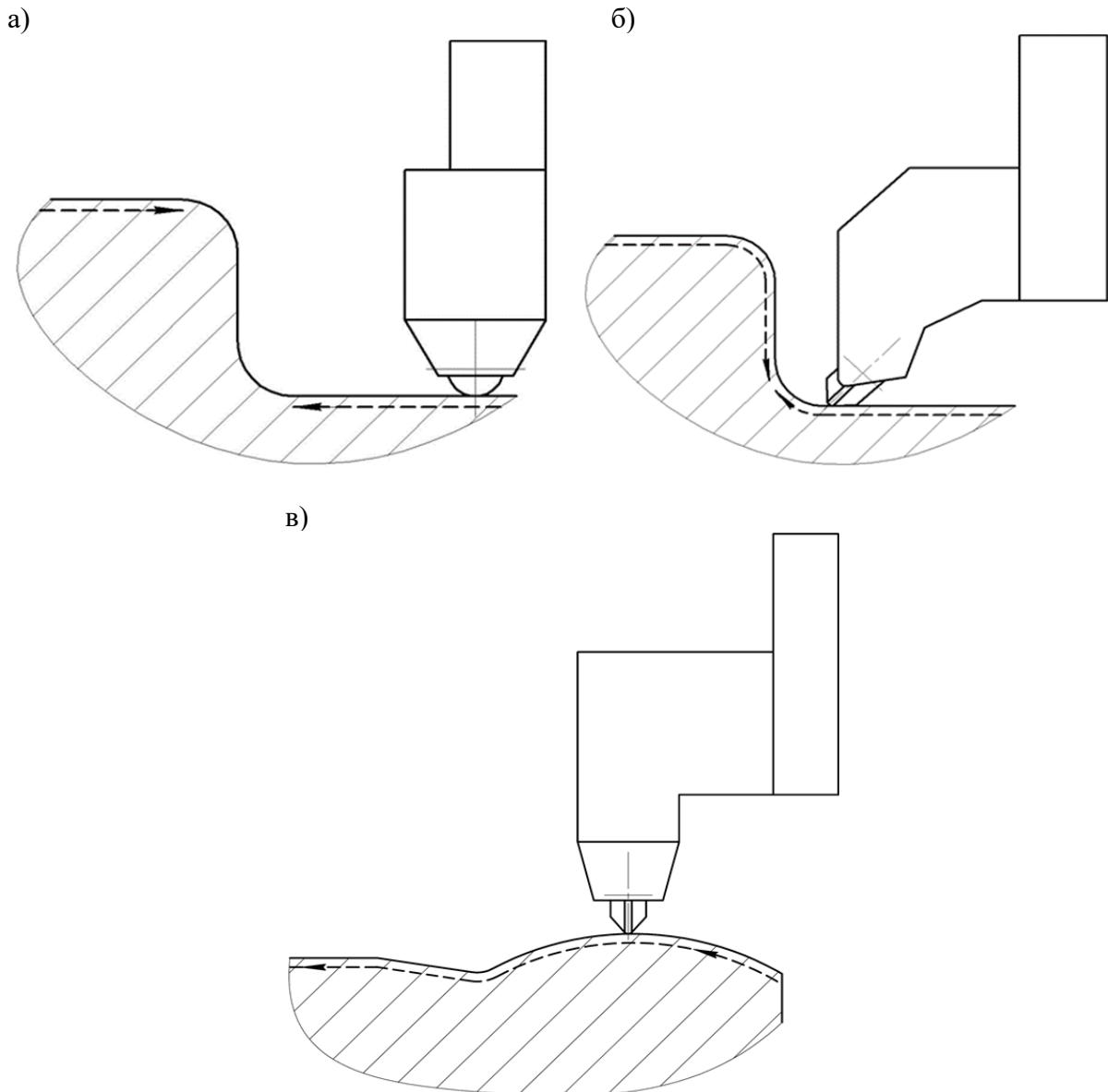


Рис. 2. Обкатывающие инструменты: а – шариковый; б – роликовый угловой; в – роликовый вертикальный

Стоит отметить, что из-за особенности конструкции инструмента технологические возможности обработки кардинально отличаются для шарикового и роликового инструмента. Существуют такие типы роликовых обкатывающих инструментов, конструкция которых позволяет обработать полностью сферические поверхности одним инструментом за один установ (см. рис. 2, в), однако для обработки торцов такой инструмент уже нельзя использовать, для этого необходимо использовать инструмент роликовый угловой (см. рис. 2, б). Если говорить о шариковом инструменте (см. рис. 2, а), то вследствие механики работы такого инструмента не представляется возможным использовать его для обработки торцов и сфер с большой кривизной поверхности. Однако шариковый инструмент имеет наиболее жесткую конструкцию, в отличие от роликового, что позволяет применять его для обработки более твердых сталей.

Метод обкатывания крайне эффективен в своём применении – при одном проходе возможно достичнуть улучшения поверхности до 80 %.

**Применение метода обкатывания для производства деталей.** Как уже говорилось выше, разработка и исследование метода обкатывания необходимы для случаев, когда нет возможности



получить заданное качество поверхности после чистового точения, причинами этого могут быть как технологические возможности станков, так и крайне высокие требования к поверхности детали. Необходимо учесть, что данный метод не является новым и используется давно в машиностроении [1]. Несмотря на повсеместное применение отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), необходимо рассматривать автоматизированную обработку на станках с ЧПУ. Помимо этого, необходимо акцентировать внимание на технологической наследственности, например, вследствие приложения большой силы прижима к детали при закреплении на станке после обработки могут возникать поводки геометрии, что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках детали либо и вовсе может привести к неисправимому браку.

В данной статье предлагается применение описываемого технологического оборудования на станках с ЧПУ, в особенности на токарных. В качестве обрабатываемых деталей рассматриваются валы. Вал – это деталь машины, предназначенная для передачи крутящего момента и восприятия действующих сил со стороны расположенных на нём деталей. Валы являются ответственными деталями, и к ним предъявляются повышенные требования ещё на этапах изготовления заготовок. При изготовлении важно соблюдать правильную технологию и корректировать операции в ходе изготовления. С момента производства заготовки и до изготовления конечной детали вал претерпевает множество видов операций, говоря иначе, деталь подвергается влиянию технологической наследственности (ТН).

В монографии [2] приводится математическая формула, представляющая конструкторско-технологическую информацию как множественно-векторное выражение; данную формулу возможно использовать для определения влияния ТН на параметры обрабатываемой детали, получаемые после окончательной обработки. Согласно этому математическому представлению, на выходные параметры детали, которые можно интерпретировать как долговечность и трудоёмкость изготовления детали, помимо её геометрических параметров, влияют также тип обрабатываемой поверхности, точность выполнения поверхностей, шероховатость и твёрдость. Последние два параметра позволяют нам использовать раскатной и другой отделочно-упрочняющий инструмент с целью повышения качественных характеристик детали. Если говорить о технологической наследственности и ОУО, то эти два определения применимы к валам и крайне важны при их производстве. В статье [3] автор приводит доводы, что ТН необходимо учитывать при производстве деталей, а также при ОУО. В данной работе получены результаты, позволяющие установить закономерности при формировании остаточных напряжений в зависимости от истории нагружения детали. Таким образом, можно смоделировать технологический процесс и внести правки перед запуском в производство дорогостоящих деталей. На всех стадиях жизненного цикла детали, включая резание, ППД и эксплуатационное нагружение детали, происходят непрерывное накопление деформаций и исчерпание запаса прочности и пластичности металла, что в свою очередь приводит к усталостному разрушению, появлению трещин и выходу детали из строя.

В. И. Аверченков описывал в своей работе [4] сущность технологической наследственности и какое влияние она оказывает на получаемый результат. Согласно данной работе, на качественные показатели детали влияет в большей степени совокупность технологических факторов, действующих на деталь при обработке на этапе финишных операций технологического процесса, а оставшуюся часть составляет совокупность факторов, накопленных на предыдущих этапах обработки. Исследование данных факторов поможет достичь наибольшей долговечности деталей, а также – в перспективе – уменьшить затраты на их изготовление.

**Требования к обработке обкатыванием.** Для метода обкатывания, как и для многих других технологических операций, необходимо соблюдать свои требования перед обработкой и в её процессе. Качество поверхностного слоя материала, подвергающегося ППД, зависит от выбранного инструмента, начальных условий и режимов обработки. В статье [5] рассматривается эксперимент обкатывания поверхности с помощью роликового и шарикового инструментов, в ходе которого автором установлено, что при обработке шариком шероховатость поверхности меньше, чем при обработке роликом, а твёрдость в рамках погрешности одинакова. Также было установлено, что большую роль играют давление инструмента и число оборотов детали, чем вид инструмента.

Начальными параметрами, влияющими на выбор условий обработки методом ППД с помощью обкатывания, являются: шероховатость обрабатываемой поверхности, материал и его физико-механические свойства, а также используемый технологический инструмент.

Шероховатость, согласно рекомендациям, не должна превышать  $Ra = 2,5 \text{ мкм}$ , большая величина приведёт к перенаклёпу, повреждению инструмента и менее предсказуемому уменьшению размеров вследствие пластической деформации вершин. Стоит отметить также, что начальная шероховатость зависит и от твёрдости обрабатываемого материала, его свойств и заданной итоговой шероховатости.

Для оценки качества получаемой поверхности рекомендуется использовать следующие параметры:

- $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля;
- $Rt$  – максимальная шероховатость;
- $RSm$  – средняя ширина выступов и впадин;
- $Mr(c)$  – коэффициент заполнения материалом (кривая Аббота).

Именно данные параметры позволяют сделать наиболее подробную оценку качества поверхности после ОУО и проанализировать эксплуатационный потенциал поверхностей детали.

В свою очередь, от начальной шероховатости зависят режимы обработки обкатным инструментом, как правило, эти режимы устанавливаются эмпирическим путём, однако можно использовать рекомендации в пособиях по обработке материалов ППД [1], таким образом, для ролика с радиусом  $r = 5 \text{ мм}$  для достижения параметра шероховатости  $Ra = 0,2 \text{ мкм}$  при начальной шероховатости  $Ra = 1,25 \text{ мкм}$  оптимальная подача составляет  $F = 0,07 \text{ мм/об}$ , при изменении исходного параметра шероховатости до  $Ra = 0,63 \text{ мкм}$  рекомендуемая подача будет составлять  $F = 0,15 \text{ мм/об}$ . Для шарика с радиусом  $r = 6 \text{ мм}$  и с требуемой шероховатостью  $Ra = 0,2 \text{ мкм}$  при исходной шероховатости  $Ra = 1,6 \text{ мкм}$  рекомендуемая подача составляет  $F = 0,14 \text{ мм/об}$ . Вышеописанные принципы относятся к типовым инструментам, при использовании современного и специализированного оборудования необходимо руководствоваться требованиями и рекомендациями производителя инструмента [6]. Стоит отметить, что, помимо вышеуказанного, на качество обработки и эксплуатационные характеристики также влияет история детали, так называемая технологическая наследственность; согласно источнику [3], ТН обязательно должно учитываться при проектировании технологических процессов обработки ППД. При манипуляции с параметрами, влияющими на результат обработки, крайне важно правильно спланировать и провести эксперимент [7–8]. С помощью программного обеспечения возможно исследование ТН, а также остальных входящих параметров, влияющих на конечный результат.

**Заключение.** Анализ литературных источников показал, что существуют такие параметры, которые влияют на качественные показатели детали и при изменении которых можно добиться повышения срока эксплуатации изделия без увеличения трудоёмкости его изготовления. Рассмотрены методы обкатывания поверхностей с помощью роликового и шарикового инструментов. Обозначены факторы, влияющие на обкатывание поверхности с помощью роликового инструмента, а именно режимы обработки, даны параметры шероховатости, с помощью которых в полной мере можно оценить качество поверхности, получаемой при отделочно-упрочняющей обработке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. Давыдов, В. М. Концептуальное проектирование мехатронных модулей механообработки / В. М. Давыдов, Ю. Г. Кабалдин. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 251 с.
3. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием / В. Ю. Блюменштейн // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2006. – № 6. – С. 7-9.
4. Аверченков, В. И. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей / В. И. Аверченков, А. С. Васильев, М. Л. Хейфец // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2018. – № 10 (88). – С. 27-32.



5. Экспериментальное исследование поверхностно-пластического деформирования стальных деталей механическими инструментами / В. В. Поветкин, А. З. Букаева, Е. П. Орлова, И. Н. Исаева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 3 (58). – С. 59-67.
6. Использование раскатного инструмента в условиях многономенклатурного производства / С. К. Федорченко, В. М. Давыдов, М. Р. Гимадеев, Ю. Г. Иванищев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № VII (63). – С. 92-97.
7. Иванищев, Ю. Г. Влияние принимаемых параметров на адекватность регрессионной модели / Ю. Г. Иванищев, В. М. Давыдов. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2023. – 94 с.
8. Иванищев, Ю. Г. Практика планирования эксперимента и автоматизированной обработки результатов / Ю. Г. Иванищев, В. М. Давыдов. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2022. – 176 с.

**Тураков И. А., Янченко А. В.**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ  
ТОКОПРОВОДЯЩИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШТАМПОВКЕ

**Тураков И. А., Янченко А. В.  
I. A. Turakov, A. V. Yanchenko**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШТАМПОВКЕ**

### **EXPERIMENTAL SETUP FOR RESEARCH OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF CONDUCTIVE PARTS DURING STAMPING**

**Тураков Игорь Андреевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: turakov.2017@gmail.com.

**Igor A. Turakov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: turakov.2017@gmail.com.

**Янченко Андрей Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Andrey V. Yanchenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В работе рассмотрена экспериментальная установка для проведения измерений коэффициента теплоотдачи плоских деталей и токопроводящих пластин с максимальным размером до двух метров. Разработана методика измерений и обработки данных на базе теории планирования эксперимента, выбраны измерительные приборы и необходимое электрооборудование для реализации проекта.

**Summary.** The paper discusses an experimental setup for measuring the heat transfer coefficient of flat parts and conductive plates with a maximum size of up to two meters. A measurement and data processing technique was developed based on the theory of experimental planning; measuring instruments and the necessary electrical equipment were selected for the implementation of the project.

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, коэффициент теплоотдачи, токопроводящие детали, штамповка.

**Key words:** experimental setup, heat transfer coefficient, heat transfer coefficient, stamping.

УДК 621.365.3

**Введение.** В современном промышленном производстве штамповка является одним из важнейших процессов получения металлических изделий. При этом важным аспектом этого процесса является контроль температуры металла во время штамповки. При токовом нагреве важно понимать, как энергия передаётся и распределяется внутри токопроводящих деталей. Для изучения этих процессов предлагается специальная экспериментальная установка, разработанная для исследования коэффициентов теплоотдачи токопроводящих деталей при штамповке. Одной из главных проблем при расчёте тепловых процессов токоведущих элементов является трудность теоретического определения коэффициентов теплоотдачи на базе критериальных уравнений, допускающих некоторую неоднозначность в исходных данных, что особенно важно при нагреве до температур, близких к температуре плавления и пластической деформации металлов [1–7]. Поэтому для проверки адекватности теоретических расчётов необходимо проведение экспериментальных исследований для конкретных температур и материалов токоведущих элементов.

Целью предлагаемой установки является определение коэффициента теплоотдачи, который представляет собой меру эффективности передачи тепла между поверхностью детали и окружающей средой [8–10]. Он зависит от различных факторов, таких как свойства материала, состояние поверхности и характер процесса теплопередачи. Зная этот коэффициент, можно оптимизировать процесс штамповки, улучшить его энергетическую эффективность и качество получаемых изде-

лий. Экспериментальная установка состоит из нескольких основных компонентов (см. рис. 1). Токопроводящая деталь – это образец, который будет исследоваться. Обычно это металлические формы или пластины, соответствующие реальным деталям, используемым в производстве. Система управления (СУ) – это компонент, который отвечает за управление экспериментом, а также сбор и анализ данных. В измерительной системе (ИС) собираются данные от амперметра, вольтметра, пиromетра и термопары [12; 13]. Трансформатор (Т1) является источником-преобразователем подаваемой энергии, участвует в контроле процесса нагрева заготовок, может быть использован для регулирования напряжения и тока, подаваемых на нагревательные элементы. Система управления, подключаемая к трансформатору, позволяет контролировать нагрев токопроводящей детали, менять частоту и амплитуду тока через заготовку, что открывает возможность изучения различных условий нагрева и их влияния на коэффициент теплоотдачи. Тиристорный регулятор напряжения (ТР) – это устройство, которое используется для изменения амплитуды и фазы напряжения в электрической цепи. Комбинация тиристорного преобразователя и трансформатора позволяет эффективно формировать и контролировать напряжение и ток, подаваемые на деталь.

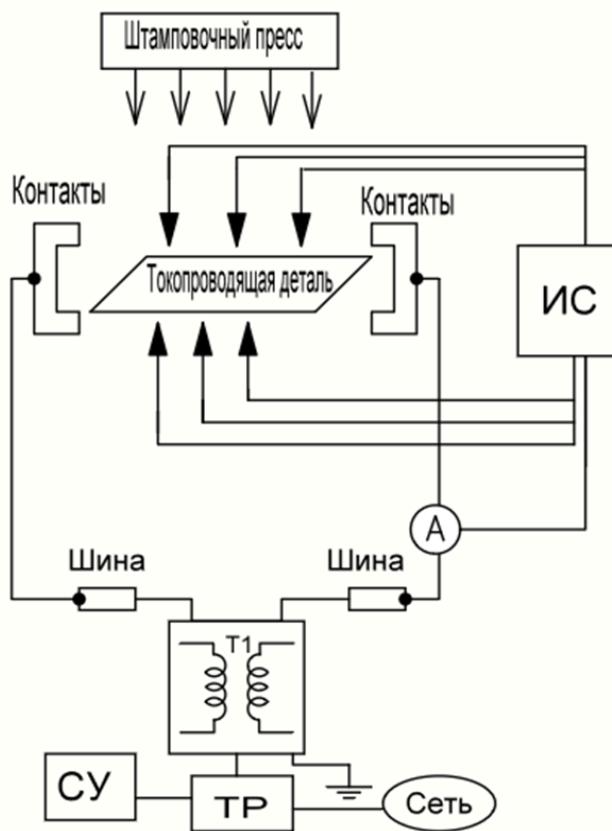


Рис. 1. Структурная схема системы

Экспериментальная установка предусматривает контроль потерь в шинопроводе между трансформатором и деталью, а также в контактах крепления детали, кроме этого, должна обеспечивать возможность изменять размеры и форму деталей в процессе исследования [14]. Это может быть достигнуто путём пропускания электрического тока через специально разработанные конструкции шинопроводов и контактов, к которым подключается нагреваемая и штампуюемая деталь. Контакты и шины – важнейшие электропроводящие элементы, которые могут быть изготовлены из меди или других металлокомпозитов с высокой электропроводностью. Они размещаются по контуру токопроводящей детали, обеспечивая минимизацию переходного контактного сопротивления. При расчётах нагрева необходимо учитывать теплоёмкость не только самой детали, но и примы-

кающих контактов и массивных токопроводов. Это может быть заложено в измерительную систему установки.

Известно, что количество теплоты, которое отводится с поверхности электрического аппарата в окружающую среду, определяется по Закону Ньютона:

$$P = K_t * F * (\theta - \theta_0),$$

где  $K_t$  – коэффициент теплоотдачи токопроводящих деталей,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $F$  – охлаждающая поверхность,  $\text{м}^2$ ;  $\theta$  и  $\theta_0$  – температуры поверхности и окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ .

Основная проблема заключается в определении значения  $K_t$  для различных условий охлаждающей среды, размеров и формы токопроводящей детали.

Для приближённых расчётов коэффициент теплоотдачи определяют по эмпирическим формулам:

- для горизонтальных цилиндрических проводников, окрашенных краской и расположенных горизонтально в воздухе:

$$K_t = 10 * k_1 * (1 + k_2 * 10^{-2} * (\theta - \theta_0)),$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, зависящие от диаметра проводника;

- для окрашенной краской прямоугольной шины, находящейся в воздухе, где большая сторона сечения расположена вертикально:

$$K_t = 9,2 * (1 + 0,9 * 10^{-2} * (\theta - \theta_0));$$

- для цилиндрических катушек:

$$K_t = 2,1 * [1 + 0,005(\theta - \theta_0)] / \sqrt[3]{F}.$$

Теоретически  $K_t$  можно рассчитать с использованием известного критерия Нуссельта по формуле

$$N_u = K_t * \frac{L}{\lambda},$$

где  $L$  – определяющая размер нагреваемой детали, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ .

Критерий  $N_u$  является функцией других критериев, в общем виде:

$$N_u = f(G_r, P_r, R_e, F_o),$$

где  $N_u, Gr, Pr, Re, F_o$  – соответственно критерии Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса, Фурье.

Для свободной конвекции в неограниченном пространстве справедливо выражение

$$N_{um} = C * [G_r * P_r]_m^n * \left( \frac{P_{rm}}{P_{rc}} \right)^{0.25}, \quad (1)$$

где  $C$  и  $n$  – это коэффициенты, зависящие от произведения  $[G_r * P_r]$ ;  $m$  – индекс температуры среды.

Для воздуха  $P_{rm} \cong P_{rc}$ , и поэтому выражение (1) можно упростить:

$$N_{um} = C * [G_r * P_r]_m^n.$$

Однако неоднозначность характерного размера детали и изменчивость параметров охлаждающей среды ведёт к относительной точности расчёта  $K_t$  по уравнению (1). Поэтому адекватность расчёта следует уточнять с помощью натурных экспериментов. Согласно теории планирования эксперимента, необходимо выбрать вид регрессионной модели зависимости  $K_t$  от основных влияющих независимых факторов.

Для плоских шин и пластин (см. рис. 2) такими факторами могут являться: температура  $\theta$ , площадь теплоотдачи  $S$ , соотношение сторон листа  $a/b$  и угол наклона листа относительно гори-

зонтали  $\varphi$ . При отсутствии априорной информации о линейности однофакторных зависимостей следует воспользоваться мультиплекативной моделью:

$$K_t = b_0 * \theta^{b_1} * S^{b_2} * \varphi^{b_3} * \left(\frac{a}{b}\right)^{b_4}. \quad (2)$$

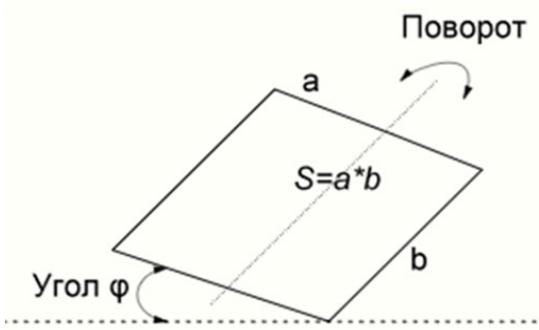


Рис. 2. Эскиз токопроводящего листа

Такая модель может отражать нелинейные зависимости и при поиске коэффициентов легко переводится в линейный вид. Далее необходимо задать диапазоны изменения каждого фактора. По техническим условиям производства штампованных деталей из титановых пластин назначаем следующие диапазоны значений:

- изменение температуры листа от 20 °C до 700 °C;
- площадь листа от 0,25 до 1,5 м<sup>2</sup>;
- угол наклона от 0° до 90°;
- соотношение сторон  $a/b$  от 0,25 до 0,5.

Мультиплекативная модель может быть преобразована в линейную модель путём замены переменных в формуле:

$$Y = B_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_4 * X_4,$$

где  $Y = \lg K_t$ ;  $B_0 = \lg b_0$ ;  $X_1 = \lg \theta$ ;  $X_2 = \lg S$ ;  $X_3 = \lg \varphi$ ;  $X_4 = \lg \frac{a}{b}$ .

Для обратного перехода к форме (2) необходимо изменить только один коэффициент  $b_0 = \exp(B_0)$ . План эксперимента для линейной модели представлен в табл. 1.

Таблица 1  
Дробнофакторный план эксперимента (полуреплика)

Номер опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y$
1	+1	+1	+1	+1	+1	$Y_1$
2	+1	-1	+1	+1	-1	$Y_2$
3	+1	+1	-1	+1	-1	$Y_3$
4	+1	-1	-1	+1	+1	$Y_4$
5	+1	+1	+1	-1	+1	$Y_5$
6	+1	-1	+1	-1	-1	$Y_6$
7	+1	+1	-1	-1	-1	$Y_7$
8	+1	-1	-1	-1	+1	$Y_8$

После проведения эксперимента коэффициенты модели вычисляются по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N};$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i * x_{ji}}{N},$$

где  $i$  – номер опыта;  $j$  – номер фактора;  $N$  – количество опытов плана.

Таким образом, может быть получена четырёхфакторная модель для оценки коэффициента теплоотдачи. Подставляя его в уравнения нагрева и охлаждения токоведущей пластины, можно получить семейство кривых для различных условий теплоотдачи и мощностей нагрева (см. рис. 3):

$$\vartheta = \vartheta_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \vartheta_{\text{н}} * e^{-\frac{t}{T}},$$

где  $\vartheta_{уст}$ ,  $\vartheta_0$  – установившееся и начальное значения температуры.

Сравнивая полученные кривые с реальными графиками нагрева, можно уточнять значения  $K_t$  и прогнозировать температуры нагрева новых заготовок. Следует отметить, что условия теплоотдачи влияют на постоянную времени нагрева только в условиях продолжительного увеличения температуры. В режимах короткого замыкания на скорость нагревания в основном влияет собственная теплёмкость детали. Это соответствует начальным прямолинейным участкам кривых нагрева.

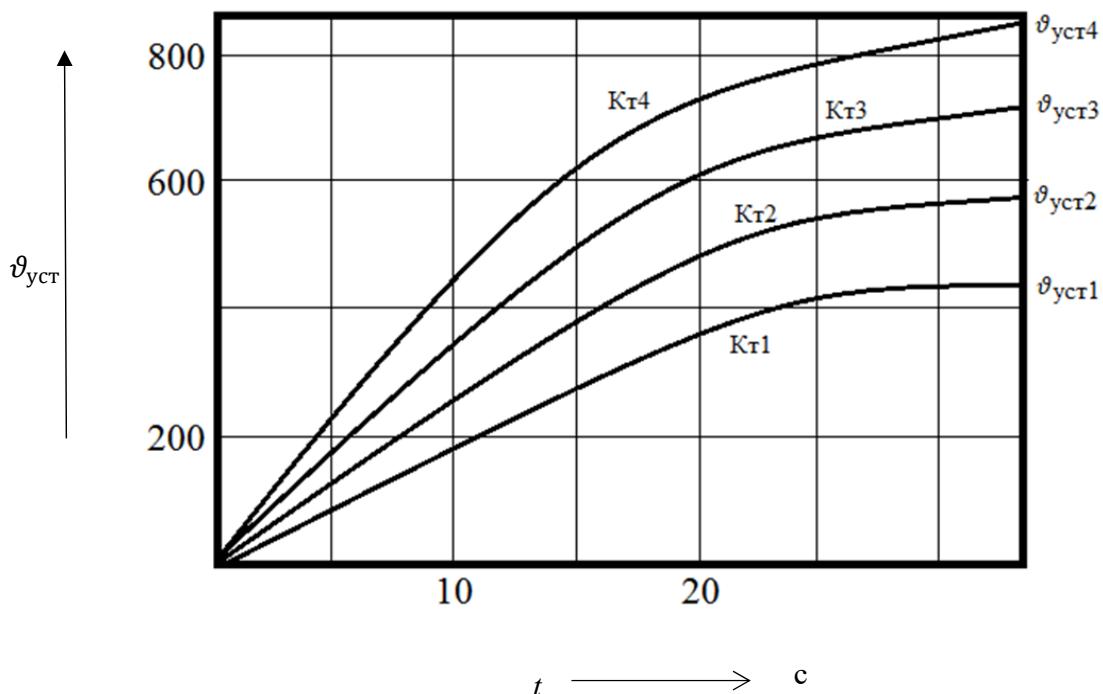


Рис. 3. График нагрева заготовок для разных  $K_t$  и  $\vartheta_{уст}$

При нагреве листовых немагнитных заготовок переменным током следует принимать во внимание проявление поверхностного эффекта. В многослойных конструкциях с параллельными проводниками необходимо учитывать эффект близости. В этом случае в модель  $K_t$  нужно вводить дополнительные факторы толщины листа и расстояния между параллельными листами. Указанные эффекты могут влиять на тепловые потери исследуемых заготовок. Случайные погрешности, возникающие при измерении температур, можно учитывать повторением опытов в каждой точке плана с последующей обработкой.

В заключение отметим, что установка имеет решающее значение для понимания и оптимизации процессов отвода тепла при производстве листовых штампованных деталей. Используя уточнённые коэффициенты теплоотдачи, можно оптимизировать процесс штамповки и повысить эффективность операций нагрева, а также повысить технику безопасности на производстве [11, 15]. Предлагаемая экспериментальная установка может восполнить пробелы в справочных данных для коэффициентов теплоотдачи токоведущих деталей различной формы для конкретного производства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рогов, В. А. Методика и практика технических экспериментов: учеб. пособие / В. А. Рогов, Г. Г. Поздняк. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 288 с.
2. Основы теории электрических аппаратов / Б. К. Буль [и др.]; под ред. Г. В. Буткеевича. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.



3. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
4. Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Михаринский. – Минск: Высш. шк., 1985. – 286 с.
5. Скаков, С. В. Определение коэффициента теплоотдачи при течении воздуха в трубе / С. В. Скаков. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. – 18 с.
6. Теплообмен при кипении металлов в условиях естественной конвекции / под ред. В. И. Субботина, Д. Н. Сорокина, Д. М. Овечкина, А. П. Кудрявцева. – М.: Наука, 1969. – 207 с.
7. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче / Е. А. Краснощеков, А. С. Сухомел. – М.: Высшая школа, 1980. – 288 с.
8. Новиков, Ю. Н. Теория и расчёт электрических аппаратов / Ю. Н. Новиков. – Л.: Энергия, 1970. – 327 с.
9. Смирнов, М. А. Основы термической обработки стали / М. А. Смирнов, В. М. Счастливцев, Л. Г. Журавлёв. – М.: Наука и технологии, 2002. – 519 с.
10. Ойматова, Х. Х. Определение коэффициента теплопроводности тернарных систем с учётом изменения температуры и коэффициента теплоотдачи / Х. Х. Ойматова // Universum: технические науки. – 2022. – № 2-1 (95). – С. 53-56.
11. Попов, Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2000. – 480 с.
12. Информационно-измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 94-101.
13. Саяпина, П. О. Информационно-измерительная электромеханическая система / П. О. Саяпина, Р. Ф. Крупский // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 23-29.
14. Учёт осевых нагрузок при проектировании электромеханических приводов / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I-1 (57). – С. 63-67.
15. Штамповка деталей с электротермическим воздействием / Ю. Л. Иванов, Б. Н. Марьин, М. А. Серифимов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 2. – С. 18-24.

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

## EARTH SCIENCES AND LIFE SAFETY

**Коротеева Л. И., Суранова О. В.**  
**L. I. Koroteyeva, O. V. Suranova**

### **АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЗЕЛЁНЫХ НАСАЖДЕНИЙ И УРОВНЯ ОЗЕЛЕНЕНИЯ В КАДАСТРОВОМ КВАРТАЛЕ № 27:22:0030206 Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ**

### **ANALYSIS OF GREEN SPACE CONDITIONS AND LANDSCAPING LEVEL IN CADASTRAL QUARTER NO. 27:22:0031206 OF KOMSOMOLSK-ON-AMUR**

**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.

**Суранова Ольга Валерьевна** – студент кафедры кадастра и техносферной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: o.v.suranova1@yandex.ru.

**Olga V. Suranova** – Student, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Habarovsky Krai, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Ave. E-mail: o.v.suranova1@yandex.ru.

**Аннотация.** В данной статье проанализированы состояние и уровень зелёных насаждений тех категорий, которые формируют зелёное строительство на территории рассматриваемого квартала. Так как зелёные насаждения, которые относятся к насаждениям общего пользования, представляют основное звено всей системы зелёных насаждений города, им уделено главное внимание. Они представлены городским парком «Судостроитель», сквером на площади Юности (ЗЛК). Насаждения на улицах, создающие защиту пешеходов и зданий от транспортных шумов, автомобильных газов и пыли, а также таких природных явлений, как ветер и снежные заносы, рассмотрены в озеленении улиц Краснофлотская, Аллея Труда.

**Summary.** This article analyzes the state and level of green spaces of those categories that form green construction on the territory of the quarter in question. Since the green spaces that belong to the public spaces represent the main link of the entire system of green spaces of the city, therefore, they are given the main attention. They are represented by the city park «Sudostroitel», the public garden on the square of Youth (ZLK). Plantings on streets that protect pedestrians and buildings from traffic noise, automobile gases and dust, and natural phenomena such as wind and snow drifts are considered in the landscaping of Krasnoflotskaya Street, Alley of Labor.

**Ключевые слова:** кадастровый квартал, зелёные насаждения, парк, сквер, земельный участок.

**Key words:** cadastral quarter, green spaces, park, public garden, land plot.

УДК 349.4

При осуществлении зелёного строительства в границах городской застройки мы должны понимать, как необходимы и ценные зелёные насаждения в том мире природы, который мы решили освоить [2; 3]. Кадастровый квартал 27:22:0031206 находится в Центральном районе города Комсомольска-на-Амуре, его местоположение ограничено с северо-западной стороны улицей Краснофлотской, с северо-восточной стороны – улицей Кирова, с юго-восточной стороны – улицей Аллея Труда, проспект Мира даёт ограничение с юго-западной стороны. В данном квартале расположен один из главных парков города – парк культуры и отдыха «Судостроитель», к парку примыкает площадь Юности (ЗЛК) и Дворец культуры Судостроителей (ЗЛК) (см. рис. 1).

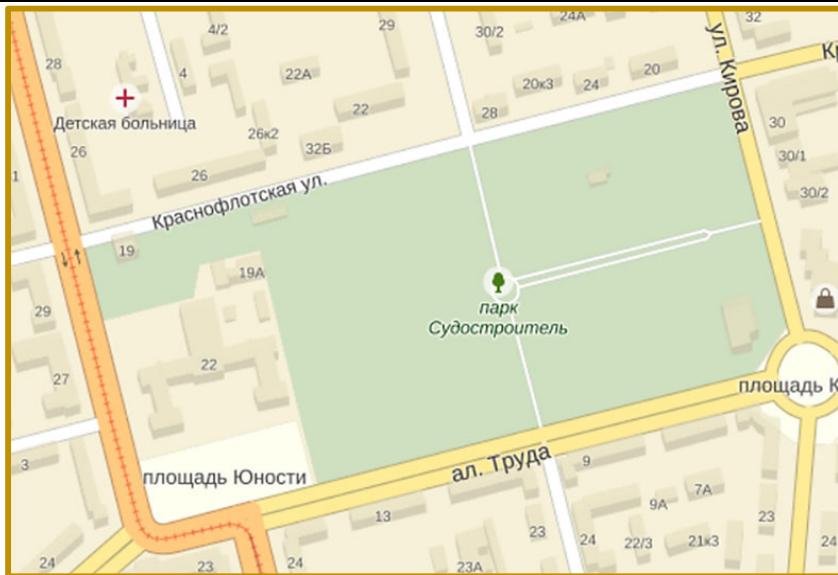


Рис. 1. Парк «Судостроитель» на карте города

Зелёные насаждения на территории парка, площади, сквера и прилегающих улиц относятся к зелёным насаждениям категории общего пользования.

*История создания.* В июне 1935 года около клуба «Ударник» на небольшом островке первоначальной тайги был объявлен общегородской субботник, для того чтобы определить границы и разбить будущий парк культуры и отдыха «Судостроитель». После войны некоторое время парк назывался «Центральным». В 1948 году возвели ограду, три входные арки, появился фонтан, эстрадная площадка и другие парковые постройки. Авторами проекта застройки и оформления были главный архитектор города И. Д. Тимохин и художник Г. А. Цивилев. Открытие парка состоялось 8 августа 1948 года. В настоящее время парк называется «Судостроитель» [5].

Так как занимаемая парком площадь составляет 12 га, то наш парк культуры и отдыха «Судостроитель» относится по нормам к средним по размерам паркам. Парк расположен в центральной части города. На его территории размещено здание Дворца культуры «ЗЛК» который имеет всё необходимое для развлечения, досуга и отдыха комсомольчан (кинотеатр, кофейни, бассейн). Такие объекты, как Губернаторский авиастроительный колледж (западный кампус), общежитие колледжа, дом бытовых услуг, музей и другие объекты общего пользования, должны привлекать к парку горожан, молодёжь. Однако по многочисленным визуальным наблюдениям парк не создаёт той атмосферы привлекательности и уюта, как бы этого хотелось. Единственное, что привлекает людей в парк в летний период – это те немногочисленные аттракционы, которыми располагает парк. На сегодняшний день по программе «Комфортная городская среда» парк находится в состоянии реконструкции: отремонтированы пешеходные аллеи, скамейки, фонари, урны, но при этом детские и спортивные площадки находятся в неудовлетворительном состоянии и требуют обновления и создания новых интересных объектов, потому что подобные малые архитектурные формы являются неотъемлемой частью эстетического облика парка культуры и отдыха (см. рис. 2). В своё время в парке «Судостроитель» были высажены следующие уникальные эндемичные породы деревьев и кустарников: бархат амурский, ива, ильм, клён ясенелистный, лещина маньчжурская, карагана древовидная, маакия амурская, осина Давида, рябина амурская, сирень амурская, тополь нескольких видов, яблоня сибирская, ясень маньчжурский, сосна обыкновенная, сирень Вольфа, лиственница Гмелина, ольха волосистая, боярышник Максимовича, жимолость съедобная и т. д. Но в настоящее время многим зелёным насаждениям парка необходимы лечение и профилактическая санитарная обработка, обрезка и формирование крон.



Рис. 2. Парк «Судостроитель»

Сквер на площади Юности (ЗЛК) также представляет собой объект насаждений общего пользования нашего города (см. рис. 3). Это такой озеленённый островок, который так необходим нашим улицам и площадям и который можно использовать для кратковременного отдыха и архитектурно-декоративных целей озеленения. Площадь также вошла в федеральную программу «Комфортная городская среда», и после её реконструкции в сквере появились не только клумбы, но и два фонтана. Площадь стала излюбленным местом отдыха [6; 7].

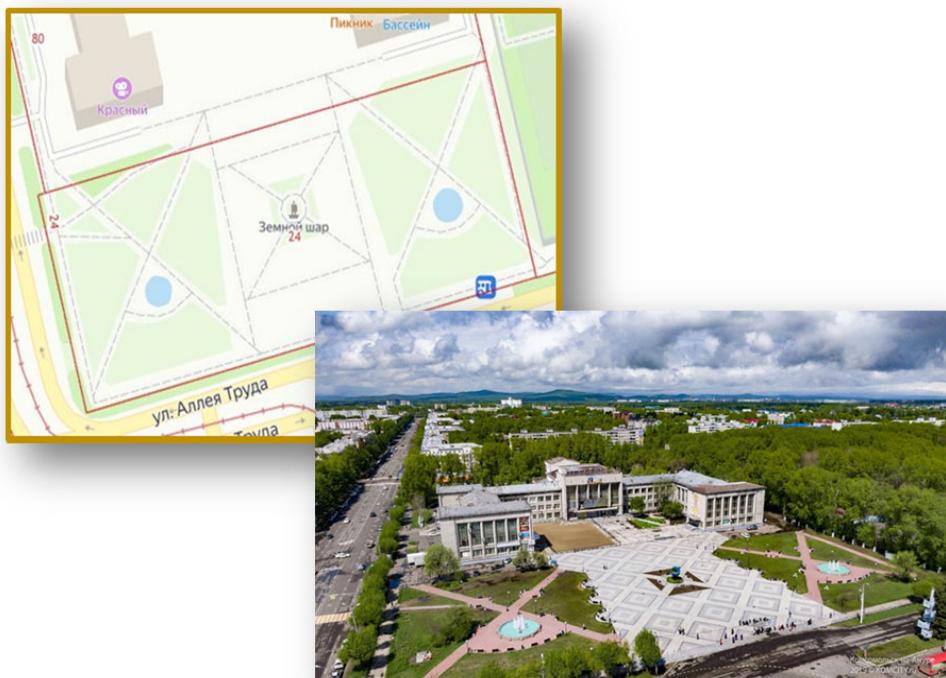
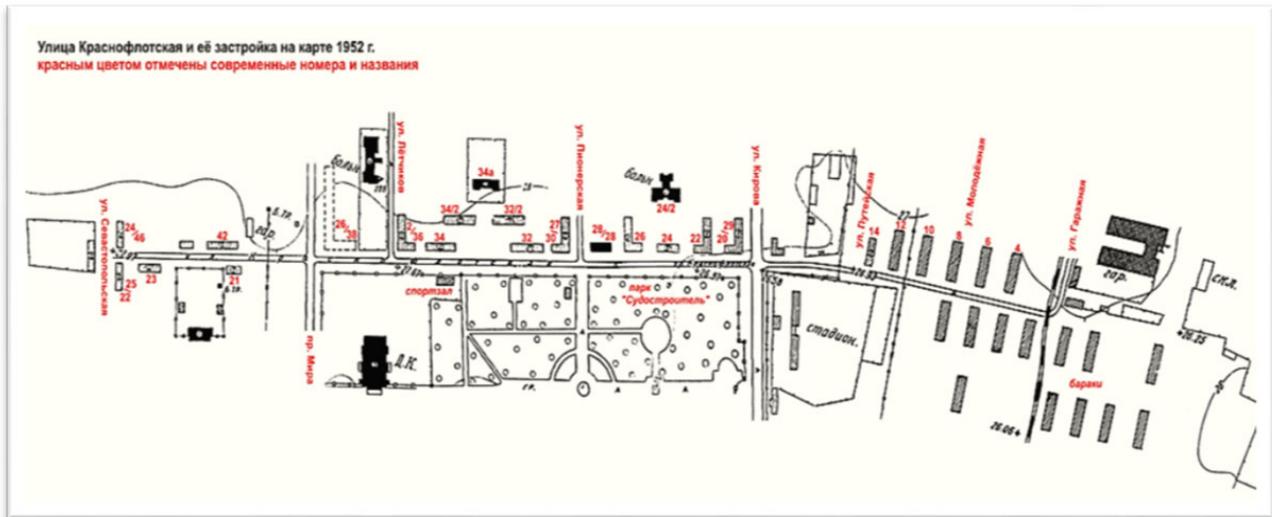


Рис. 3. Площадь Юности

Следующие рассматриваемые насаждения – это насаждения на улице.

**Улица Краснофлотская.** Улица является одной из границ парковой зоны. Это одновременно и улица транспортно-пешеходной жилой застройки районного назначения. Если посмотреть на карту города, то улица имеет направление с северо-запада на юго-восток. Её озеленение представляет собой не очень ухоженные газоны и рядовые посадки деревьев (тополь, вяз), требующих лечения и оформления.

Улица появилась в системе городской застройки в середине 1930-х годов. Её протяжённость составляет почти полтора километра. Улица расположена параллельно Аллее Труда и ограничена ул. Гаражной и ул. Севастопольской, одновременно Краснофлотская улица является границей между парком «Судостроитель» и историческим жилмассивом – Соцгородом завода № 199 (судостроительного). На рис. 4 представлена улица Краснофлотская и её застройка на карте 1952 года [5].



В 1935 году было начато строительство такой важной для города магистрали, как улица Аллея Труда. Это также одна из первых улиц города. Улица начинается от площади Макарова и до пересечения с проспектом Интернациональный имеет разделительную полосу, которая разграничивает разные направления движения транспорта (см. рис. 6). Вдоль улицы, между проезжей частью и тротуаром, идут рядовые посадки хвойных пород деревьев, требующих лечения и замены.



Рис. 6. Улица Аллея Труда на карте города

Тротуар от проезжей части также отделяют рядовые посадки (см. рис. 7).

Буферные зоны или территории придомовых земельных участков в основном не благоустроены с точки зрения зелёного строительства со стороны улицы. Ландшафтный облик дворовых территорий безлик и неинтересен, поэтому мало отвечает экологическим и эстетическим требованиям [6; 7].



Рис. 7. Зелёное убранство улицы Аллея Труда



Рис. 8. Пример живой изгороди

**Заключение.** На основании проведённого анализа видов и состояния зелёных насаждений города Юности можно сделать вывод, что в нашем городе зелёное строительство в основном осуществляется в форме высадки деревьев. Декоративные кустарники в озеленении города Комсомольска-на-Амуре используются, но в небольшом количестве [8]. Озеленение городских улиц и скверов в виде живых изгородей из кустарников пузыреплодника, рябинника является эффективным как с точки зрения защитных функций, так и декоративно-архитектурных решений в зелёном обустройстве города (см. рис. 8).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Земельный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 25 окт. 2001 г. № 136-ФЗ (ред. от 10.01.2021) // Справочно-правовая система КонсультантПлюс. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/) (дата обращения: 01.10.2022). – Текст: электронный.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29 декабря 2004 года № 190-ФЗ (ред. от 30.12.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) // Справочно-правовая система КонсультантПлюс. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51040/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/) (дата обращения: 01.10.2022). – Текст: электронный.
3. Правила землепользования и застройки // Комсомольск-на-Амуре, официальный сайт органов местного самоуправления. – Раздел сайта «Деятельность», подраздел «Управление городом». – URL: <https://www.kmscity.ru/activity/city/land-use/rules/docs> (дата обращения: 06.06.2022). – Текст: электронный.
4. Роль зелёных насаждений в стратегии развития Хабаровска: материалы третьей городской научно-практической конференции, Хабаровск / Тихоокеан. гос. ун-т; отв. ред. Н. В. Выводцева. – Хабаровск: ТГУ, 2007. – 133 с.
5. Энциклопедия Комсомольска-на-Амуре / сост.: Б. Д. Дрозд, А. С. Семенов. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 431 с.
6. 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.
7. Димитриади, Е. М. Комплексный подход к формированию колористики городской среды / Е. М. Димитриади // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2020. – № I-2 (41). – С. 9-13.
8. Боровик, О. В. Анализ состояния сферы благоустройства в Комсомольске-на-Амуре на основании социологического опроса / О. В. Боровик, И. С. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2022. – № VIII-2 (64). – С. 100-107.
9. Публичная кадастровая карта, сайт. – URL: <http://maps.rosreestr.ru> (дата обращения: 06.06.2022). – Текст: электронный.

### **К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ МОКРИЦКОГО БОРИСА ЯКОВЛЕВИЧА**

22 ноября 2023 года исполнилось 75 лет главному научному сотруднику Управления научно-исследовательской деятельностью Комсомольского-на-Амуре государственного университета, доктору технических наук, профессору Мокрицкому Борису Яковлевичу, известному отечественному учёному в области металлорежущего инструмента и его покрытий.

Мокрицкий Борис Яковлевич родился 22 ноября 1948 года в селе Маяк Нанайского района Хабаровского края. После окончания 8-го класса переехал учиться в школу-интернат села Елабуга Хабаровского края, где обучался в 9-11-х классах. В 1966 году поступил в Комсомольский-на-Амуре вечерний институт (на дневное отделение). В 1971 году успешно закончил его и был направлен на научную стажировку в Уральский политехнический институт (г. Екатеринбург). В ходе стажировки выполнил научно-исследовательскую работу в г. Горьком ( завод коробок скоростей Горьковского автомобильного завода), в 1972 году был зачислен в аспирантуру. В ноябре 1973 года был призван в ряды Советской Армии и в октябре 1974 года демобилизован. Затем восстановился в аспирантуре и окончил её с последующей защитой кандидатской диссертации в 1978 году в Челябинском политехническом институте и вернулся в Комсомольский-на-Амуре политехнический институт. В нём работал на должностях ассистента, старшего преподавателя, доцента, заведующего кафедрой, заместителя декана, декана. В 2000 году уволился и работал на научно-производственном предприятии «Дальневосточная технология» в должностях заведующего лабораторией, главного инженера, главного конструктора, заместителя генерального директора. В 2019 году вернулся в Комсомольский-на-Амуре технический университет на должность научного сотрудника и совмещал работу с преподавательской деятельностью. В 2020 году защитил докторскую диссертацию в Иркутском национальном исследовательском техническом университете.

За время работы в университете вёл хоздоговорные научно-исследовательские работы с различными организациями (судостроительный завод г. Комсомольска-на-Амуре, авиационный завод г. Комсомольска-на-Амуре, Томский инструментальный завод, Московский автомобильный завод и т. д.). За это время выполнял работу по грантам Минобрнауки, один из грантов Российского научного фонда реализует в настоящее время. С участием Б. Я. Мокрицкого на сети железных дорог России внедрено несколько изделий, одно из них внедрено в количестве более миллиона штук.

Б. Я. Мокрицкий – автор и соавтор более 100 изобретений, более 10 монографий, 4 учебников, 9 учебных пособий. При его руководстве и научном консультировании защищено 3 кандидатские диссертации.

За разные виды деятельности Б. Я. Мокрицкий имеет диплом член-корреспондента Академии проблем качества РФ, диплом член-корреспондента Российской инженерной академии, является Заслуженным изобретателем Российской Федерации, имеет почётное звание «Заслуженный деятель науки Хабаровского края», награждён медалью выставки достижений народного хозяйства СССР.

От имени руководства ФГБОУ ВО «КнАГУ», коллег и друзей поздравляем Бориса Яковлевича Мокрицкого с 75-летием, желаем крепкого здоровья и успехов в работе.



**УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ:**  
**НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2023**

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

**Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.**

ВЛИЯНИЕ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ НА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ  
КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ С ПОЗИЦИИ МОДЕЛИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

**ЭНЕРГЕТИКА**

**Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.**

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ОБРАЗОВАНИЙ ИЗ СЛАБОИОНОИЗОВАННОЙ  
ПЛАЗМЫ В МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

**Янченко А. В., Чураков А. Е.**

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА С КАТЯЩИМСЯ  
ТОКОСЪЁМОМ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

**Шаломов В. И.**

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НОВОЙ СОВЕТСКО-ГАВАНСКОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

**Ким К. К., Иванов С. Н.**

РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ОБМОТКИ

**Рыжова Е. Л., Ким К. К., Иванов С. Н.**

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ  
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ

**Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И.**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НАГРЕВА  
ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

**Андреанов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.**

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ  
В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛОВ ЛОПАТОК ТУРБИН, НА ПРОЦЕСС РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН ОТРЫВА

**Андреанов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.**

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПРИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ  
МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАДАЧИ О ТРЕЩИНЕ

**Чепурнова Е. К., Андреанов И. К.**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛИ  
С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА СТОИМОСТЬ И КОЛИЧЕСТВО ПРОДАВАЕМЫХ УСЛУГ

**Табаров Б. Д., Одинаев З. И.**

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ

**Голоколос Д. А., Ким К. К., Иванов С. Н., Бельский К. О.**

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКРАНИРОВАННЫМ АСИНХРОННЫМ  
ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО ОПИСАНИЯ

**Горьковый М. А., Егорова В. П., Соловьев В. А., Горьковый А. И., Мельниченко М. А.**

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА



**Жбанов В. А., Абарникова Е. Б.**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СХОДСТВА ДВУХ ОБРАЗЦОВ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ

**Колесник М. Б.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ  
ГЕРМЕТИЧНОЙ ЗАДВИЖКИ В СРЕДЕ SIMINTECH

**Копытов С. М., Босхомджеев С. А.**

ВЫБОР СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МОЩНОГО СТАБИЛИТРОНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В МОДУЛЕТОРЕ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДИММИРУЕМОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

**Лепехина С. Ю., Сухоруков С. И., Давыдов Ю. А.**

КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ТРЁХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

**Лисовец А. Е., Григорьев Я. Ю.**

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

**Ворощенко В. Д., Егорова В. П., Горьковый М. А.**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА НА БАЗЕ АГЕНТНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

**Саяпина П. О., Ефремов М. А., Крупский Р. Ф., Азимов Х. Х.**

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

**Черный С. П., Охотников А. В.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТОЙ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
С ИНТЕГРАЦИЕЙ ВНУТРЕННИХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА УМНОЖЕНИЯ

**Иванов Ю. С., Горьковый М. А., Грабарь Д. М.**

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДИКТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ К СОСТАВАТЕЛЬНЫМ  
АТАКАМ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

**Черный С. П., Бузикаева А. В., Годяев А. И., Давыдов Ю. А.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНО-МАТРИЧНОГО ОПИСАНИЯ

**Х. Уламбаяр, Дмитриева Т. Л.**

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ОКАГЭ»

**Младова Т. А., Муллер Н. В., Неведомский А. Д., Младов А. С.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ  
СРЕДЫ ВЫБРОСАМИ АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

**Носков С. И.**

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТОЙ ФОРМЫ  
ВЛОЖЕННОЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

**Черный С. П., Емельянов К. А., Духнов Н. Н., Сотников И. А., Годяев А. И.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТОЙ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ



**Ким К. К., Иванов С. Н., Дружинин В. А., Шевченко Я. Е., Азимов Х. Х.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

**Одиноков В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Карпенко В. А., Петров В. В.**

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

**Саяпина П. О., Крупский Р. Ф.**

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

**Носков С. И.**

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

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ  
ТЯГОВОГО И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Челухин В. А., Васильев А. В., Абрамсон Е. В., Пъей Зон Аунг**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ЭНЕРГИИ СУТОЧНОГО ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР

**Черный С. П., Хрульков В. Н.**

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

**Табаров Б. Д., Соловьев В. А.**

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕМИСТУПЕНЧАТОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ  
МОЩНОСТИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

**Абарникова Е. Б., Кортун В. С.**

ПАРАДИГМА ЦИФРОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ХАБАРОВСКОМ КРАЕ

**Бахматов П. В., Старцев Е. А.**

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

**Андранинов И. К., Чепурнова Е. К.**

СХОДИМОСТЬ ИТЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕДУР В ЗАДАЧЕ МАКСИМИЗАЦИИ ИЗЛИШКА  
ПРОИЗВОДИТЕЛЯ ДЛЯ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ КРИВЫХ СПРОСА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

**Грабарь Д. М., Иванов Ю. С.**

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ  
НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

**Жарикова Е. П., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.**

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕКИ АМУР



**Горьковый М. А., Горьковый А. И., Мельниченко М. А., Егорова В. П.**

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА КИНЕМАТИКИ ШЕСТИОСЕВОГО  
ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕГО ТРАЕКТОРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**Младова Т. А., Муллер Н. В., Васильев А. А., Беседин М. А.**

ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ  
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА

**Стельмащук С. В., Лакеев Ю. И.**

СИСТЕМА ПОДЧИНЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ СКАЛЯРНЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ  
МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С НЕЗАВИСИМЫМ СОЕДИНЕНИЕМ  
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Лямин М. А., Черный С. П.**

СИСТЕМА СОВМЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МОТОР-КОЛЕСО  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**Табаров Б. Д., Ляпин В. В.**

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА  
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СОВМЕСТНО С БАТАРЕЯМИ КОСИНУСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

**Сапожник К. Р., Божоев И. Ч., Башков О. В.**

ВЛИЯНИЕ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА СТРУКТУРУ  
И МИКРОТВЁРДОСТЬ СТАЛИ 45

**Сарилов М. Ю., Отряскина Т. А., Курильченко М. С.**

СЖИГАНИЕ ВОДОМАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

**Мокрицкий Б. Я., Саблин П. А., Григорьев В. В., Шелковников В. Ю.**

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ТВЁРДОСПЛАВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ  
ДЛЯ ТОЧЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СТАЛЕЙ

**Джемилов Э. Ш., Джемалядинов Р. М., Курманов Р. Д., Сейдалиев Р. С.**

ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ СОТС ПРИ ОБРАБОТКЕ  
КОНИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ АЛМАЗНЫМ ХОНИНГОВАНИЕМ

**Приходченко О. В., Просолович А. А.**

РАСЧЁТ ЛОПАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Федорченко С. К., Давыдов В. М., Иванищев Ю. Г.**

ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ  
МЕТОДОМ ОБКАТЫВАНИЯ

**Тураков И. А., Янченко А. В.**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  
ТЕПЛООТДАЧИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШТАМПОВКЕ

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

**Коротеева Л. И., Медведев К. А.**

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МНОГОКОНТУРНЫХ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ



**Коротеева Л. И., Суранова О. В.**

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЗЕЛЁНЫХ НАСАЖДЕНИЙ И УРОВНЯ ОЗЕЛЕНЕНИЯ  
В КАДАСТРОВОМ КВАРТАЛЕ № 27:22:0030206 Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

**Маначенко В. А., Галкина Е. Г.**

СИНТЕЗ НАУК В ДИЗАЙНЕ КАК МЕТОД  
КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (BIM-ТЕХНОЛОГИИ)

**Гринкруг Н. В., Ефимова К. С.**

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ГОРОДСКОГО ПРОСТРАНСТВА ПОСРЕДСТВОМ  
РАЗВИТИЯ, ОРИЕНТИРОВАННОГО НА ТРАНЗИТНЫЕ СООБЩЕНИЯ

**Сохацкая Д. Г., Чусова Е. А.**

ВЛИЯНИЕ РЕНОВАЦИИ ФАСАДОВ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ  
ЗДАНИЙ НА ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

**Мельникова Е. О., Сохацкая Д. Г.**

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ УЛИЦ  
КАК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

**Лепехина С. Ю.**

РАЗВИТИЕ СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ И ПРОЕКТНОЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КНАГУ В 2022 ГОДУ

ПАМЯТИ ВИКТОРА ИВАНОВИЧА МЕРКУЛОВА

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ЕВГЕНИЯ ЛЕОНИДОВИЧА ЕРЁМИНА

К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ МОКРИЦКОГО БОРИСА ЯКОВЛЕВИЧА

# Содержание

## ЭНЕРГЕТИКА

Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НАГРЕВА  
ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ..... 4

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Андианов И. К., Чепурнова Е. К.

СХОДИМОСТЬ ИТЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕДУР В ЗАДАЧЕ  
МАКСИМИЗАЦИИ ИЗЛИШКА ПРОИЗВОДИТЕЛЯ  
ДЛЯ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ КРИВЫХ СПРОСА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ..... 12

Грабарь Д. М., Иванов Ю. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ  
ОБРАЗОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ..... 20

Жарикова Е. П., Григорьев Я.Ю., Григорьева А. Л.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕКИ АМУР ..... 28

Горьковый М. А., Горьковый А. И., Мельниченко М. А., Егорова В. П.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА КИНЕМАТИКИ ШЕСТИОСЕВОГО  
ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЕГО ТРАЕКТОРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ..... 40

Младова Т. А., Муллер Н. В., Васильев А. А., Беседин М. А.

ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ  
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА ..... 50

Стельмащук С. В., Лакеев Ю. И.

СИСТЕМА ПОДЧИНЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ СКАЛЯРНЫМ  
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С НЕЗАВИСИМЫМ СОЕДИНЕНИЕМ  
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ..... 57

Лямин М. А., Черный С. П.

СИСТЕМА СОВМЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
МОТОР-КОЛЕСО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО  
КОМПЛЕКСА ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ..... 66

Табаров Б. Д., Ляпин В. В.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА  
УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА  
ЭЛЕКТРОТЕРМической установки совместно  
с батареями косинусных конденсаторов ..... 74

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Приходченко О. В., Пресолович А. А.

РАСЧЁТ ЛОПАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ..... 81

Федорченко С. К., Давыдов В. М., Иванищев Ю. Г.

ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКИМ  
ДЕФОРМИРОВАНИЕМ МЕТОДОМ ОБКАТЫВАНИЯ ..... 89

Тураков И. А., Янченко А. В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ  
ТОКОПРОВОДЯЩИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШТАМПОВКЕ ..... 95

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Коротеева Л. И., Суранова О. В.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЗЕЛЁНЫХ НАСАЖДЕНИЙ  
И УРОВНЯ ОЗЕЛЕНЕНИЯ В КАДАСТРОВОМ КВАРТАЛЕ  
№ 27:22:0030206 Г. КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ ..... 101

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

МОКРИЦКОГО БОРИСА ЯКОВЛЕВИЧА ..... 107

## УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ:

НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2023 ..... 108

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ

2023 № VII (71)

Науки о природе и технике

Выпускающий редактор  
С. Н. Иванов

Подписано в печать 25.12.2023  
Дата выхода в свет 29.12.2023

Формат А4.

Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.

Усл. печ. л. 13,63.

Уч.-изд. л. 17,18.

Тираж 200. Заказ 31007

Отпечатано в типографии

КнАГУ

681013,

г. Комсомольск-на-Амуре,

пр. Ленина, д. 27.

