

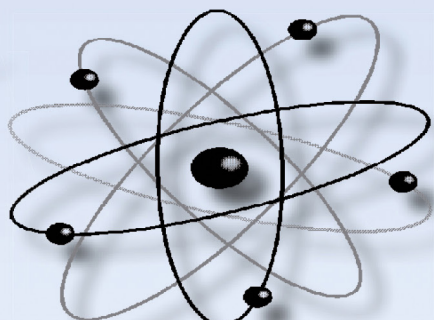
Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ III (91)

2026

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.

Отделы журнала «Управление в технических системах», «Вычислительная техника и информатика», «Машиностроение», «Культурология и искусствоведение» включены в перечень изданий ВАК РФ.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер ФС77-38212 от 30.11.2009.

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

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

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КнАГУ», находящейся на сайте <https://uzknastu.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) 528-548

Адрес редакции: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27

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:	Сергей Петрович Черный , доктор технических наук, доцент. E-mail: keparu@knastu.ru
Заместитель главного редактора журнала:	Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:	Евгения Павловна Иванкова , кандидат технических наук. E-mail: journal@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Ответственный секретарь:	Алина Валерьевна Бузикаева , кандидат технических наук. E-mail: keparu@knastu.ru
Литературный редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.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:	Татьяна Владимировна Степанова . E-mail: osnid@knastu.ru
Администратор сайта:	Никита Станиславович Шушарин . E-mail: web_dev@knastu.ru

Серия: «Науки о природе и технике»

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 Сергей Борисович Марьин , доктор технических наук, доцент. E-mail: maryinsb@mail.ru
2. Электротехнические комплексы и системы (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 в технических системах (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	Вячеслав Алексеевич Соловьев , доктор технических наук, профессор. E-mail: keparu@knastu.ru Сергей Петрович Черный , доктор технических наук, доцент. E-mail: keparu@knastu.ru Андрей Юрьевич Торгашов , доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)	Валерий Иванович Одинокоев , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: osnid@knastu.ru Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru Константин Сергеевич Бормотин , доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru
5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)	Борис Яковлевич Мокрицкий , доктор технических наук, профессор. E-mail: boris@knastu.ru Владимир Сергеевич Щетинин , доктор технических наук, доцент. E-mail: schetynin@mail.ru
6. Материаловедение и химические технологии (2.6.17 - Материаловедение)	Эдуард Анатольевич Дмитриев , доктор технических наук, профессор. E-mail: 013696@togudv.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор. E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (1.1.8 - Механика деформируемого твёрдого тела)	Анатолий Александрович Буренин , доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru Олег Евгеньевич Сысов , доктор технических наук, профессор. E-mail: sia@knastu.ru

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:	
1. Культурология и искусствоведение (5.10.1 - Теория и история культуры, искусства)	Яна Станиславовна Крыжановская , доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowsckaia.yana2012@yandex.ru Евгения Валерьевна Савелова , доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. E-mail: savelova_ev@hgiik.ru Виктория Юрьевна Прокофьева , доктор филологических наук, профессор. E-mail: nikars1999@mail.ru Илья Игоревич Докучаев , доктор философских наук, профессор. E-mail: i.dokuchaev@spbu.ru
2. Психология и педагогика (5.8.1 - Общая педагогика, история педагогики и образования)	Татьяна Евгеньевна Наливайко , доктор педагогических наук, профессор. E-mail: tenal@knastu.ru Екатерина Иосифовна Артамонова , доктор педагогических наук, профессор. E-mail: manpo@yandex.ru
3. История (5.6.1 - Отечественная история, 5.6.2 - Всеобщая история)	Жанна Валерьяновна Петрунина , доктор исторических наук, профессор. E-mail: petrunina71@bk.ru Федирко Оксана Петровна , доктор исторических наук, профессор. E-mail: fedenka.67@mail.ru

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

Содержание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Иванов С. Н., Ким К. К., Лобанов А. А.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА РЕСУРС АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ4

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Грабарь Д. М.

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОВЕДЕНИЯ ОПЕРАТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ13

Кувшинов В. В., Муровский С. П., Шевчук А. А., Гусева Е. В.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ НАДВОДНОГО СУДНА С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ21

Копытов С. М., Тимохин П. А.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ33

Фролов А. В., Кукин Д. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХХОДОВОГО ПОВОРОТНОГО КРАНА С КАНАЛОМ Т-ТИПА И ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ41

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Магола Д. С.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АГЕНТАМИ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В БИОИНСПИРИРОВАННОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ49

Носков С. И., Беляев С. В., Антипина Н. В.

УТОЧНЕНИЕ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СМЕШАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ.....57

Новиков А. Н., Зайченко И. В., Соколова В. С., Сизинцева А. С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛОВ ЛОКОМОТИВОВ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ERP-СРЕДЕ.....64

Фролов Д. О.

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ71

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Косачев К. Д., Саблин П. А., Серебrenникова А. Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА МАРКИ ВТЗ77

Джемалядинов Р. М., Абдулгасис Д. У., Моисеев Д. В., Башкова Т. И.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ШЛИФОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ82

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Старцев Е. А., Бахматов П. В.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА.....89

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Кольхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ПОСТОЯННАЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО КОДА ВСЕЛЕННОЙ.....96

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПАМЯТИ ВЕРХОТУРОВА АНАТОЛИЯ ДЕМЬЯНОВИЧА.....106

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ
ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

Иванов С. Н., Ким К. К., Лобанов А. А.
S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. A. Lobanov

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ПИТАЮЩЕГО
НАПРЯЖЕНИЯ НА РЕСУРС АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

**PROBLEM STATEMENT FOR THE STUDY OF THE INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE
DEVIATION ON THE SERVICE LIFE OF AN INDUCTION MOTOR**

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

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

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

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); 190031, Sankt-Petersburg, Moskovsky Av. 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Лобанов Анатолий Александрович – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: lobanovanatolij88@gmail.com.

Anatoly A. Lobanov – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: lobanovanatolij88@gmail.com.

Аннотация. В статье рассматривается подход к прогнозированию ресурса промышленных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при отклонении напряжений питания. Показаны установленные производителями и потребителями электроэнергии предельно допустимые диапазоны отклонений напряжения. Приведены составляющие тепловых потерь и выражения для их расчёта с учётом практических рекомендаций, используемых при проектировании асинхронных двигателей с различными системами охлаждения. Обоснован учёт отклонения напряжения на тепловое состояние витковой изоляции обмотки статора. Установлено, что определяющими параметрами при изменении напряжения являются электрические и добавочные потери.

Summary. This article examines an approach to predicting the service life of industrial squirrel-cage induction motors under varying supply voltage conditions. The maximum permissible voltage fluctuation ranges established by electricity producers and consumers are presented. The components of heat losses and expressions for their calculation are presented, taking into account practical recommendations used in the design of asynchronous motors with various cooling systems. The effect of voltage deviation on the thermal state of the stator winding insulation is substantiated. It is established that electrical and additional losses are the parameters that determine the temperature when voltage changes.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, отклонения напряжения, тепловые потери, старение изоляции, ресурс.

Key words: asynchronous motor, voltage fluctuations, heat losses, insulation aging, lifetime.

УДК 621.313

Введение. Областью применения основного документа, нормирующего показатели качества электроэнергии [1], являются системы электроснабжения общего назначения. При этом как сами показатели (отклонение частоты, прерывания, провалы, перенапряжения и импульсные напряжения, несинусоидальность и несимметрия напряжений в трёхфазных системах) в разной степени влияют на эксплуатируемое оборудование, так и приёмники электроэнергии неодинаково реагируют на изменение её параметров.

Расширение номенклатуры и диапазонов технических характеристик электрооборудования приводит к необходимости более точного учёта влияния каждого из показателей качества электроэнергии на конкретную группу потребителей. При этом вопросы обеспечения электромагнитной совместимости электрооборудования должны рассматриваться не только при номинальных значениях показателей электроэнергии, но и при длительно и предельно допустимых минимаксных величинах в различных эксплуатационных режимах. Асинхронные двигатели (АД) составляют значительную часть нагрузки промышленных сетей, поэтому оценка влияния возможных отклонений определяющих параметров электроэнергии на потребляемую ими мощность, токовые нагрузки, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, а также ресурс представляет актуальную задачу.

Постановка задачи исследования. Промышленные асинхронные двигатели в основном подключаются к электрическим сетям низкого напряжения. Стандартное номинальное напряжение электропитания 380 В (между фазными проводниками для трёх- и четырёхпроводных трёхфазных систем) или 220(230) В (между фазным и нейтральным проводниками для однофазных и четырёхпроводных трёхфазных систем). При более высоких классах напряжения вместо значения номинального напряжения электропитания в расчётах могут приниматься согласованные величины напряжения [2].

Целями работы являются оценка ресурса АД с учётом влияния медленного изменения напряжения на тепловое состояние двигателя в диапазоне, установленном в [1], и обоснованность действующих норм качества электроэнергии с точки зрения показателей надёжности АД. В соответствии с [1] в точке передачи электрической энергии положительные или отрицательные отклонения напряжения не должны превышать 10 % от номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

На рис. 1 приведены графики отклонения усреднённых в интервале времени 10 мин фазных напряжений (фазы *A*, *B*, *C* – соответственно жёлтый, зелёный, красный цвет) одной из типовых эксплуатируемых трансформаторных подстанций. Из них видно, что напряжения практически находятся в зоне предельно допустимых значений (утолщённая линия меандра).

Следует отметить, что на практике проектирующими организациями и производителями для оборудования на напряжение 380/220(230) В может устанавливаться диапазон отклонения напряжения -15...+10 % от номинального.

Теоретические основы исследования. Влияние приложенного напряжения на электромагнитный момент АД определяется известным в электромеханике выражением, которое можно получить из Т-образной схемы замещения [3]:

$$M_{эм} = \frac{3U_{\phi}^2 \cdot R_2' / s}{2\pi f_1 \cdot \left[(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}, \quad (1)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение обмотки статора; s – скольжение; R_1, X_1 – соответственно активное и индуктивное сопротивления статора; R_2', X_2' – соответственно приведённые активное и индуктивное сопротивления ротора.

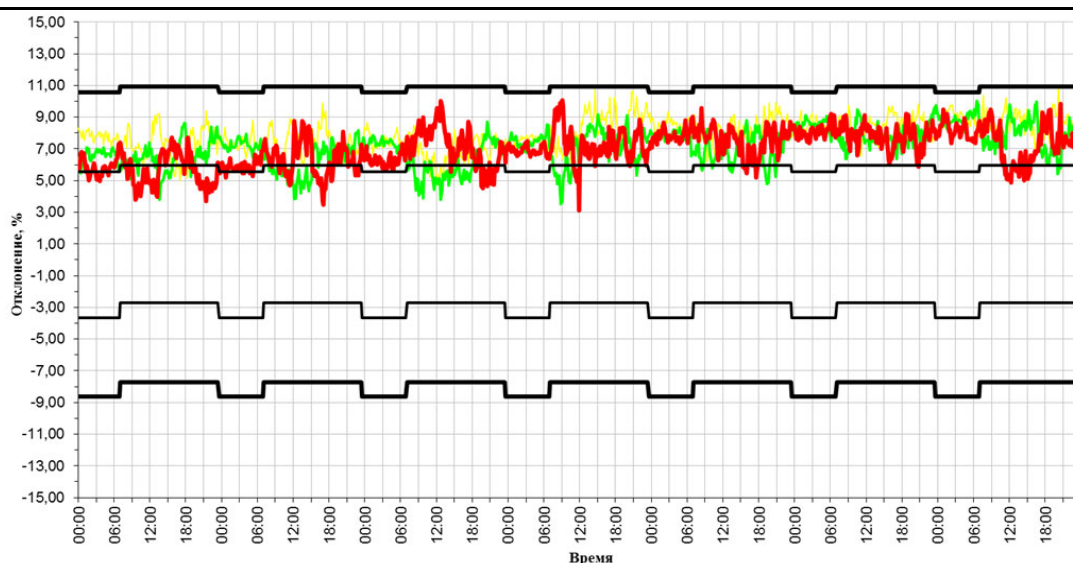


Рис. 1. Величины отклонений усреднённых фазных напряжений

Использование выражения (1) для оценки влияния отклонения напряжения на работу АД показывает, что для общепромышленных двигателей средней мощности предельное снижение напряжения, допускаемое производителем (15 %), приводит к уменьшению электромагнитного момента на 25 %. Как следствие, при неизменном моменте сопротивления это ведёт к увеличению потребляемого тока, нагреву изоляции обмоточного провода и снижению надёжности двигателя. Кроме этого, при снижении напряжения уменьшается вращающий момент, увеличивается скольжение и изменяется частота вращения ротора двигателя n :

$$n = (60f_1 / p) \cdot (1 - k_3 \cdot \frac{U^2_{\text{ном}}}{U^2} \cdot s), \quad (2)$$

где f_1 – частота питающего напряжения; p – число пар полюсов; k_3 – коэффициент нагрузки двигателя; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение.

Из формулы (2) видно, что понижение напряжения не приводит к уменьшению производительности технологического оборудования только при малых нагрузках двигателя. Если нагрузка остаётся номинальной, то это приводит к уменьшению частоты вращения и при значительном снижении напряжения двигатель может потерять «устойчивость». Снижение напряжения является причиной уменьшения пускового момента и ухудшения пусковых характеристик. При этом на зажимах двигателя реактивная мощность намагничивания уменьшается примерно на 2...3 % при снижении напряжения на 1 %, что при детерминированной мощности привода ведёт к увеличению тока статорной обмотки.

Повышение напряжения, наоборот, вызывает рост потребляемой реактивной мощности и, соответственно, приводит к снижению коэффициента мощности электромеханического преобразователя. Это в основном связано с ростом тока холостого хода, обуславливающего увеличение реактивной мощности и, как следствие, потерь активной мощности.

В целом точное определение влияния напряжения на характеристики АД представляет сложную научную задачу, что объясняет, почему на практике в основном используются выражения, аппроксимирующие экспериментальные результаты, полученные для ограниченного объёма выборки [4].

Оценка влияния отклонения питающего напряжения на надёжность двигателя предполагает установление аналитической зависимости его ресурса от эксплуатационных параметров, зависящих от величины приложенного напряжения.

Основным эксплуатационным параметром, который определяет срок службы наиболее слабого элемента двигателя – витковой изоляции обмотки статора, – является тепловое старение. Повышение температуры приводит к деструкции, заключающейся в разрушении макромолекул полимерной изоляции с разрывом основной цепи, обуславливающей появление внутренних и поверхностных дефектов [5]. На рис. 2, 3 показано изменение дефектности витковой изоляции $\Delta\lambda_v$ во времени для различных сочетаний температуры Θ , вибрации ω и влажности φ [6]. Приведённые зависимости подтверждают определяющее влияние температуры на повреждаемость изоляции обмоточного провода.

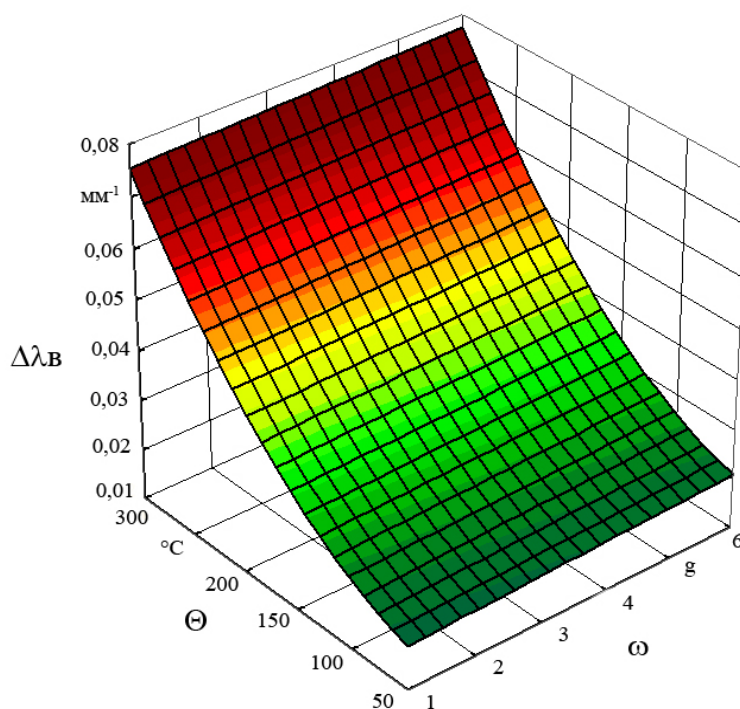


Рис. 2. Зависимость дефектности витковой изоляции от совместного действия температуры и вибрации

Теоретически различают термины «теплоустойчивость» и «нагревостойкость» изоляции. Первый термин характеризует способность электроизоляции сохранять свои свойства на определённом уровне при относительно кратковременном нагреве. Второй – способность изоляции выдерживать воздействие предельной допустимой температуры в течение установленного ресурса без значимого ухудшения характеристик. Нагревостойкость как показатель положена в основу классификации электроизоляционных материалов [7].

Разработка методов расчёта срока службы с учётом старения изоляционных материалов при воздействии повышенных температур традиционно связана с экспериментальными исследованиями. Например, так было получено уравнение Вант-Гоффа – Аррениуса, устанавливающее зависимость срока службы изоляции от температуры и в логарифмической форме имеющее вид

$$\ln T \approx \ln T_0 - k\Theta, \quad (3)$$

где T – срок службы изоляции при температуре нагрева изоляции Θ , лет; T_0 – срок службы изоляции, обусловленный периодом собственных тепловых колебаний атомов в кристаллической решётке (при $\Theta = 0$); $k \approx \ln 2 / \Delta\Theta$, здесь $\Delta\Theta$ – превышение температуры (соответственно, возрастание температуры на каждые «десять градусов» (класс изоляции В) или «двенадцать градусов» (класс изоляции Н) сокращает срок службы изоляции примерно в два раза).

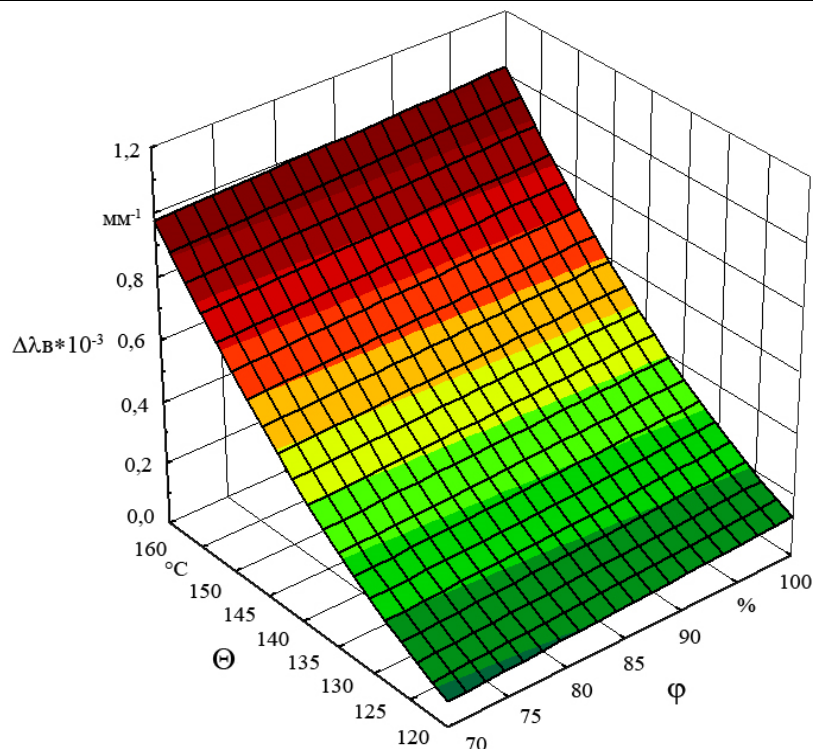


Рис. 3. Зависимость дефектности витковой изоляции от совместного действия температуры и влажности

Изменения структуры изоляции описываются кинетической теорией прочности твёрдых тел, которая рассматривает старение как термоактивационный процесс, в котором механическое напряжение σ представляет собой фактор, ускоряющий термическое разрушение, поэтому уравнение (3) можно записать в виде

$$T = T_0 e^{-(E_a - \gamma\sigma)/R\Theta},$$

где E_a – энергия активации; γ – коэффициент, учитывающий снижение энергетического барьера вследствие механических напряжений; R – универсальная газовая постоянная.

Связь скорости химической реакции в изоляции обмоточных проводов, относящейся к классу мономолекулярных, с температурой определяется выражением [7]

$$v_p = A e^{-E_a/(R\Theta)},$$

где A – постоянная материала, характеризующая эффективность взаимодействия молекул.

Обратная v_p величина пропорциональна времени перехода изоляции в предельное состояние.

Полученное экспериментально уравнение (3), показывающее, что натуральный логарифм срока службы изоляции линейно зависит от температуры, хотя и носит приближённый характер, но для небольших временных интервалов или диапазонов вариации температуры позволяет достаточно качественно оценивать её влияние. При этом очевидно, что уменьшение сопротивления изоляции и электрической прочности, снижение адгезии изолирующих плёнок в системах изоляции и ухудшение химической стойкости имеют нелинейный характер.

Поэтому при наличии эксплуатационных данных о величине T_{nom} , полученных при номинальных рабочих температурах Θ_{nom} , срок службы T_{var} при температуре Θ_{var} точнее определяется из уравнения [8]

$$T_{var} = T_{nom} e^{(E_a/R)/(\Theta_{var}^{-1} - \Theta_{nom}^{-1})}.$$

Значения энергии активации находятся из справочников или экспериментально и зависят от класса нагревостойкости (например, для класса В эта величина составляет около 8,48 Дж/моль, для Н – 12,89 Дж/моль).

В работе [9] для инженерных расчётов предложено следующее выражение определения срока службы изоляции:

$$T = T_{nom} / R_{k_3,U},$$

где $R_{k_3,U}$ – коэффициент, зависящий от коэффициента нагрузки двигателя и степени снижения напряжения:

$$R_{k_3,U} = (47\delta U^2 - 7,55\delta U + 1)k_3^2.$$

Следует отметить, что, как показывает практика эксплуатации асинхронных двигателей, отрицательные отклонения напряжения питания вследствие роста температуры обмотки статора более опасны.

Исходным выражением для определения температуры двигателя является известное уравнение теплового баланса. Для нахождения суммарных тепловыделений P_Σ , входящих в это уравнение, необходимо определить их составляющие:

$$P_\Sigma = P_{эл1} + P_M + P_{эл2} + P_{мех} + P_{доб}.$$

Для нахождения электрических потерь в статоре $P_{эл1}$ и роторе $P_{эл2}$ должны быть известны количество фаз m_1, m_2 , токи I_1, I_2 , активные сопротивления обмоток статора и ротора при рабочей температуре $r_{1/\Theta_1}, r_{2/\Theta_2}$:

$$P_{эл1} = m_1 I_1^2 r_{1/\Theta_1}; P_{эл2} = m_2 I_2^2 r_{2/\Theta_2}.$$

Более сложно и, как следствие, менее точно находятся магнитные потери, которые обычно подразделяют на основные и добавочные. Добавочные магнитные потери в статоре, в свою очередь, состоят из поверхностных потерь в слое коронок зубцов статора от пульсации индукции в воздушном зазоре и пульсационных потерь в стали зубцов:

$$P_M = P_{M.осн} + P_{M.доб} = P_{M.осн} + P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2}.$$

Общее выражение для расчёта основных потерь для АД мощностью до 250 кВт с магнитопроводом из стали 2013 приведено в [9]:

$$P_{M.осн} = p_{1,0/50} (1,8m_3 B_3^2 + 1,6m_я B_я^2) (f/50)^{1,5}, \quad (4)$$

где $p_{1,0/50}$ – удельные потери в стали; $m_3, m_я$ – соответственно масса зубцов и ярма статора; $B_3, B_я$ – соответственно индукции в зубце и в спинке статора.

Удельные потери на поверхности головок зубцов статора [9]

$$p_{пов1} = 0,5k_{техн1} (z_2 n / 10000)^{1,5} (B_{\delta 1} t_2 \cdot 10^3)^2,$$

где $k_{техн1}$ – коэффициент, учитывающий технологию изготовления сердечника статора и зависящий от мощности АД; z_2 – число зубцов ротора; $B_{\delta 1}$ – магнитная индукция с учётом пульсаций относительно статора; t_2 – зубцовое деление (отношение внешней длины окружности ротора к z_2).

Полные поверхностные потери для статора $P_{пов1}$:

$$P_{пов1} = p_{пов1}(t_1 - b_{ш1})z_1l_{ст1},$$

где $b_{ш1}$ – ширина шлица паза статора; z_1 – число зубцов статора; $l_{ст1}$ – длина пакета стали статора.

Пульсационные потери в зубцах статора:

$$P_{пул1} = 1,1 \times 10^{-7} (z_2 n B_{пул1})^2 m_{31}.$$

Амплитуда пульсаций индукции $B_{пул1}$ в среднем сечении зубцов статора:

$$B_{пул1} \approx 0,5 B_{3.ср1} (\gamma_2 \delta / t_1),$$

$$\gamma_2 = (b_{ш2} \delta)^2 / (5 + b_{ш2} / \delta).$$

Удельные потери на поверхности головок зубцов ротора $p_{пов2}$:

$$p_{пов2} = 0,5 k_{техн2} (z_1 n / 10000)^{1,5} (B_{\delta 2} t_1 \cdot 10^3)^2,$$

где $k_{техн2}$ – коэффициент, учитывающий технологию изготовления сердечника ротора; $B_{\delta 2}$ – магнитная индукция с учётом пульсаций относительно ротора; t_1 – зубцовое деление статора.

Полные поверхностные потери для ротора $P_{пов2}$:

$$P_{пов2} = p_{пов2}(t_2 - b_{ш2})z_2l_{ст2},$$

где $b_{ш2}$ – ширина шлица паза ротора; $l_{ст2}$ – длина пакета стали ротора.

Пульсационные потери в зубцах ротора $P_{пул2}$:

$$P_{пул2} = 1,1 \cdot 10^{-7} (z_1 n B_{пул2})^2 m_{32}.$$

Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов ротора $B_{пул2}$:

$$B_{пул2} \approx 0,5 B_{3.ср2} (\gamma_1 \delta / t_2),$$

$$\gamma_1 = (b_{ш1} \delta)^2 / (5 + b_{ш1} / \delta).$$

Анализ опубликованных в [10] результатов показывает, что введение в (4) и простая вариация поправочного коэффициента не обеспечивают повышения точности определения потерь. При этом авторами в этот коэффициент частично включены пульсационные поверхностные потери в стали. Сравнение магнитных потерь, рассчитанных по формуле (4) и получаемых при изменении напряжения питания экспериментально [11], показывает, что они близки только при повышении напряжения выше номинального значения, при обратном соотношении погрешность вычисления достигает 50 % [10].

Механические потери в основном зависят от скорости вращения ротора n и наружного диаметра статора D_a , и для степени защиты IP54 с радиальным охлаждением при отсутствии вентиляционных каналов могут быть найдены из выражения

$$P_{мех} \approx 0,01 k_{мех} n^2 D_a^4,$$

где $k_{мех}$ изменяется от 0,65 до 1,2.

При наличии $n_{кан}$ радиальных вентиляционных каналов, числе пар полюсов p и величине полюсного деления τ

$$P_{\text{мех}} \approx 2,4 \cdot 10^3 p \tau^3 (n_{\text{кан}} - 11).$$

В двигателях с осевой вентиляцией

$$P_{\text{мех}} \approx 0,001 k_{\text{мех}} n^2 D_a^3.$$

Коэффициент $k_{\text{мех}}$ для $p = 1$ равен 0,65; для $p = 2$ принимается 1,5.

Причины возникновения добавочных потерь $P_{\text{доб}}$ известны (наличие потоков рассеяния, пульсации индукции в воздушном зазоре, несинусоидальность и несимметрия напряжений и токов, протекание поперечных токов, замыкающихся между стержнями через листы сердечника ротора и т. п.), но их расчёт вызывает серьёзные сложности [12; 13]. Величина добавочных потерь, установленная нормативно и составляющая 0,5 % от номинальной подведённой мощности, на практике существенно отличается от этого значения и достигает 2 %, что существенно влияет на тепловое состояние электромеханического преобразователя.

При переменной нагрузке добавочные потери $P_{\text{доб}}$ пересчитываются пропорционально квадрату отношения фактического I_1 и номинального токов $I_{1\text{ном}}$ статора:

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.ном}} (I_1 / I_{1\text{ном}})^2.$$

Величина суммарных тепловых потерь P_{Σ} определяет температуру изоляции проводников обмотки статора Θ . Выражение, устанавливающее связь между ресурсом работы двигателя T и температурой обмотки с учётом (3),

$$T = T_{\text{ном}} 2^{-\Theta/\Delta\Theta}. \quad (5)$$

В уравнении (5) величина $\Delta\Theta$ зависит от класса нагревостойкости изоляции (для класса В $\Delta\Theta \approx 11$, для Н $\Delta\Theta \approx 12$).

Заключение. Приведённые выше выражения позволяют выделить отдельные составляющие потерь, которые наиболее существенно зависят от изменения величины питающего напряжения. Нахождение на их основе мощности тепловыделений является основой определения температуры изоляции обмотки статора и, соответственно, ресурса электродвигателя с учётом отклонения питающего напряжения. Установление количественной связи напряжения, тока, температуры изоляции обмотки статора с ресурсом работы двигателя требует отдельного учёта особенностей вентиляционной цепи двигателя и зависит от реализуемого способа охлаждения его элементов. При проектных расчётах в качестве определяющих зависимых параметров могут рассматриваться электрические и добавочные потери, а магнитные (для учёта влияния отрицательного отклонения напряжения от номинального значения) и механические – приниматься постоянными.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems: изд. официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: введён впервые: дата введения 2014-07-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.
2. ГОСТ 29322-2014. Напряжения стандартные = Standard voltages: изд. официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 ноября 2014 г. № 1745-ст: взамен ГОСТ 29322-92: дата введения 2015-10-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (ОАО «ВНИИС»). – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
3. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов [и др.]. – М.: Юрайт, 2011. – 767 с.



4. Фёдоров, М. М. Методы расчёта теплового состояния асинхронных двигателей при изменении напряжения сети / М. М. Фёдоров, Е. Р. Алексеев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2001. – № 3. – С. 58-62.
5. Рыжова, Е. Л. Оценка надёжности тяговых двигателей на основе состояния электрической изоляции обмотки / Е. Л. Рыжова, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 8-14.
6. Технология производства асинхронных двигателей: специальные процессы / В. Г. Костромин [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 272 с.
7. ГОСТ 8865-93. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация = Electrical insulation systems. Thermal evaluation and classification: изд. официальное: утверждён и введён в действие Постановлением Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 02 июня 1994 г. № 160: взамен ГОСТ 8865-87: дата введения 1995-01-01 / разработан Госстандартом России. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 5 с.
8. Иванов, С. Н. Надёжность асинхронных электродвигателей: учеб. пособие / С. Н. Иванов, В. В. Пыхтин. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2003. – 108 с.
9. Беспалов, А. В. Проектирование асинхронного двигателя общего назначения с короткозамкнутым ротором / А. В. Беспалов. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2012. – 154 с.
10. Анализ влияния различных факторов на рабочие характеристики асинхронного двигателя / Д. Н. Раков [и др.]. // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 10-13.
11. ГОСТ 12119.6-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения относительной магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь мостом переменного тока = Electrical steel. Methods of test for magnetic and electrical properties. Method for measurement of relative magnetic permeability and specific magnetic losses by a.c. bridge: утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 8 декабря 1998 г. № 437: введён впервые: дата введения 1999-07-01 / разработан Российской Федерацией, Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 120 «Металлопродукция из чёрных металлов и сплавов». – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – 10 с.
12. Иванкова, Е. П. Исследование электромеханического привода возвратно-поступательного движения в пакете имитационного моделирования / Е. П. Иванкова, М. Б. Колесник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 54-62.
13. Ким, К. К. Прогнозирование работоспособности удалённых изоляционных систем / К. К. Ким, С. Н. Иванов, С. И. Щетинин // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2025. – Т. 11. – № 2. – С. 219-229.

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

Грабарь Д. М.
D. M. Grabar

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОВЕДЕНИЯ ОПЕРАТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL REPRESENTATION OF A DISTRIBUTED OPERATOR BEHAVIOR CONTROL SYSTEM FOR AUTOMATING ASSEMBLY PROCESSES

Грабарь Даниил Михайлович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: grabardm@ml-dev.ru.

Daniil M. Grabar – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: grabardm@ml-dev.ru.

Аннотация. В работе представлена архитектура интеллектуальной системы мониторинга и управления коллаборативными роботизированными комплексами. Предложена формализованная модель совместного функционирования оператора и управляющего устройства на основе математического аппарата однородных марковских цепей. Введено пространство состояний, объединяющее стандартные и девиантные конфигурации системы «оператор – управляющее устройство – производственная деталь». Определена матрица переходных вероятностей с блочной структурой, позволяющая количественно оценивать риски возникновения нештатных ситуаций. Разработана концептуальная модель контроля поведения оператора, включающая этапы обнаружения визуальных параметров действий, анализа отклонений от эталонных состояний, реагирования с инициированием механизмов безопасности и коррекции траекторий. Представлена распределённая архитектура системы мониторинга, интегрирующая мультикамерную систему на базе Intel RealSense, внешние вычислительные модули Jetson для детектирования ключевых точек и распознавания объектов, аналитическую систему для реализации марковской модели и контроллер управляющего устройства. Описана структурно-функциональная организация компонентов, формирующая замкнутый контур управления автоматизированным процессом сборки с непрерывной верификацией исполнения траекторий.

Summary. The paper develops an intelligent monitoring and control system architecture for collaborative robotic complexes. A formalized model of joint operator and control device functioning based on homogeneous Markov chains mathematical apparatus is proposed. A state space combining standard and deviant configurations of the «operator – control device – production part» system is introduced. A transition probability matrix with block structure enabling quantitative assessment of abnormal situation risks is defined. A behavior control conceptual model comprising detection of visual action parameters, analysis of deviations from reference states, response with safety mechanism initiation, and trajectory correction stages is developed. A distributed monitoring system architecture integrating a multi-camera system based on Intel RealSense, external Jetson computing modules for key-point detection and object recognition, a central server for Markov model implementation, and a control device controller is presented. The structural-functional organization of components forming a closed-loop control of the automated assembly process with continuous trajectory execution verification is described.

Ключевые слова: марковские цепи, девиантное поведение, компьютерное зрение, АСУТП, управляющее устройство.

Key words: Markov chains, deviant behavior, computer vision, automated control systems, control device.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-21-00292).

УДК 007.51

Введение. Автоматизация технологических процессов сборки с использованием коллаборативных роботизированных комплексов является актуальной задачей современного производства [1]. Совместная работа оператора и управляющего устройства в едином рабочем пространстве

позволяет объединить адаптивность человека с производительностью автоматизированных систем (АСУТП) [2; 3], однако стохастический характер поведения оператора приводит к возникновению девиантных ситуаций, отклоняющихся от технологических норм и создающих риски остановки производственного процесса [4].

Существующие подходы к обеспечению безопасности носят преимущественно реактивный характер: управляющие устройства реагируют на уже возникшую опасную ситуацию путём экстренной остановки, что приводит к простоям и снижению производительности АСУТП сборки [5]. При этом отсутствует формализованное описание поведения оператора, позволяющее прогнозировать вероятность возникновения девиантных состояний и осуществлять превентивное планирование траекторий.

В связи с этим актуальной научной задачей является разработка формализованной модели совместного функционирования оператора и управляющего устройства в рамках АСУТП сборки, обеспечивающей переход от реактивных к превентивным стратегиям управления. Необходимо создать математический аппарат для количественного описания переходов между стандартными и девиантными состояниями технологического процесса, позволяющий прогнозировать риски возникновения нештатных ситуаций и синтезировать алгоритмы адаптивного планирования траекторий управляющего устройства. Научная значимость исследования определяется формированием структурно-функциональной модели интеллектуальных АСУТП, объединяющей стохастическое моделирование поведения человека, методы компьютерного зрения и многоуровневые алгоритмы принятия решений в единую архитектуру мониторинга и управления автоматизированным процессом сборки.

Постановка задачи. Для обеспечения безопасного взаимодействия оператора и коллаборативного роботизированного комплекса (далее устройство управления, УУ) в рамках АСУТП сборки необходимо разработать архитектуру интеллектуальной системы мониторинга и управления, обеспечивающую превентивное планирование траекторий движения манипулятора на основе прогнозирования девиантного поведения оператора.

Представим поведение оператора в процессе АСУТП как дискретную стохастическую структуру [6], описываемую однородной марковской цепью в пространстве состояний s . Каждое состояние s отражает одновременно четыре аспекта совместной работы человека и управляющего устройства: зону расположения оператора r_h ; тип действия оператора a_h ; режим управляющего устройства a_r ; состояние производственной детали o . Состояние системы будем описывать кортежем $s = (r_h, a_h, a_r, o)$.

Обозначим $\mathbb{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ как множество стандартных состояний, представляющих собой все допустимые комбинации (r_h, a_h, a_r, o) , которые соответствуют штатному выполнению технологического процесса сборки. Девиантные состояния представим как $\mathbb{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, описывающие нештатные (отклоняющиеся) ситуации (r_h, a_h, a_r, o) , которые не соответствуют регламенту технологического процесса и могут привести к остановке АСУ или созданию потенциально опасных ситуаций взаимодействия оператора с УУ. Полное пространство состояний представляется в виде $\mathbb{X} = \mathbb{S} \cup \mathbb{D}$.

Рассмотрим дискретное время $t = 0, 1, 2, \dots$. Обозначим через X_t состояние системы «оператор – управляющее устройство – производственная деталь» в момент времени t . Тогда $X_t \in \mathbb{X}, t = 0, 1, 2, \dots$ называется конечным марковским процессом на множестве \mathbb{X} :

$$\mathbb{P}(X_{t+1} = x | X_t = x_t, X_{t-1}, \dots, X_0) = \mathbb{P}(X_{t+1} = x | X_t = x_t).$$

Пространство состояний представим в виде $\mathbb{X} = \{s_1, \dots, s_n, d_1, \dots, d_m\}$, где s_i – стандартное состояние, d_j – девиантные состояния.

В отличие от вероятностного описания, в рамках принципа ситуационного управления марковская модель используется как механизм формализованного описания переходов между ситуациями с целью синтеза последовательности управляющих решений, обеспечивающих перевод си-

стемы из текущего состояния X_t в целевое множество допустимых состояний $S_{target} \subseteq \{s_1, \dots, s_n\}$.

Матрица переходных вероятностей имеет блочную структуру:

$$P = \begin{pmatrix} P_{SS} & P_{SD} \\ P_{DS} & P_{DD} \end{pmatrix},$$

где P_{SS} соответствует переходам из стандартных состояний в стандартные, P_{SD} – переходам из стандартных состояний в девиантные, P_{DS} – переходам из девиантных состояний в стандартные, а P_{DD} – переходам между девиантными состояниями.

Концептуальная модель контроля поведения оператора в АСУТП. В соответствии с описанным выше формальным математическим аппаратом марковских цепей предлагается концептуальная модель контроля поведения оператора, основанная на четырёх взаимосвязанных этапах: 1) обнаружении [7]; 2) анализе [8]; 3) реагировании [9]; 4) коррекции [10].

Архитектура взаимодействия в рамках АСУТП сборки представлена на диаграмме кооперации (см. рис. 1 и табл. 1).

Совокупность действий оператора, как показывают ранее выполненные исследования [11–12], должна интерпретироваться в терминах стандартного и девиантного поведения относительно регламентированной последовательности технологических операций, причём механизмом детектирования внешних проявлений активности выступают методы компьютерного зрения [7].

Использование нескольких камер обусловлено необходимостью получения полной информации о рабочем пространстве автоматизированной ячейки и устранения окклюзий при наблюдении за оператором в процессе выполнения технологических операций [8]. Однако передача видеопотока в центральный вычислительный узел создаёт чрезмерную нагрузку на сетевую инфраструктуру АСУТП, что требует внедрения промежуточного вычислительного модуля [13]. Внешний модуль осуществляет первичную цифровую обработку данных: детектирование ключевых точек скелета человека, распознавание производственных деталей и инструментов, выделение информативных признаков для определения компонент состояния r_h, a_h, o , формирование пространственных параметров и структурирование сигнала в формат, пригодный для последующего анализа в контексте марковской модели. Тем самым обеспечиваются распределение вычислительной нагрузки и повышение отказоустойчивости автоматизированной системы мониторинга.

Полученные структурированные данные поступают в аналитическую систему АСУТП. В данном модуле осуществляется интерпретация действий оператора в контексте технологического процесса: сопоставление наблюдаемой активности с формально определёнными множествами стандартных S и девиантных D состояний, оценка соответствия действий технологической и пространственной логике регламента, вычисление вероятностей перехода в нештатные ситуации на основе текущего состояния X_t и матрицы P , а также построение решения относительно дальнейшего функционирования коллаборативного роботизированного комплекса. Для выполнения этих функций аналитическая система обращается к базе знаний, содержащей структурированные описания типичных технологических ситуаций, эталонных образцов поведения в рамках сборочных операций и параметры адаптивной марковской модели.

Аналитическая система также интегрирует информацию, полученную от датчиков управляющего устройства: текущее положение звеньев манипулятора, усилия в сочленениях, скорости перемещения. Наличие этих данных позволяет формировать полное описание состояния $s = (r_h, a_h, a_r, o)$ и обеспечивать согласованность оценки поведения оператора с текущей конфигурацией УУ в рамках выполняемой технологической операции сборки.

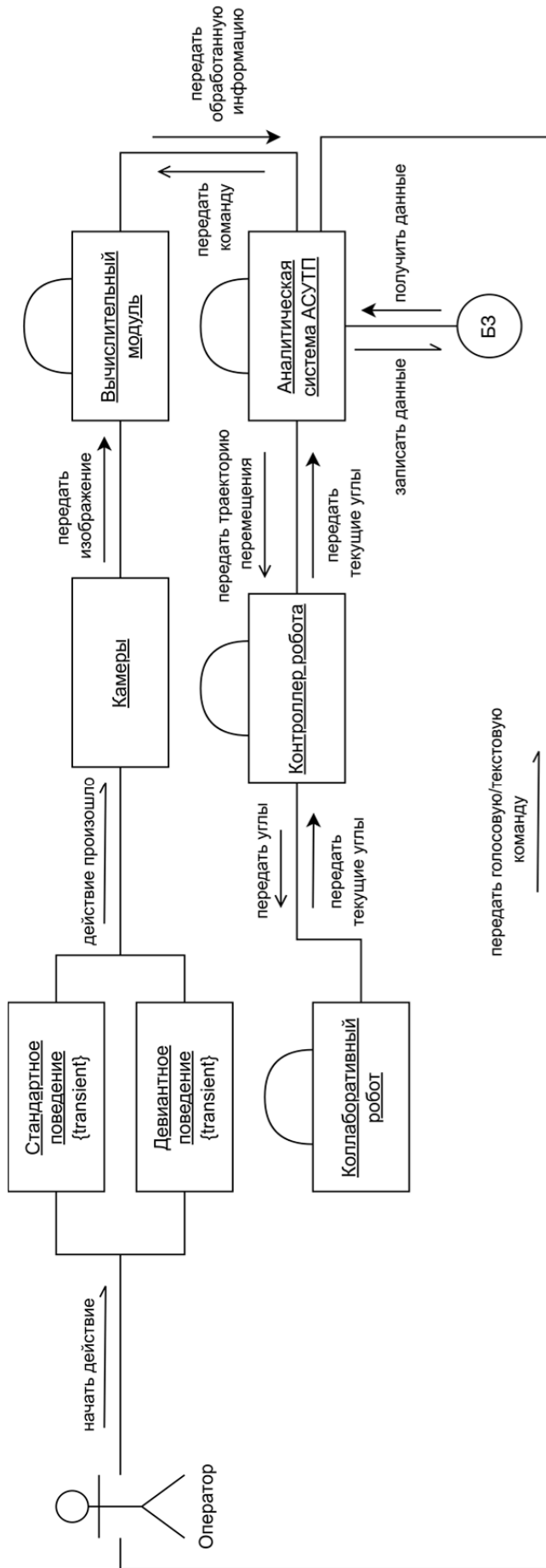


Рис. 1. Функциональная схема кооперации системы контроля поведения оператора в АСУТП

Функциональные компоненты архитектуры системы контроля поведения в АСУТП

Компонент	Функциональное назначение	Роль	Интеграция с технологическим процессом
Оператор	Источник стохастически возникающей активности в рабочей зоне автоматизированной сборки	Иницирует переходы между состояниями $X_t \rightarrow X_{t+1}$	Выполняет технологические операции совместно с УУ
Мультикамерная система	Непрерывная фиксация положения оператора, движений и состояния производственных деталей	Наблюдение компонент r_h, a_h, o	Мониторинг соблюдения пространственных норм технологического процесса
Внешний вычислительный модуль	Первичная обработка видеопотока, детектирование ключевых точек и объектов	Извлечение признаков для определения текущего состояния s_t	Формирование структурированных данных о параметрах сборочных операций
Аналитическая система АСУТП	Классификация состояний, вычисление вероятностей переходов, формирование управляющих решений	Реализация марковской модели: оценка состояний \mathcal{S} , анализ матрицы P , идентификация переходов $s_i \rightarrow d_i$	Центральный узел управления автоматизированным процессом сборки
База знаний	Хранилище эталонных состояний \mathcal{S} , матрицы P , технологических регламентов	Предоставление параметров модели для анализа и прогнозирования	Обеспечение соответствия действий технологическим картам сборки
Контроллер УУ	Преобразование управляющих решений в кинематические параметры манипулятора	Реализация управления УУ и стратегии реагирования, полученного с аналитической системы	Исполнительное устройство технологических операций сборки
Управляющее устройство	Выполнение траекторий движения с учётом безопасности взаимодействия	Физическая реализация управления конечным устройством	Автоматизированное выполнение сборочных операций

Результатом аналитической обработки является формирование управляющего воздействия, определяющего коррекцию траектории движения управляющего устройства. Сформированная стратегия передаётся на контроллер, который осуществляет вычисление уставок для контуров регулирования приводов манипулятора и формирует управляющие сигналы исполнительным механизмам. Исполнительный уровень системы представлен звеньями манипулятора и их приводами. Данные внутренних датчиков положения, скорости и усилий используются для формирования обратной связи и передаются в аналитический модуль для уточнения текущего состояния системы.

Функциональная модель распределённой системы мониторинга. Представленная на рис. 2 архитектура отражает распределённую систему мониторинга автоматизированного технологического процесса сборки, включающую четыре уровня аппаратных модулей: мультикамерную систему, внешние вычислительные устройства, аналитический модуль АСУТП и контроллер промышленного УУ. Каждый из блоков выполняет строго определённую функцию в рамках реализации концептуальной модели, обеспечивая полный цикл сбора, предварительной обработки, логирования и передачи данных для последующего анализа состояний марковской цепи и реагирования на девиантное поведение в АСУТП.

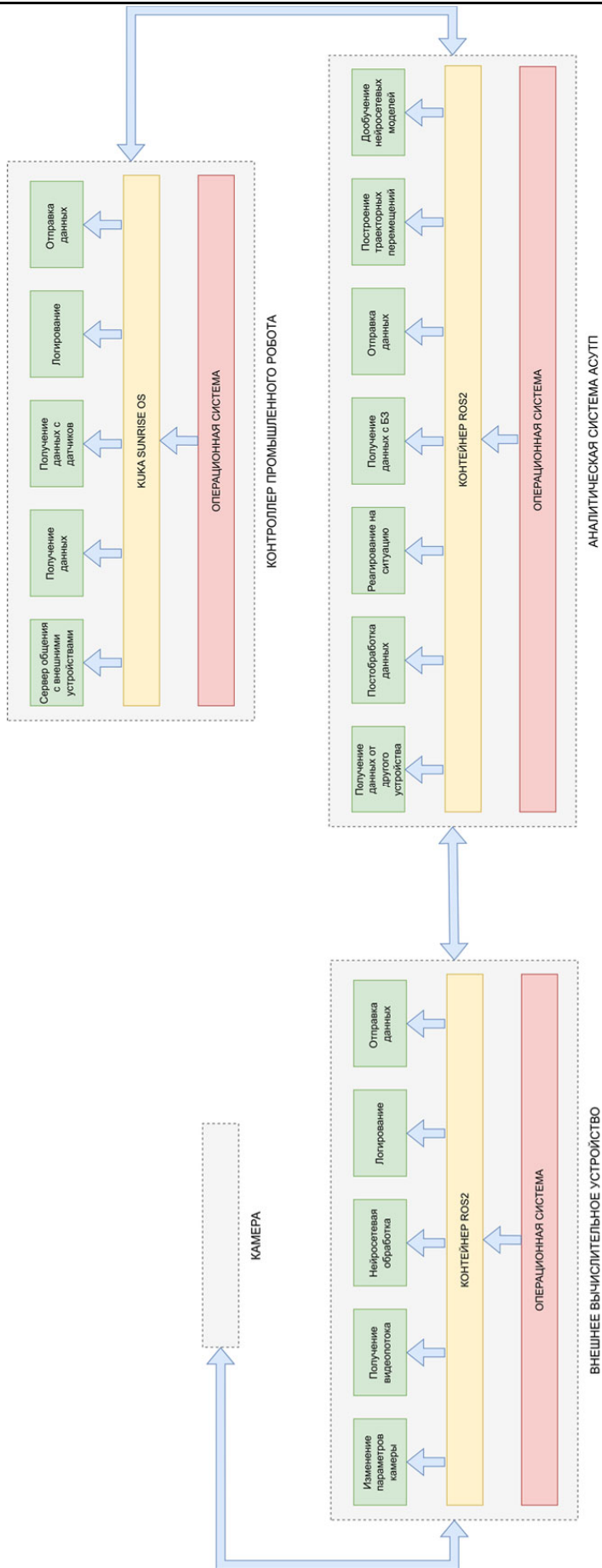


Рис. 2. Функциональная схема распределённой системы мониторинга АСУТП

Камеры Intel RealSense являются закрытыми устройствами, не допускающими установки стороннего программного обеспечения. Доступные операции ограничены стандартным API производителя: изменение параметров съёмки (разрешение, частота кадров, экспозиция), получение RGB-видеопотока и данных глубины (карты глубины, облака точек). Это определяет необходимость вынесения всей интеллектуальной обработки для извлечения признаков состояний марковской модели на внешние вычислительные модули.

В табл. 2 представлено описание функциональной структуры всех компонентов распределённой системы мониторинга в контексте автоматизированного технологического процесса.

Внешний вычислительный модуль является первичным звеном обработки визуальной информации о состоянии технологического процесса. На каждом Jetson-устройстве выполняется специализированная нейросетевая модель, соответствующая функциональному назначению конкретной камеры в системе мониторинга: детектирование позы оператора для определения r_h, a_h , распознавание производственных деталей для определения o , контроль положения рук при выполнении сборочных операций.

Таблица 2

Функциональная структура компонентов системы мониторинга АСУТП сборки

Компонент	Системный уровень	Промежуточный уровень	Прикладной уровень	Роль в АСУТП
Внешнее вычислительное устройство	Ubuntu 22.04	ROS2 Humble	– Управление камерой; – получение RGB-D потока; – детектирование поз/объектов; – передача данных	Первичная обработка визуальных данных для определения r_h, a_h, o
Аналитическая подсистема АСУТП	Ubuntu 22.04	ROS2 Jazzy	– Агрегация данных; – реконструкция сцены; – планирование движений; – классификация действий оператора; – вычисление текущего состояния	Центральный узел управления автоматизированным процессом сборки
Контроллер УУ	Windows 7	KUKA Sunrise OS	– Связь с аналитической системой; – приём команд; – сбор телеметрии a_r ; – передача данных	Исполнение технологических операций сборки

Аналитическая подсистема АСУТП выполняет идентификацию текущего состояния объекта управления, прогнозирование вероятности перехода в девиантные состояния и синтез корректирующих управляющих воздействий.

Выводы. В работе сформировано структурно-функциональное представление распределённой системы ситуационного управления технологическим процессом сборки при совместной работе оператора и управляющего устройства. Предложена формализованная модель совместного функционирования системы «оператор – управляющее устройство – производственная деталь» в виде конечной марковской цепи с расширенным пространством стандартных и девиантных состояний.

Разработан подход к синтезу корректирующих управляющих воздействий на основе оценки вероятностей переходов между состояниями, что обеспечивает возможность прогнозирования возникновения нештатных ситуаций и реализации превентивной корректировки траекторий движения манипулятора. Тем самым обоснована возможность перехода от реактивных алгоритмов останова к многошаговой стратегии ситуационного управления в замкнутом контуре АСУТП.

Предложенная структурная организация распределённой системы обеспечивает интеграцию измерительных подсистем, вычислительного модуля верхнего уровня и исполнительных мехатронных модулей, формируя иерархическую архитектуру автоматизированного управления технологической ячейкой с непрерывной идентификацией текущего состояния и адаптивной корректировкой параметров движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чикрин, Д. Е. Обзор коллаборативных робототехнических систем и юридико-системные аспекты взаимодействия с ними / Д. Е. Чикрин, К. Р. Смольникова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 233.
2. Доронин, А. М. Человеко-машинное взаимодействие и его показатели / А. М. Доронин, Д. А. Романов, М. Л. Романова // Вестник Адыгейского государственного университета. – 2005. – № 4. – С. 244-250.
3. Формализация рабочего пространства и онтология технологического процесса для выполнения технологических работ коллаборативной робототехнической ячейкой / М. А. Шереужев, Л. А. Пак, П. Д. Карасев, А. О. Винокуров // Известия КБНЦ РАН. – 2022. – № 6. – С. 110.
4. Южакова, Н. А. Диагностика поведенческих характеристик сотрудников, склонных к оппортунистическому поведению / Н. А. Южакова // Финансы и управление. – 2025. – № 3. – С. 1-22.
5. Кириллов, Н. А. Безопасность промышленных роботов и автоматизированных линий: техногенные риски / Н. А. Кириллов, В. Е. Дудоров // Научный Лидер. – 2025. – № 48. – С. 249.
6. Zacharaki, A.; Kostavelis, I.; Dokas, I. Decision Making with STPA through Markov Decision Process, a Theoretic Framework for Safe Human-Robot Collaboration. Appl. Sci., 2021, 11, 5212. – P. 1-20.
7. Грабарь, Д. М. Гибридный подход к распознаванию действий человека-оператора в коллаборативных роботизированных средах с использованием больших языковых моделей и компьютерного зрения / Д. М. Грабарь, Ю. С. Иванов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2025. – № 15. – С. 62-64.
8. Zhiganov, S. V.; Ivanov, Y. S.; Grabar, D. M. Investigation of Neural Network Algorithms for Human Movement Prediction Based on LSTM and Transformers. Doklady Mathematics, 2023, 108 (S2). – P. S484-S493.
9. Ворощенко, В. Д. Интеллектуальный модуль оптимизации и управления эффективностью производственного процесса на базе агентной имитационной модели / В. Д. Ворощенко, В. П. Егорова, М. А. Горькавый // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 85-93.
10. Автоматизация выбора метода интерполяции при планировании движения коллаборативного робота в технологических операциях механической обработки / М. А. Горькавый, М. А. Мельниченко, В. А. Соловьев, А. И. Горькавый // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – № 3. – С. 96-105.
11. Saleem, Z.; Gustafsson, F.; Furey, E. et al. A review of external sensors for human detection in a human robot collaborative environment. J Intell Manuf, 2025, 36. – P. 2255-2279.
12. Gollwitzer, A.; Martel, C.; Heinecke, A.; Bargh, J. A. Deviancy Aversion and Social Norms. Personality & social psychology bulletin, 2024, 50 (4). – P. 516-532.
13. Грабарь, Д. М. Комбинированный подход к классификации и семантической сегментации производственных инструментов с использованием метода One-Shot Learning / Д. М. Грабарь, С. В. Жиганов, Ю. С. Иванов // Вычислительные технологии и прикладная математика: материалы III науч. конф. с междунар. участием, Комсомольск-на-Амуре, 07-11 октября 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2024. – С. 119-122.

Кувшинов В. В., Муровский С. П., Шевчук А. А., Гусева Е. В.
АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ НАДВОДНОГО СУДНА
С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

Кувшинов В. В., Муровский С. П., Шевчук А. А., Гусева Е. В.
V. V. Kuvshinov, S. P. Murovsky, A. A. Shevchuk, E. V. Guseva

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ НАДВОДНОГО СУДНА С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

ADAPTIVE CONTROL OF SURFACE VESSEL SPEED TO OPTIMIZE TRAJECTORY

Кувшинов Владимир Владиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников энергии» Института ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета (Россия, Севастополь). E-mail: kuvshinov.vladimir@gmail.com.

Vladimir V. Kuvshinov – PhD in Engineering, Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Energy Sources Department, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University (Russia, Sevastopol). E-mail: kuvshinov.vladimir@gmail.com.

Муровский Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные, телекоммуникационные и электротехнические системы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: murovski@inbox.ru.

Sergey P. Murovsky – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Engineering, Automated, Telecommunication and Electrical Systems Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: murovski@inbox.ru.

Шевчук Андрей Андреевич – аспирант кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников энергии» Института ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета (Россия, Севастополь). E-mail: AndreiLuck11@yandex.ru.

Andrey A. Shevchuk – Postgraduate Student, Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Energy Sources Department, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University (Russia, Sevastopol). E-mail: andreiLuck11@yandex.ru.

Гусева Елена Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Судовое электрооборудование» Севастопольского государственного университета (Россия, Севастополь).

Elena V. Guseva – PhD in Engineering, Associate Professor, Ship Electrical Equipment Department, Sevastopol State University (Russia, Sevastopol).

Аннотация. В статье представлен алгоритм адаптивного управления скоростью надводного судна с гибридной энергетической установкой, направленный на предотвращение критического разряда батареи в условиях неопределённых внешних возмущений. Предложенный регулятор заданной скорости на основе сигмоидной функции обеспечивает плавную адаптацию скорости движения в зависимости от текущего уровня заряда батареи, формируя барьерную функцию при приближении к критическому порогу. В отличие от оптимизационных методов (МРС) предложенный подход не требует вычислительно затратных процедур прогнозирования траектории и решения задач квадратичного программирования в реальном времени. Для верификации алгоритма разработана имитационная среда на основе уравнений Фоссена (3-DOF) с явным представлением матриц инерции, кориолисовых сил и гидродинамического демпфирования. Учтены эффекты снижения тяги по мощности инвертора (зависимость мощности привода от тяги по закону $P \sim |T|^{1,5}$), стохастические возмущения среды (процесс Орнштейна – Уленбека) и реалистичные задержки сенсоров (GPS: 2 Гц, 0,6 с задержки; IMU: 20 Гц, 0,05 с задержки). Валидация методом Монте-Карло ($N = 30$ независимых запусков) демонстрирует статистически значимое улучшение минимального уровня заряда батареи на 19,8 п.п. ($36,4 \pm 3,2$ % против $16,6 \pm 12,1$ % для базового метода с постоянной скоростью, $p < 0,001$ по критерию Уэлча), снижение удельного энергопотребления на 38 % и улучшение навигационной точности на 86 %. Результаты подтверждают практическую применимость предложенного алгоритма для обеспечения энергетической безопасности надводного судна при выполнении длительных автономных миссий.

Summary. This paper presents a method for adaptive speed control of surface vessel (SV) with a hybrid power plant, aimed at preventing critical battery discharge under conditions of uncertain external disturbances. The pro-

posed speed reference regulator based on a sigmoid function ensures smooth speed adaptation depending on the current battery charge level, forming a barrier function as the critical threshold is approached. Unlike optimization methods (MPC), the proposed approach does not require computationally expensive trajectory prediction procedures and real-time quadratic programming solvers. The mathematical model of the vessel is constructed based on Fossen's equations (3-DOF) with explicit representation of inertia matrices, Coriolis forces, and hydrodynamic damping. The effects of thrust de-rating due to inverter power limitations (drive power dependence on thrust according to law), stochastic environmental disturbances (Ornstein-Uhlenbeck process), and realistic sensor delays (GPS: 2 Hz, 0,6 s delay; IMU: 20 Hz, 0,05 s delay) are considered. Monte Carlo validation (independent runs) demonstrates statistically significant improvement in minimum battery charge level by 19,8 percentage points ($36,4 \pm 3,2$ % versus $16,6 \pm 12,1$ % for the baseline constant-speed method, by Welch's criterion), reduction in specific energy consumption by 38 %, and improvement in navigation accuracy by 86 %. The results confirm the practical applicability of the proposed method for ensuring energy security of USVs during extended autonomous missions.

Ключевые слова: надводное судно, гибридная энергетическая установка, адаптивное управление, предотвращение отключения, топливный элемент, управление траекторией.

Key words: unmanned surface vessel, hybrid power plant, adaptive control, blackout prevention, fuel cell, trajectory control.

УДК 681.5.01:629.1

Введение. Надводные суда (НС) с дистанционным управлением получают всё более широкое распространение в задачах мониторинга акваторий, научных исследований и обеспечения морской логистики. Одним из ключевых ограничений автономности НС является конечный запас энергии на борту, особенно критичный для судов с электрической тягой. Гибридные энергетические установки, сочетающие источник постоянной мощности (батарея топливных элементов, дизель-генератор) и буферную аккумуляторную батарею, представляют перспективное решение, обеспечивающее баланс между продолжительностью миссии и пиковой мощностью [1].

В представленной работе описана система автоматического управления автономного судна с водородной электроэнергетической установкой, основными генерирующими системами которой являются водородные топливные элементы. Электрическая схема питания основного и вспомогательного оборудования включает в себя инвертор, буферную литий-ионную аккумуляторную батарею (АКБ), зарядные устройства, электродвигатели, а также непосредственно электрогенерирующую батарею топливных элементов с системой хранения водорода и установку дегидрирования [2]. Представленный в работе метод адаптивного управления скоростью НС направлен на предотвращение критического разряда аккумуляторной батареи в условиях неопределённых внешних возмущений и, как следствие, повышение надёжности работы всей энергетической системы.

Существующие подходы к управлению скоростью НС преимущественно фокусируются на следовании заданной траектории с минимизацией ошибки позиционирования [3–5], в то время как энергетические ограничения учитываются лишь косвенно через штрафные функции в задачах оптимального управления. Методы MPC (предиктивное управление на основе модели) демонстрируют высокую эффективность в задачах энергоменеджмента, однако требуют значительных вычислительных ресурсов для решения задач квадратичного программирования на каждом шаге управления, что ограничивает их применение на встраиваемых системах НС.

Альтернативный подход основан на реактивных методах управления, адаптирующих параметры движения в зависимости от текущего состояния энергосистемы без явного прогнозирования [5]. В работе [6] предложен метод динамического ограничения скорости для наземных роботов, однако применение подобных подходов для морских объектов осложнено необходимостью учёта гидродинамики и внешних возмущений.

Моделирование динамики движения морских судов традиционно основывается на уравнениях Фоссена [7], обеспечивающих физически обоснованное описание инерционных, кориолисовых и демпфирующих эффектов. Для реалистичного моделирования внешних возмущений (ветер, течение, волнение) широко применяются стохастические процессы, в

частности процесс Орнштейна – Уленбека [8], обеспечивающий корреляцию возмущающих воздействий во времени.

Системы управления движением НС должны учитывать эффекты задержек и шумов измерительных систем [9]. GPS-приёмники обеспечивают абсолютное позиционирование с частотой 1-10 Гц и задержками 0,1-1 с, инерциальные измерительные блоки предоставляют данные об угловой ориентации с существенно более высокой частотой, но подвержены дрейфу и шумам.

Целями исследования являются разработка и моделирование вычислительно эффективного метода адаптивного управления скоростью НС с гибридной энергоустановкой, обеспечивающего предотвращение критического разряда аккумуляторной батареи при сохранении приемлемого качества следования траектории в условиях стохастических возмущений и задержек измерений.

Постановка задачи. В ходе работы была использована роботизированная морская платформа с энергетической установкой на водородных топливных элементах (ВТЭ). Её математическое описание служит тестовой средой для верификации предложенного алгоритма управления, а не является самостоятельным результатом исследования. Данная платформа является экспериментальным водным транспортным средством с экологически чистой безопасной энергетической установкой нового поколения на водородных топливных элементах. В отличие от других энергетических установок, работающих на ВТЭ, принцип работы этой системы основывается на преобразовании химической энергии водорода в топливном элементе, полученного в процессе дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода (метилциклогексана) непосредственно на борту судна. Роботизированная платформа с дистанционным управлением может использоваться как рабочий или туристический морской транспорт, для мониторинга окружающей среды, а также для других целей. Дистанционное управление позволяет использовать её в автономном режиме с системой управления по каналам спутниковой навигации, мобильным каналам связи и видеоконтролем в реальных водных условиях.

Энергетическая установка платформы предназначена для электроснабжения всей судовой системы. В систему входят два электродвигателя для вращения гребных винтов судна, компьютерное оборудование и информационные блоки, водородная установка дегидрирования, необходимое оборудование для навигации судна и др. Электропитание оборудования осуществляется от буферной литий-ионной АКБ непосредственно или через блок инверторной подсистемы преобразователей, предназначенный для сопряжения режимов питания первичных и вторичных источников тока; автоматическая основная подзарядка АКБ осуществляется через зарядное устройство и инвертор от водородной энергоустановки, состоящей из батареи ВТЭ и дегидрататора, предназначенного для каталитического дегидрирования органического носителя с получением газообразного водорода. Весь газообразный водород, который образуется в процессе дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода, находящегося в хранилище на борту судна, полностью перерабатывается в ВТЭ без промежуточного хранения. Номинальное напряжение, вырабатываемое топливными элементами, составляет от 48 до 60 В и подаётся на блок инверторной подсистемы преобразователей, от которого ток подаётся на зарядку буферной АКБ. Наличие инвертора и буферной АКБ позволяет иметь выходные характеристики ВТЭ с некоторыми отклонениями по напряжению и мощности [2]. Метод адаптивного управления скоростью судна направлен на предотвращение критического разряда батареи в условиях неопределённых внешних возмущений.

Далее рассмотрим динамику адаптивного управления скоростью судна предложенными алгоритмами управления.

Имитационная среда для верификации алгоритма управления. Динамика НС описывается уравнениями Фоссена в трёх степенях свободы (продольное движение, поперечное движение, рыскание).

Кинематика:

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi;$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi;$$

$$\dot{\psi} = r,$$

где (x, y) – координаты судна в инерциальной системе отсчёта; ψ – курсовой угол; u – продольная скорость; v – поперечная скорость; r – угловая скорость рыскания.

Динамика:

$$M\dot{v} = \tau - C(v)v - D(v)v,$$

где M – матрица инерции (включая присоединённые массы); $\dot{v} = [\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}]^T$ – вектор линейных и угловых ускорений в связанной системе координат; $\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_r]^T$ – вектор управляющих сил и момента; $C(v)$ – матрица кориолисовых и центробежных сил; $v = [u, v, r]^T$ – вектор скоростей в связанной системе координат; $D(v)$ – матрица гидродинамического демпфирования.

Матрицы имеют вид

$$M = \text{diag}(m - X_{\dot{u}}, m - Y_{\dot{v}}, I_z - N_{\dot{r}});$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(m - Y_{\dot{v}})v \\ 0 & 0 & (m - X_{\dot{u}})u \\ (m - Y_{\dot{v}})v & -(m - X_{\dot{u}})u & 0 \end{bmatrix};$$

$$D(v) = \text{diag}(X_u + X_{uu}|u|, Y_v + Y_{vv}|v|, N_r + N_{rr}|r|),$$

где m – масса судна; I_z – момент инерции относительно вертикальной оси; $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$ – коэффициенты присоединённых масс; $X_u, X_{uu}, Y_v, Y_{vv}, N_r, N_{rr}$ – коэффициенты линейного и квадратичного демпфирования.

Модель движительно-энергетического комплекса. Тяговое усилие ограничено как механическим пределом T_{\max} , так и максимальной электрической мощностью инвертора P_{\max} . Зависимость мощности привода от тяги описывается степенным законом [10]:

$$P_{\text{shaft}} = K_{\text{prop}} |T|^{1.5};$$

$$P_{\text{motor}} = P_{\text{idle}} + \frac{P_{\text{shaft}}}{\eta_{\text{motor}}},$$

где K_{prop} – коэффициент движителя; P_{idle} – мощность холостого хода инверторной электроники, η_{motor} – КПД электродвигателя.

При превышении мощностного ограничения реализуемая тяга снижается:

$$T_{\text{actual}} = \min \left(T_{\text{cmd}}, T_{\max}, \left(\frac{P_{\max} \eta_{\text{motor}} - P_{\text{idle}}}{K_{\text{prop}}} \right)^{2/3} \right) \cdot \text{sign}(T_{\text{cmd}}).$$

Энергетическая подсистема состоит из блока топливных элементов постоянной мощности P_{FC} и литий-ионной АКБ ёмкостью E_{bat} . Баланс мощностей:

$$\dot{E}_{bat} = \begin{cases} (P_{FC} - P_{total}) \cdot \eta_{\text{chg}}, & \text{если } P_{FC} > P_{total} \text{ (зарядка)} \\ \frac{P_{FC} - P_{total}}{\eta_{\text{dis}}}, & \text{если } P_{FC} < P_{total} \text{ (разрядка)} \end{cases}$$

где $P_{total} = P_{\text{motor,L}} + P_{\text{motor,R}} + P_{\text{hotel}}$ – суммарная потребляемая мощность; η_{chg} и η_{dis} – КПД заряда и разряда АКБ. P_{hotel} объединяет навигационное оборудование, связь, бортовые нагрузки и мощность холостого хода инверторной электроники P_{idle} , введённые в модель движительного комплекса и входящие в состав P_{hotel} , тем самым учитываемые в общем балансе.

Уровень заряда АКБ определяется следующим образом:

$$SoC = \frac{E_{bat}}{E_{bat,nom}}.$$

Стохастические возмущения среды. Внешние нагрузки от ветра и течения моделируются процессом Орнштейна – Уленбека [8]:

$$dF_{env} = -\alpha(F_{env} - \mu)dt + \sigma dW_t,$$

где $\alpha = 1/\tau$ – параметр корреляции, здесь τ – характерное время; μ – среднее значение возмущения; σ – интенсивность флуктуаций; dW_t – приращение Винеровского процесса.

Дискретная реализация (схема Эйлера – Маруямы):

$$F_{env}(t + \Delta t) = F_{env}(t) \cdot \exp(-\Delta t/\tau) + \mu(1 - \exp(-\Delta t/\tau)) + \sigma\sqrt{1 - \exp(-2\Delta t/\tau)} \cdot \xi,$$

где $\xi \sim \mathcal{N}(0,1)$ – стандартная нормальная случайная величина.

Эмуляция измерительной системы. GPS-приёмник обеспечивает измерения координат (x, y) с частотой f_{GPS} , задержкой d_{GPS} и гауссовским шумом σ_{GPS} :

$$(x_{meas}, y_{meas}) = (x(t - d_{GPS}), y(t - d_{GPS})) + \mathcal{N}(0, \sigma_{GPS});$$

инерциальный измерительный блок (IMU) измеряет курсовой угол ψ и угловую скорость r с частотой f_{IMU} , задержкой d_{IMU} и соответствующими шумами:

$$\psi_{meas} = \psi(t - d_{IMU}) + \mathcal{N}(0, \sigma_{IMU,\psi});$$

$$r_{meas} = r(t - d_{IMU}) + \mathcal{N}(0, \sigma_{IMU,r}).$$

Контроллер работает с зашумлёнными и задержанными измерениями, в то время как система навигации по линии визирования (LOS) использует истинное положение судна для генерации корректной опорной траектории, проводя тестирование программного обеспечения в контуре управления.

Система управления. Траекторное планирование выполняется алгоритмом A* на дискретной сетке с последующим сглаживанием методом LOS. Система наведения LOS генерирует желаемый курсовой угол ψ_{ref} на основе поперечного отклонения от пути:

$$\psi_{ref} = \chi_{path} + \arctan\left(\frac{-e_{ct}}{L_d}\right),$$

где χ_{path} – направление текущего сегмента пути; e_{ct} – поперечное отклонение; L_d – дистанция упреждения.

Управление скоростью реализовано ПИД-регулятором [11]:

$$T_{surge} = K_{p,u}(u_{ref} - u_{meas}) + K_{i,u} \int (u_{ref} - u_{meas}) dt,$$

управление курсом – ПИД-регулятором [12]:

$$\tau_{yaw} = K_{p,\psi}(\psi_{ref} - \psi_{meas}) + K_{i,\psi} \int (\psi_{ref} - \psi_{meas}) dt - K_{d,r} \cdot r_{meas}.$$

Распределение тяги на левый и правый движители:

$$T_L = 0,5 \cdot T_{surge} + \frac{0,5 \cdot \tau_{yaw}}{l_{arm}};$$

$$T_R = 0,5 \cdot T_{surge} - \frac{0,5 \cdot \tau_{yaw}}{l_{arm}},$$

где l_{arm} – плечо момента (половина ширины судна).

На рис. 1 представлена структурная схема разработанной системы адаптивного управления скоростью НС с гибридной энергетической установкой. Схема отражает взаимодействие контуров энергетической безопасности, наведения и управления движением, а также организацию обратных связей по скорости, курсу и положению судна.

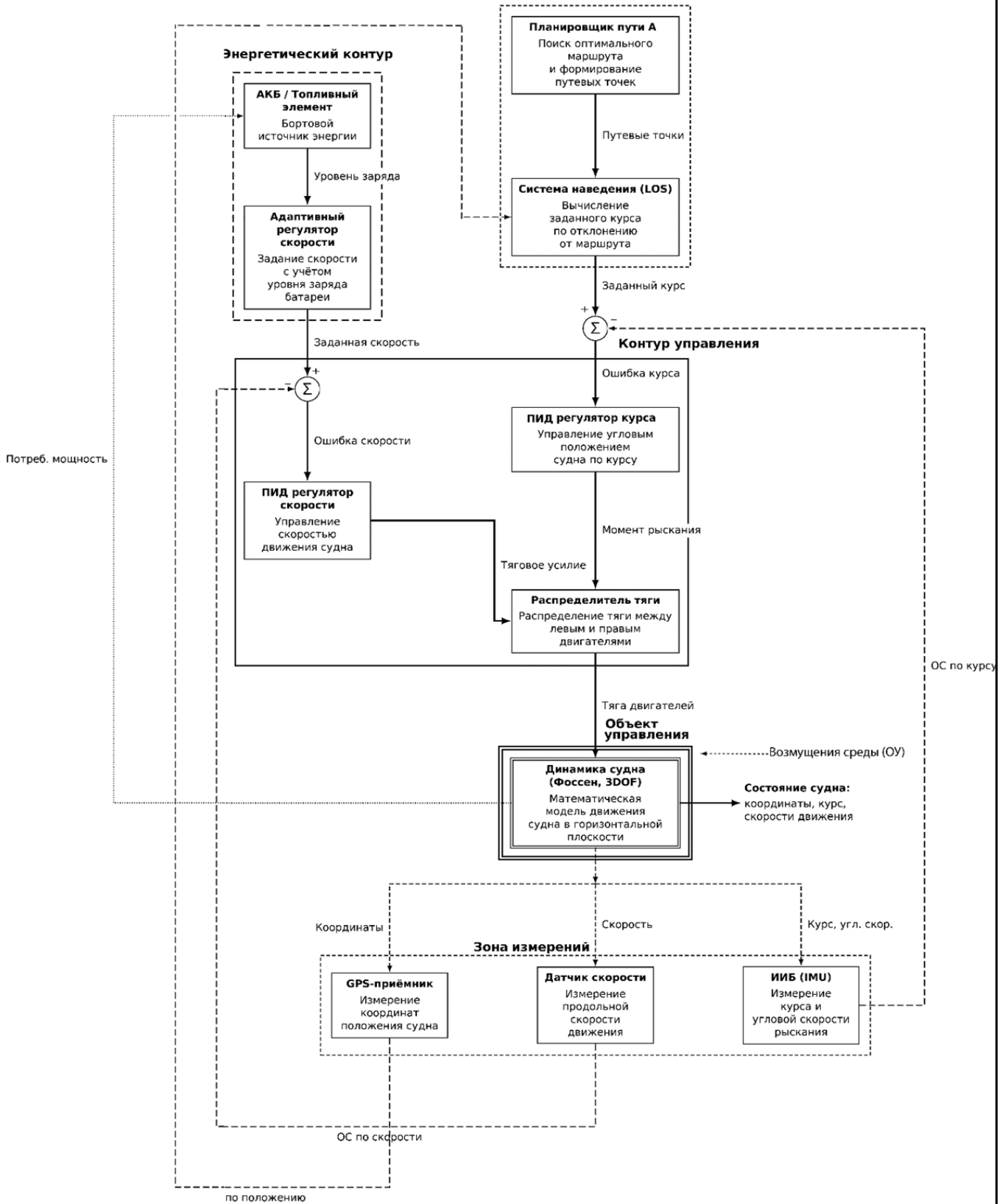


Рис. 1. Структурная схема системы адаптивного управления скоростью НС: Σ – узел сравнения; ОС – обратная связь; ИИБ – инерциальный измерительный блок; LOS – система навигации по линии визирования; ОУ – процесс Орнштейна – Уленбека (стохастические возмущения среды)

Предлагаемый адаптивный регулятор скорости с учётом состояния энергосистемы.

Критерий управления предполагает постоянную заданную скорость $u_{ref} = \text{const} = U_{target}$. Однако при сильных возмущениях среды потребляемая мощность может превышать мощность топливного элемента, что приводит к быстрому разряду батареи и риску полного обесточивания ($SoC < SoC_{blackout} \approx 2-5\%$).

Предлагаемый метод адаптирует заданную скорость на основе текущего уровня заряда батареи:

$$u_{ref}(SoC) = U_{target} \cdot \sigma(SoC),$$

где $\sigma(SoC)$ – масштабирующая функция на основе сигмоиды:

$$\sigma(SoC) = s_{\min} + \frac{1 - s_{\min}}{1 + \exp(-k(SoC - SoC_{crit}))}.$$

Параметры: SoC_{crit} – критический порог (например, 40 %); k – крутизна барьера (коэффициент усиления), s_{\min} – минимальный масштаб скорости (например, 0,4, что соответствует снижению до 40 % от номинальной скорости).

При $SoC \gg SoC_{crit}$ функция $\sigma \approx 1$ и судно движется с полной скоростью. При приближении к критическому порогу σ быстро снижается, формируя мягкий барьер, предотвращающий дальнейший разряд. Ключевые преимущества: вычислительная простота (одно вычисление экспоненты и деление) и отсутствие необходимости в прогнозировании траектории или решении оптимизационных задач.

Результаты исследования. Параметры моделирования. Моделирование выполнено для катамарана «Буран-В» (разработка лаборатории морской робототехники) со следующими характеристиками: длина $L = 6,4$ м, ширина $B = 2,44$ м, масса $m = 1590$ кг, момент инерции $I_z = 8951$ кг·м² (с учётом 20 % гидродинамической добавки). Коэффициенты присоединённых масс: $X_{\dot{u}} = -0,1m$, $Y_{\dot{v}} = -0,5m$, $N_{\dot{r}} = -0,2I_z$. Коэффициенты демпфирования: $X_u = 40$ Н/(м/с), $X_{uu} = 120$ Н/(м/с)², $Y_v = 180$ Н/(м/с), $Y_{vv} = 700$ Н/(м/с)², $N_r = 260$ Н·м/(рад/с), $N_{rr} = 900$ Н·м/(рад/с)².

Двигательный комплекс: максимальная механическая тяга $T_{\max} = 650$ Н на движитель, максимальная электрическая мощность инвертора $P_{\max} = 2200$ Вт, КПД двигателя $\eta_{motor} = 0,85$, мощность холостого хода $P_{idle} = 30$ Вт. Энергосистема: мощность топливного элемента $P_{FC} = 1000$ Вт, ёмкость батареи $E_{bat} = 624$ Вт·ч, КПД зарядки $\eta_{chg} = 0,95$, КПД разрядки $\eta_{dis} = 0,95$, мощность бортовых систем $P_{hotel} = 200$ Вт.

Параметры возмущений: продольная нагрузка $F_{env,x} \sim OU(\mu = -500$ Н, $\sigma = 65$ Н, $\tau = 6$ с), поперечная нагрузка $F_{env,y} \sim OU(\mu = 0$ Н, $\sigma = 15$ Н, $\tau = 8$ с). Отрицательное среднее продольной нагрузки моделирует встречный ветер/течение.

Параметры сенсоров: GPS ($f_{GPS} = 2$ Гц, $d_{GPS} = 0,6$ с, $\sigma_{GPS} = 1,2$ м), IMU ($f_{IMU} = 20$ Гц, $d_{IMU} = 0,05$ с, $\sigma_{IMU,\psi} = 0,8^\circ$, $\sigma_{IMU,r} = 1,0^\circ/\text{с}$), датчик скорости ($\sigma_{speed} = 0,05$ м/с).

Сценарий миссии: навигация через узкие проходы на акватории 450 на 250 м с препятствиями, расстояние по прямой до цели 379 м, фактическая длина пути 501 м (коэффициент объезда 1,32). Начальный уровень заряда $SoC_0 = 45\%$, продолжительность миссии $T_{mission} = 1200$ с. Параметры адаптивного регулятора: $SoC_{crit} = 40\%$, $k = 15$, $s_{\min} = 0,40$.

Численное интегрирование выполнено методом Рунге – Кутты 4-го порядка с шагом $\Delta t = 0,05$ с. Программная реализация на Python 3.11 (NumPy 1.26, Matplotlib 3.8) без использования сторонних библиотек оптимизации или планирования.

Сходимость численной схемы. Для верификации численной модели проведён анализ сходимости при варьировании шага интегрирования $\Delta t \in \{0,2, 0,1, 0,05, 0,025\}$ с относительно наименьшего значения $\Delta t_{ref} = 0,025$ с. В качестве метрик использованы конечная энергия батареи

E_{final} и минимальный уровень заряда $\min(SoC)$ для предложенного метода в детерминированной постановке (без стохастических возмущений, $seed = 1$).

Относительные погрешности E_{final} убывают с порядком $O(\Delta t^2)$, что соответствует теоретическому порядку точности метода RK4. При $\Delta t = 0,05$ с (используется в дальнейших экспериментах) относительная погрешность составляет менее 0,1 % для обеих метрик, что подтверждает корректность численной реализации.

Сравнительный анализ методов. На рис. 2 представлены результаты статистического сравнения базового метода (постоянная скорость $u_{ref} = 2$ м/с) и предложенного адаптивного регулятора по данным Монте-Карло анализа ($N = 30$ независимых запусков с различными реализациями стохастических возмущений, $seeds \in [100,129]$).

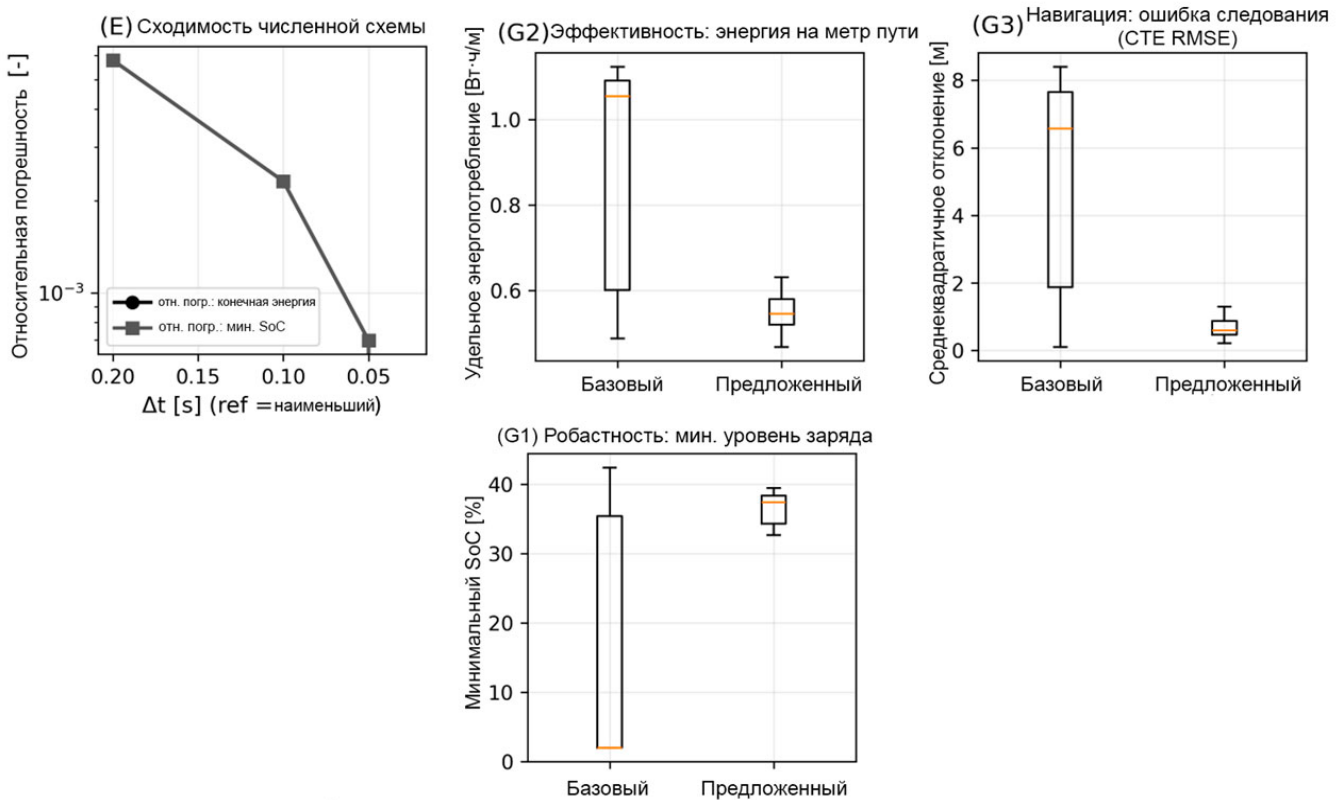


Рис. 2. Результаты моделирования: (E) сходимость численной схемы – зависимость относительной погрешности от шага интегрирования Δt ; (G1) робастность – минимальный уровень заряда батареи SoC , %; (G2) эффективность – удельное энергопотребление, Вт·ч/м; (G3) навигационная точность – среднеквадратичное отклонение поперечного отклонения (СТЕ RMSE), м – сравнение базового и предложенного методов при стохастических возмущениях ($N = 30$)

Количественные результаты сравнения методов приведены в табл. 1. Предложенный адаптивный регулятор демонстрирует значительное превосходство по всем ключевым метрикам эффективности.

Как видно из табл. 1, предложенный метод обеспечивает статистически значимое улучшение минимального уровня заряда батареи на 19,8 п.п. при одновременном повышении надёжности выполнения миссии (100 % успешных завершений против 26,7 % для базового метода), что было подтверждено результатами натурных испытаний катамарана «Буран-В». Статистическая значимость различий подтверждена двухвыборочным t -критерием Уэлча ($p < 0,001$ для всех метрик).

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа методов управления ($N = 30$, среднее \pm стандартное отклонение)

Метрика	Базовый метод	Предложенный метод	Улучшение
Минимальный SoC , %	$16,6 \pm 12,1$	$36,4 \pm 3,2$	+19,8 п.п.
Продолжительность миссии, с	$696,7 \pm 302,0$	$1200,0 \pm 0,0$	+72,2 %
Удельное энергопотребление, Вт·ч/м	$0,893 \pm 0,244$	$0,552 \pm 0,046$	-38,2 %
СКО поперечного отклонения, м	$5,08 \pm 2,31$	$0,70 \pm 0,42$	-86,2 %
Достижение цели, %	26,7	100,0	+73,3 п.п.
Коллизии, %	73,3	0,0	-73,3 п.п.

Примечание: «п.п.» – процентные пункты (абсолютная разность двух процентных значений), «%» – относительное изменение

Панель (E) на рис. 2 демонстрирует результаты верификации численной модели через анализ сходимости по шагу времени. Оценка относительной погрешности для ключевых метрик (конечная энергия батареи и минимальный SoC) проводилась при варьировании шага интегрирования Δt относительно эталонного значения 0,025 с. Графики подтверждают убывание погрешности с порядком $O(\Delta t^2)$, что соответствует теоретической точности использованного метода Рунге – Кутты 4-го порядка. При выбранном для основных экспериментов шаге $\Delta t = 0,05$ с относительная ошибка составляет менее 10^{-3} (менее 0,1 %), что доказывает корректность программной реализации и обеспечивает высокую достоверность полученных результатов моделирования без избыточных вычислительных затрат.

Панель (G1) показывает ключевую метрику – минимальный уровень заряда батареи $\min(SoC)$ за время миссии. Базовый метод демонстрирует критически низкие значения (среднее 16,6 %, медиана ≈ 2 %, в 30 % запусков $\min(SoC) < 5$ %), что указывает на высокий риск отказа энергосистемы. Предложенный метод стабильно поддерживает $\min(SoC)$ на безопасном уровне (среднее 36,4 %, медиана 37 %, стандартное отклонение 3,2 %), обеспечивая улучшение на 19,8 п.п. ($p < 0,001$, двухвыборочный t -критерий Уэлча).

Панель (G2) представляет удельное энергопотребление (энергия на единицу пройденного пути). Предложенный метод достигает среднего значения 0,552 Вт·ч/м против 0,893 Вт·ч/м для базового метода, демонстрируя снижение на 38 %. Это объясняется снижением средней скорости при низком SoC , что приводит к квадратичному снижению гидродинамического сопротивления и, следовательно, требуемой мощности.

Панель (G3) отражает точность следования траектории через среднеквадратичное отклонение поперечной ошибки (СКО поперечного отклонения). Базовый метод характеризуется высокой дисперсией навигационной точности (среднее 5,08 м, стандартное отклонение 2,31 м) вследствие агрессивных манёвров при высокой скорости в условиях сильных возмущений. Предложенный метод демонстрирует значительно более стабильное поведение (среднее 0,70 м, стандартное отклонение 0,42 м), улучшение составляет 86 %. Снижение скорости при критическом SoC способствует более плавному движению и лучшей компенсации возмущений контроллером.

Эффективность адаптации скорости. На рис. 3 представлена карта акватории с запланированной траекторией (алгоритм A^* с последующим сглаживанием) и фактически выполненными траекториями обоих методов для репрезентативного запуска. Серым цветом показаны препятствия с учётом зоны безопасности (радиус буферной зоны 4 м для судна шириной 2,44 м). Шестиугольником обозначена стартовая позиция (35, 70), звездой – целевая позиция (405, 150).

На рис. 3 базовый метод (чёрная пунктирная линия) демонстрирует значительные отклонения от запланированного пути в моменты сильных возмущений, что приводит к увеличению фактической длины маршрута и энергозатрат. Предложенный метод (сплошная

линия) следует траектории с заметно меньшими отклонениями благодаря адаптивному снижению скорости, что уменьшает инерционные эффекты и повышает управляемость.

Статистический анализ по совокупности всех запусков подтверждает данные наблюдения: среднее расстояние, пройденное базовым методом, составляет 423 ± 87 м (высокая дисперсия из-за блужданий), в то время как предложенным методом судно стабильно проходит 501 ± 12 м (близко к оптимальному пути).

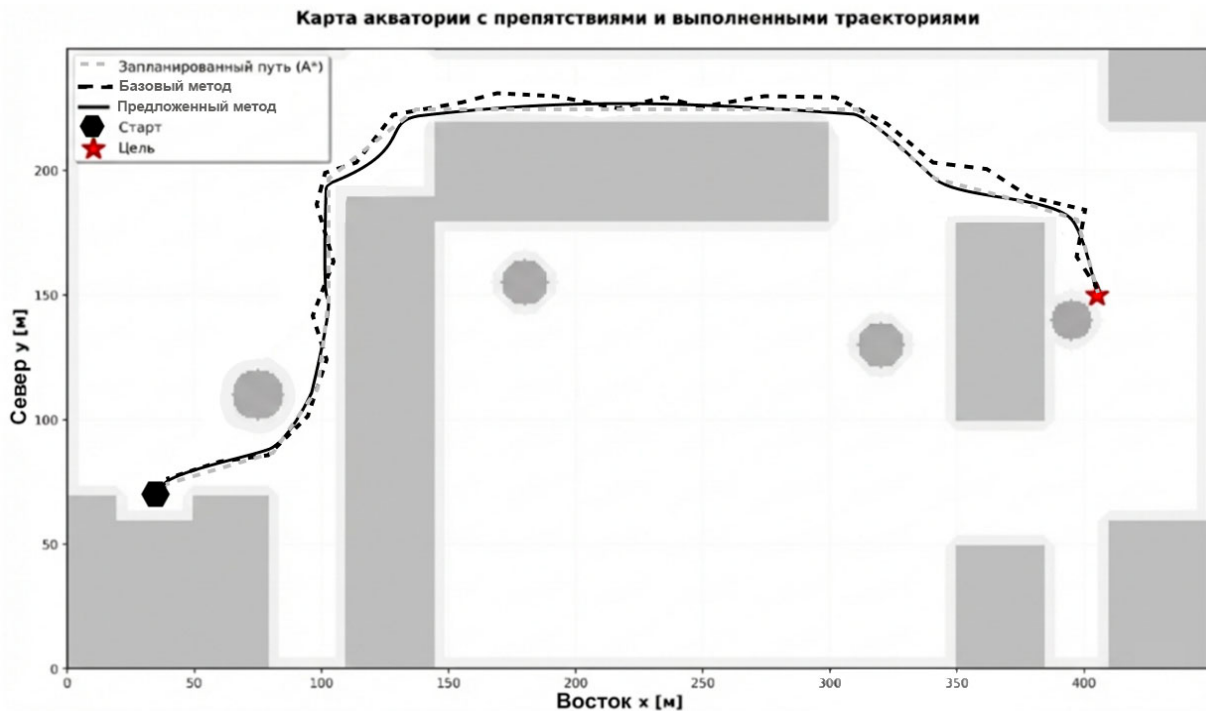


Рис. 3. Карта акватории с препятствиями, запланированной траекторией (A*), путевыми точками и выполненными траекториями базового и предложенного методов (демонстрация влияния адаптации скорости на точность следования траектории)

Обсуждение результатов. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного адаптивного регулятора скорости с учётом состояния энергосистемы на основе сигмоидной барьерной функции. Ключевое преимущество алгоритма – обеспечение гарантированной энергетической безопасности (предотвращение аварийного отключения) при минимальных вычислительных затратах. В отличие от оптимизационных подходов, требующих решения задачи квадратичного программирования на горизонте прогнозирования 10-50 шагов (вычислительная сложность $O(N^3)$, где N – длина горизонта), предложенный метод выполняет единственное вычисление экспоненты и арифметических операций (сложность $O(1)$), что делает его применимым на встраиваемых платформах с ограниченными ресурсами.

Необходимо разграничить два уровня планирования, присутствующих в системе. Алгоритм A* и система наведения LOS относятся к кинематическому уровню: первый строит маршрут однократно до начала выполнения миссии, второй в каждый момент времени выполняет лишь простое геометрическое вычисление желаемого курса по поперечному отклонению. Ни тот ни другой не решают задачи оптимизации на горизонте прогнозирования и не требуют итерационных численных методов. Именно на этом уровне MPC принципиально отличается от предложенного подхода: предиктивный регулятор на каждом шаге управления строит прогноз состояния системы на H шагов вперёд и решает задачу квадратичного программирования (вычислительная сложность порядка $O(H^3)$), тогда как предложенный регулятор скорости на том же шаге вычисляет единственную элементарную функцию – значение сигмоиды от текущего уровня заряда. Именно

этот шаг, а не планирование маршрута, и составляет содержание предложенного метода. Плавность адаптации скорости при этом обеспечивается аналитическими свойствами самой сигмоидной функции: она бесконечно дифференцируема, строго монотонна и не имеет разрывов, что исключает скачкообразные изменения задающего воздействия при любой скорости изменения SoC . Таким образом, утверждение об отсутствии вычислительно затратных процедур прогнозирования относится исключительно к контуру управления скоростью, а не к навигационному стеку в целом.

Улучшение навигационной точности на 86 % является дополнительным положительным эффектом адаптации скорости. Физически это объясняется нелинейной зависимостью гидродинамического демпфирования от скорости (квадратичный член $D_{uu} |u| \cdot u$): снижение скорости в критических ситуациях пропорционально увеличивает эффективность рулевого управления относительно инерционных эффектов, что улучшает следование траектории.

Следует отметить ограничения проведённого исследования. Во-первых, смоделированный сценарий характеризуется высокой сложностью (узкие проходы, сильные возмущения), что делает его показательным тестом для демонстрации возможностей метода. В реальных условиях при менее экстремальных возмущениях абсолютная величина улучшения может быть меньше, однако относительное преимущество в обеспечении энергетической безопасности сохраняется. Во-вторых, система наведения LOS использует истинное положение судна для генерации опорной траектории, в то время как контроллер работает с зашумлёнными измерениями. Это соответствует стандартной практике моделирования в замкнутом контуре, однако для полной валидации требуется интеграция фильтра состояния (например, расширенного фильтра Калмана [13]) для объединения данных GPS и инерциальных измерительных блоков (IMU). Увеличение времени выполнения миссии на 72,2 % является закономерным следствием снижения крейсерской скорости при низком SoC . Предложенный алгоритм целесообразно применять в сценариях, где приоритетом является завершение миссии.

Сравнение с существующими работами показывает, что предложенный метод достигает сопоставимых с MPC результатов по энергоэффективности при значительно меньших вычислительных затратах. Работа демонстрирует схожий подход с динамическим ограничением скорости для наземных роботов, однако без учёта гидродинамики и внешних возмущений, характерных для морской среды. Исследование предлагает правило адаптации скорости на основе оставшегося заряда и расстояния до цели, что требует глобальной информации о маршруте. Предложенный в настоящей работе метод не требует априорной информации о длине маршрута и опирается исключительно на текущее состояние энергосистемы, что повышает его робастность к изменениям плана миссии.

Заключение. В работе показан разработанный алгоритм адаптивного управления скоростью надводного судна с гибридной энергетической установкой на основе сигмоидной барьерной функции. Предложенный регулятор скорости обеспечивает предотвращение критического разряда аккумуляторной батареи путём плавной адаптации заданной скорости в зависимости от текущего уровня заряда АКБ без необходимости решения оптимизационных задач в реальном времени.

Численное моделирование на основе физически обоснованной модели динамики Фоссена (3-DOF) с учётом эффектов снижения тяги, стохастических возмущений среды (процесс Орнштейна – Уленбека) и реалистичных задержек измерительной системы (GPS/IMU) подтверждает эффективность применённого метода. Моделирование методом Монте-Карло ($N = 30$ независимых запусков) демонстрирует статистически значимое улучшение минимального уровня заряда батареи на 19,8 п.п. ($36,4 \pm 3,2$ % против $16,6 \pm 12,1$ % для базового метода, $p < 0,001$), снижение удельного энергопотребления на 38 % и улучшение навигационной точности на 86 %.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является вычислительная простота (сложность $O(1)$ против $O(N^3)$ для MPC), что обеспечивает применимость на встраиваемых платформах судов с ограниченными вычислительными ресурсами. Метод не требует априорной



информации о длине маршрута и демонстрирует робастность к стохастическим возмущениям и неопределённости измерений.

Результаты исследования и натурные испытания катамарана «Буран-В» подтверждают практическую применимость разработанного метода для обеспечения энергетической безопасности НС при выполнении длительных автономных миссий в сложных условиях морской среды. Предложенный алгоритм реализует нелинейное адаптивное управление задающим воздействием, что принципиально отличает его от стандартных систем автоматического управления: используемая нелинейность (сигмоидная барьерная функция) не является ограничением, возникающим вследствие разряда АКБ, а представляет собой целенаправленно спроектированный механизм адаптации, обеспечивающий энергетическую безопасность при сохранении приемлемого качества следования траектории движения НС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Han J., Charpentier J. F., Tang T. An Energy Management System of a Fuel Cell / Battery Hybrid Boat // *Energies*. 2014. Vol. 7(5). P. 2799-2820.
2. Беспилотная роботизированная морская платформа с энергетической установкой на водородных топливных элементах / А. С. Жильцов, С. П. Муровский, В. В. Кувшинов, В. М. Цалоев, И. Д. Артёмов // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. – 2025. – № 4 (45). – С. 47-54.
3. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами / В. Х. Пшихопов, А. А. Федотов, М. Ю. Медведев, Т. Н. Медведева, Б. В. Гуренко // *Инженерный вестник Дона*. – 2014. – № 3. – С. 1-20.
4. Робастное управление надводным судном с адаптивной компенсацией параметрически неопределённых синусоидальных возмущений / Ф. Б. Громова, А. Ю. Живицкий, О. И. Борисов, А. А. Пыркин // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2021. – Т. 64. – № 12. – С. 993-1002.
5. Skjetne R., Fossen T. I., Kokotović P. V. Adaptive Maneuvering, with Experiments, for a Model Ship in a Marine Control Laboratory // *Automatica*. 2005. Vol. 41(2). P. 289-298.
6. Васьков, А. С. Адаптивная модель движения судна в системах управления / А. С. Васьков, А. Н. Штанько // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2022. – № 3 (ч. 1). – С. 288-295.
7. Fossen T. I., Perez T. Marine Systems Simulator (MSS). Technical Report. Norwegian University of Science and Technology, 2004.
8. Uhlenbeck G. E., Ornstein L. S. On the Theory of the Brownian Motion // *Physical Review*. 1930. Vol. 36 (5). P. 823-841.
9. Misra P., Enge P. *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. 2nd ed. Ganga-Jamuna Press, 2006. 569 p.
10. Carlton J. S. *Marine Propellers and Propulsion*. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2018. 544 p.
11. Моделирование многокаскадного нечёткого регулятора для управления многодвигательной системой электроприводов / С. П. Черный, К. А. Емельянов, М. А. Лямин, Д. Ю. Облогин // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2025. – № III (83). – С. 4-10.
12. Моделирование системы управления двусосным солнечным трекером с использованием FOPID-регулятора / В. В. Кувшинов, С. П. Муровский, Л. М. А. Абдали, Х. А. Исса // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2025. – № VII (87). – С. 49-57.
13. Welch G., Bishop G. *An Introduction to the Kalman Filter*. Technical Report TR 95-041. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, 2006.

Копытов С. М., Тимохин П. А.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНЗИСТОРОВ СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Копытов С. М., Тимохин П. А.

S. M. Kopytov, P. A. Timokhin

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНЗИСТОРОВ СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО
ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ**

**AUTOMATION OF THE PROCESS OF OBTAINING VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS
OF MEDIUM- AND HIGH-POWER TRANSISTORS BASED ON A DIGITAL POWER SUPPLY**

Копытов Сергей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: skopytov@mail.ru.

Sergey M. Kopytov – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: skopytov@mail.ru.

Тимохин Петр Александрович – студент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: peit@knastu.ru.

Petr A. Timokhin – Master's Degree Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: peit@knastu.ru.

Аннотация. Предложена реализация характеристики вольт-амперных характеристик транзисторов средней и большой мощности на основе доступного цифрового источника питания PPS2320A с двумя управляемыми выходными каналами. Источник взаимодействует с компьютером с помощью команд стандарта SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments). В среде LabVIEW разработана программа работы характеристики, приведены рекомендации по проведению исследования транзисторов различной проводимости в разных схемах включения. Работа программы протестирована на примере получения ВАХ мощных биполярных и полевых транзисторов.

Summary. A current-voltage (I-V) curve tracer for medium- and high-power transistors is proposed based on an affordable PPS2320A digital power supply with two controlled output channels. The supply communicates with a computer using SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) commands. A LabVIEW program for the curve tracer has been developed, along with recommendations for studying transistors with different conductivities in various circuit configurations. The program has been tested using the I-V curves of high-power bipolar and field-effect transistors.

Ключевые слова: характеристика вольт-амперных характеристик, биполярные и полевые транзисторы, цифровой источник питания, LabVIEW, SCPI команды.

Key words: curve tracer, bipolar and field-effect transistors, digital power supply, LabVIEW, SCPI commands.

УДК 621.317.3

Введение. Общеизвестно, что основой электронных устройств являются полупроводниковые приборы, в основном транзисторы различных типов [1–4]. Их выполняют как в интегральном, так и в дискретном виде. Если у интегральных транзисторов и других компонентов монолитных микросхем мощность, как правило, ограничена, то мощность дискретных элементов может быть достаточно большой. С другой стороны, параметры идентичных элементов в составе интегральных микросхем практически одинаковы, чего нельзя сказать о параметрах и характеристиках дискретных приборов даже из одной поставки.

Функциональные показатели различных промышленных и экспериментальных электронных устройств существенно зависят от характеристик составляющих элементов. Например, для

усилителя мощности на комплементарных транзисторах необходима симметричность плеч для обеих половин усиливаемого сигнала, что позволяет существенно снизить искажения.

Для экспериментального получения вольт-амперных характеристик (ВАХ) электронных приборов применяют характериографы [5–9]. Ранее широко использовали аналоговые характериографы с отображением ВАХ на экране электронно-лучевой трубки [9]. В настоящее время характериографы выполняют в виде моноблочных цифровых устройств или в виде приставки к компьютеру. В составе тех и других обязательно присутствуют источники стабильного напряжения и тока с возможностью установки значений в требуемых диапазонах.

Широкое распространение получили компьютерные характериографы, применяемые в основном в измерительных и учебных лабораториях. Максимальный выходной ток в них ограничен значением в несколько десятков миллиампер, что позволяет снимать ВАХ только маломощных полупроводниковых приборов. Характериографы, работающие с приборами средней и большой мощности, довольно дороги, поэтому встречаются редко.

Практически в любой лаборатории применяют цифровые блоки питания, имеющие, как правило, два или более независимых выходных канала, способных работать в режиме как стабилизации напряжения, так и стабилизации тока. В таких источниках предусмотрена возможность регулировки выходного напряжения и тока вручную, а также с помощью цифрового интерфейса. Устройство обычно подключают к компьютеру через USB-интерфейс в режиме эмуляции виртуального СОМ-порта.

Целью работы является разработка характериографа ВАХ биполярных и полевых транзисторов средней и большой мощности на основе доступного цифрового источника питания без привлечения дополнительных аппаратных средств.

Разработка программного обеспечения характериографа. Известно, что основными семействами ВАХ биполярного транзистора в схеме с общей базой (ОБ) являются входные характеристики $I_E = f(U_{ЭБ})$ при $U_{КБ} = \text{const}$ и выходные характеристики $I_K = f(U_{КБ})$ при $I_E = \text{const}$. Для схемы с общим эмиттером (ОЭ) используют входные характеристики $I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ и выходные характеристики $I_K = f(U_{КЭ})$ при $I_B = \text{const}$. В случае исследования полевого транзистора в схеме с общим истоком (ОИ) вместо входных характеристик снимают характеристики прямой передачи, а параметром выходных характеристик является входное напряжение на затворе, а не входной ток, которого нет. Следовательно, для экспериментального получения характеристик требуются два управляемых канала задания напряжения или один канал задания напряжения, а второй – тока.

Управляемые каналы цифрового источника питания могут работать в двух режимах – стабилизации напряжения и стабилизации тока. С помощью органов управления на самом источнике или команд, поступающих от компьютера, можно установить требуемое напряжение и ток каждого канала. В зависимости от сопротивления нагрузки канал автоматически переходит в режим стабилизации напряжения или тока в соответствии с законом Ома. Та величина, которая стабилизируется, соответствует заданному значению, а действительное значение второй величины можно увидеть на индикаторе и прочесть в компьютер. Описанной функциональности вполне достаточно для реализации характериографа ВАХ на базе цифрового источника питания с двумя настраиваемыми каналами без использования дополнительных устройств и электронных элементов.

На основании сказанного предложен алгоритм управления программируемым источником питания, приведённый на рис. 1.

В качестве базового устройства выбран цифровой источник питания PPS2320A компании Nantek, имеющийся в наличии [10]. Данный блок относится к бюджетной нише и по параметрам не выделяется в лучшую сторону среди устройств подобного класса. Источник имеет три независимых выходных канала. Первые два из них являются полностью управляемыми, что достаточно для создания характериографа. Через эти каналы можно выдавать стабилизированное напряжение в диапазоне от 0 до 32 В и стабилизированный ток в диапазоне от 0 до 3,1 А.

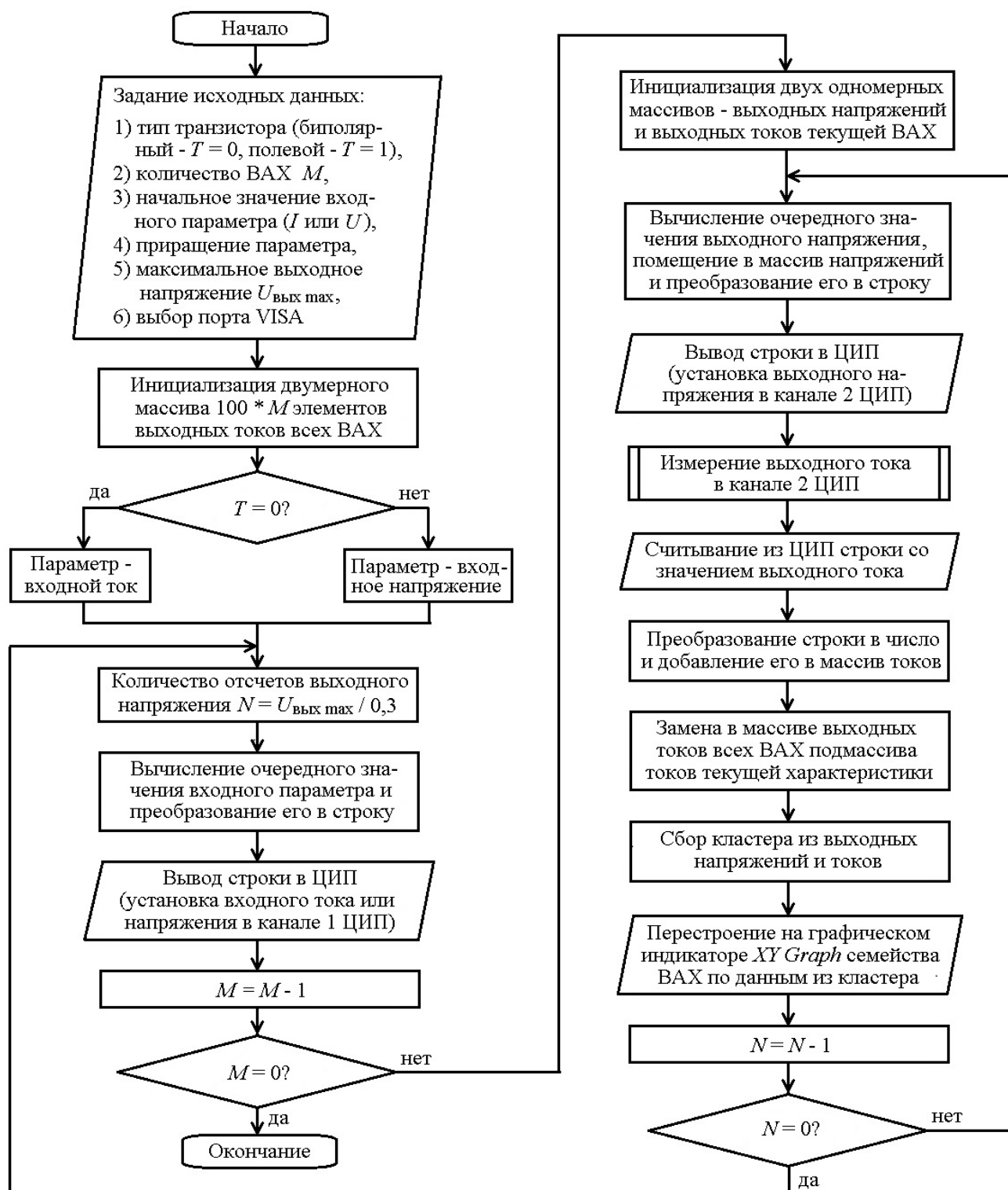


Рис. 1. Алгоритм управления программируемым источником питания для реализации характеристики ВАХ

Для компьютерного управления данным источником предназначен протокол связи с использованием SCPI подобных команд [11; 12]. Стандарт SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) предложен для управления программируемыми измерительными и управляющими

электронными устройствами. Команды протокола связи имеют текстовый формат в ASCII кодах. Текст каждой команды должен завершаться кодом перевода строки. В разработанной программе использованы следующие команды [13]:

1. suXXXX – установка напряжения канала 1, где XXXX – напряжение XX,XX в вольтах;
2. siXXXX – установка тока канала 1, где XXXX – ток в миллиамперах;
3. saXXXX – установка напряжения канала 2, где XXXX – напряжение XX,XX в вольтах;
4. ga – запрос на считывание действительного тока канала 1 в миллиамперах;
5. gj – запрос на считывание действительного тока канала 2 в миллиамперах.

Компьютер должен отправлять команды источнику питания через виртуальный СОМ-порт со стандартной скоростью 9600 бит в секунду. После приёма и выполнения любой команды источник высылает ответ, который компьютер должен прочитать. Так, при успешном выполнении первых трёх команд источник возвращает символы «ОК», а после выполнения четвёртой и пятой команд – значение измеренного тока в миллиамперах.

Канал 1 используется для задания входного тока для биполярного транзистора или входного напряжения на затворе для полевого транзистора. Канал 2 служит для установки выходного напряжения и считывания выходного тока.

Программа управления характеристикографом разработана в среде LabVIEW [14]. Лицевая панель программы приведена на рис. 2 и 3. Слева размещены органы управления, а справа расположен графический индикатор XY Graph для построения выходных ВАХ.

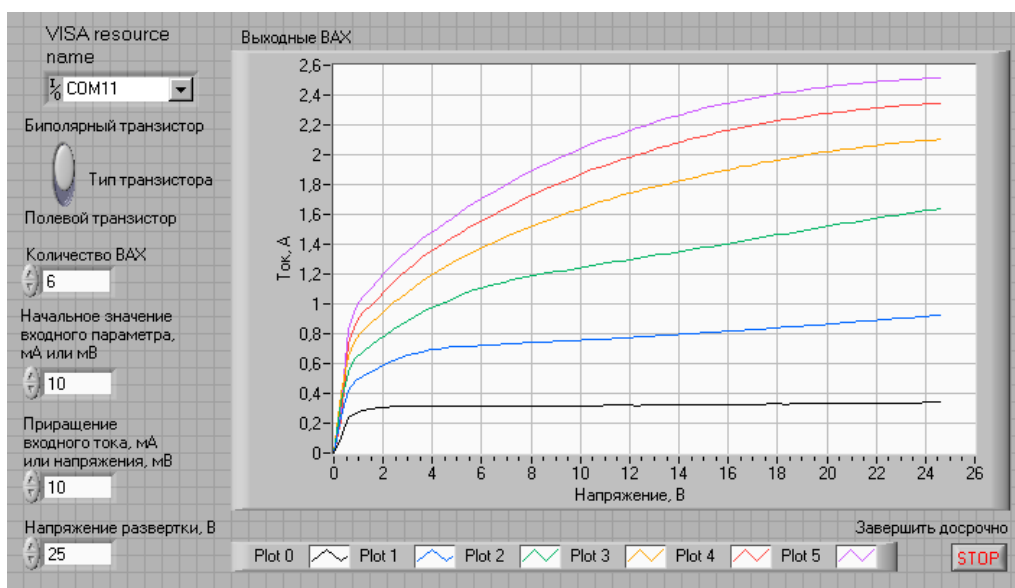


Рис. 2. Лицевая панель программы управления характеристикографом после снятия выходных ВАХ биполярного транзистора КТ828Б в схеме ОЭ

Перед запуском программы на лицевой панели необходимо ввести исходные данные, с помощью переключателя выбрать тип транзистора, задать количество ВАХ в семействе, выставить начальное значение входного тока биполярного или входного напряжения полевого транзистора, для которых будет снята первая характеристика. Затем задать приращение входного тока или напряжения для построения остальных ВАХ. Наконец, установить предельное значение выходного напряжения.

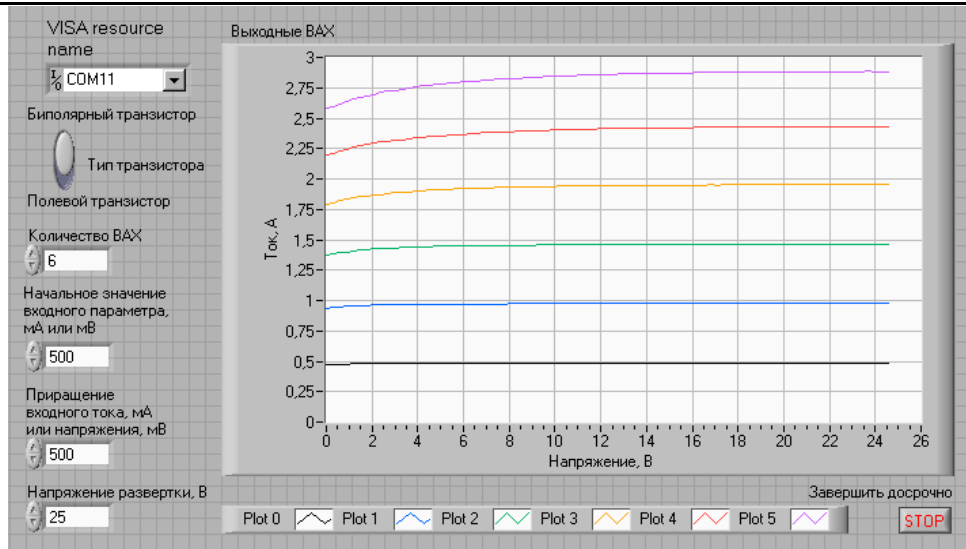


Рис. 3. Лицевая панель программы управления характериографом после снятия выходных ВАХ биполярного транзистора КТ828Б в схеме ОБ

Блок-диаграмма программы представлена на рис. 4. Скрытые кадры Stacked Sequence Structure показаны на рис. 5.

Программа работает следующим образом. В ней присутствуют два основных цикла For Loop. Внешний цикл For Loop 1 определяет количество характеристик в семействе и задаёт значение входного параметра (тока базы или напряжения на затворе). Внутренний цикл For Loop 2 формирует растущее напряжение на коллекторе или стоке, выполняет измерение выходного тока, формирует массивы точек графиков ВАХ и выводит их в реальном времени на графический экран.

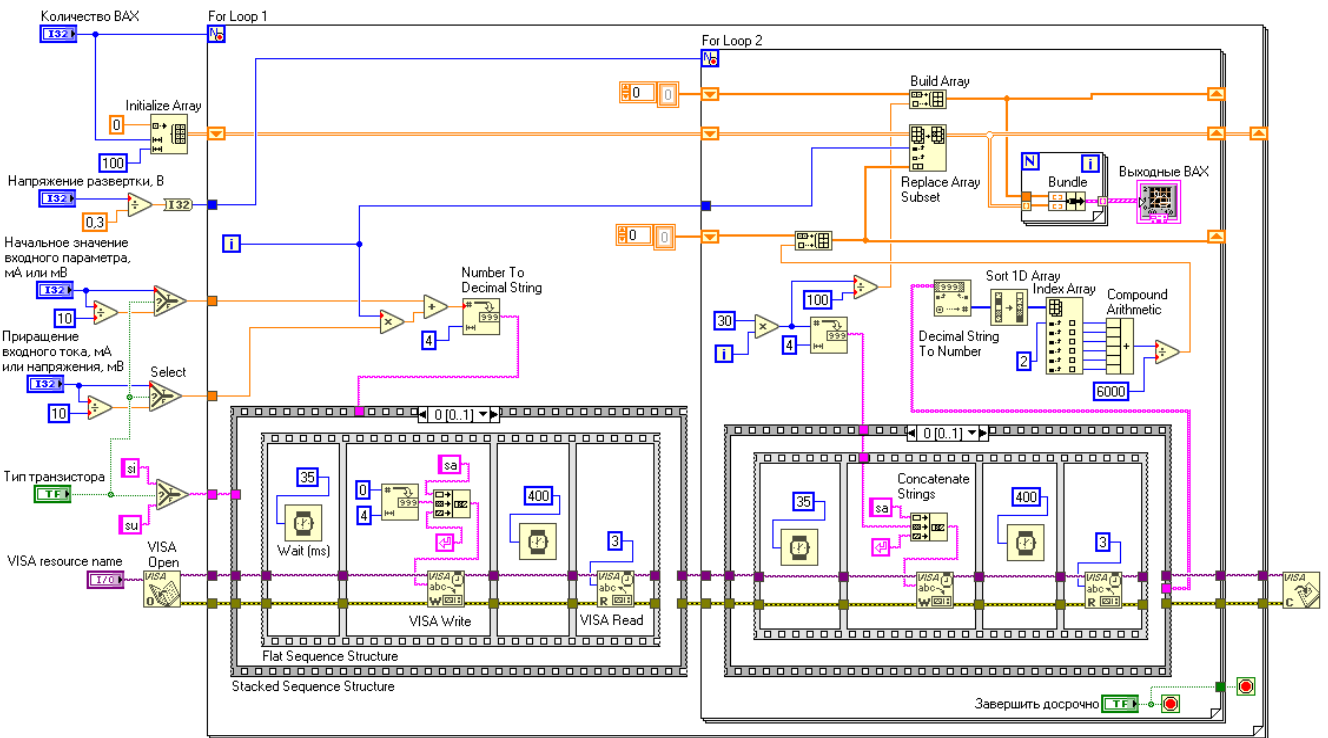


Рис. 4. Блок-диаграмма программы управления характериографом для снятия выходных ВАХ транзисторов

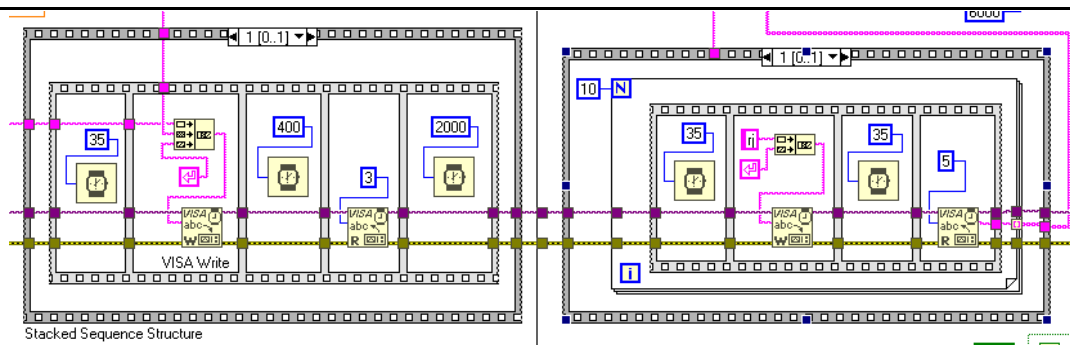


Рис. 5. Скрытые кадры Stacked Sequence Structure блок-диаграммы

Функции Number To Decimal String преобразуют числовое значение напряжения или тока в строковое значение из четырёх ASCII кодов цифр, добавляя коды нулей слева, если значение мало. Функции Concatenate Strings формируют рассмотренный выше формат команд, собирая команду из кодов начальных двух букв, кодов цифр и кода перевода строки. Для отправки команд по интерфейсу используются функции VISA Write, а для чтения ответа источника питания – функции VISA Read. Преобразование полученного символьного значения тока в числовое значение выполняет функция Decimal String To Number.

По сравнению с более качественными источниками питания источник PPS2320A имеет заметную нестабильность и случайные отклонения измеренного тока от истинного значения. Для борьбы с этим явлением использованы методы статистической обработки данных. В кадре 1 правой структуры Stacked Sequence Structure использован цикл For Loop для накопления 10 символьных значений тока в индексированном туннеле. После преобразования этих значений в цифровую форму выполнена их сортировка в порядке возрастания функцией Sort 1D Array. Затем с помощью функции Index Array выбраны 6 средних значений тока, тем самым удалены по два минимальных и максимальных значения, т. е. возможные промахи. Из оставленных 6 значений получено среднее арифметическое значение тока.

Как ранее указано, характеристики снимаются по очереди. Чтобы видеть на графическом индикаторе, как строится очередная характеристика, а также полученные ранее характеристики семейства, используется двумерный массив, в который записываются значения тока всех характеристик. Этот массив пополняется и сохраняется с помощью совокупности сдвиговых регистров Shift Register, сформированных на границах циклов For Loop 1 и For Loop 2. Программу легко адаптировать для получения входных ВАХ и ВАХ передачи.

Рекомендации по проведению измерений. Характериограф позволяет снимать ВАХ для транзистора любого типа: биполярного прямой и обратной проводимости или полевого с каналом n - и p -типа. Пусть необходимо снять выходные ВАХ для схемы с ОЭ или с ОИ. Сначала, учитывая тип транзистора и схему включения, следует создать общий узел источника питания. Например, для исследования биполярного n - p - n -транзистора в схеме ОЭ или полевого транзистора с каналом n -типа в схеме ОИ нужно соединить между собой отрицательные клеммы каналов питания, к этому узлу подключить общий вывод транзистора. Входной электрод (базу или затвор) подключить к положительной клемме канала 1, а выходной электрод (коллектор или сток) подключить к положительной клемме канала 2. Для исследования транзистора другой проводимости или в новой схеме включения следует перекоммутировать клеммы источника питания и выводы транзистора.

Известно, что вид ВАХ полупроводниковых приборов зависит от температуры кристалла. При длительном пропускании тока происходит нагрев прибора. Максимальная мощность, рассеиваемая на транзисторе, при напряжении порядка 30 В и токе 3 А составляет примерно 90 Вт. Поэтому для предотвращения нагрева транзистора его необходимо закрепить на массивном радиаторе с активным обдувом вентилятором. Кроме того, среда LabVIEW позволяет использовать в процессе исследования датчик температуры для её учёта.

Тестирование характериографа. Примеры полученных выходных ВАХ биполярного транзистора в схемах включения ОЭ и ОБ приведены выше, на рис. 2 и 3. Возможности управляемых каналов источника питания позволяют характериографу работать как с малыми, так и с большими входными токами транзистора.

На рис. 6, а и б приведены выходные ВАХ двух разных MOSFET транзисторов IRF630, которые свидетельствуют о различии их параметров. Вид ВАХ прямой передачи второго транзистора IRF630 при напряжении между стоком и истоком +10 В показан на рис. 6, в.

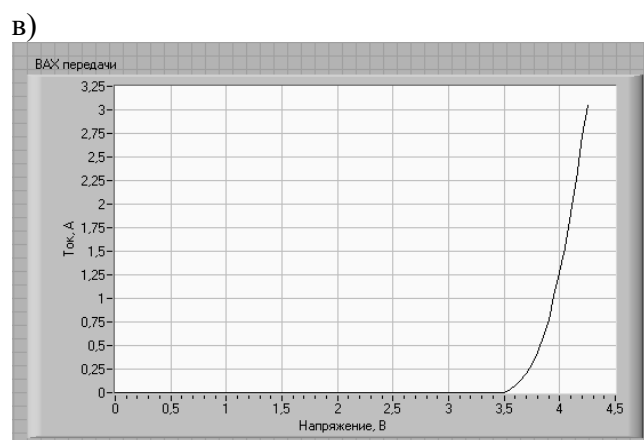
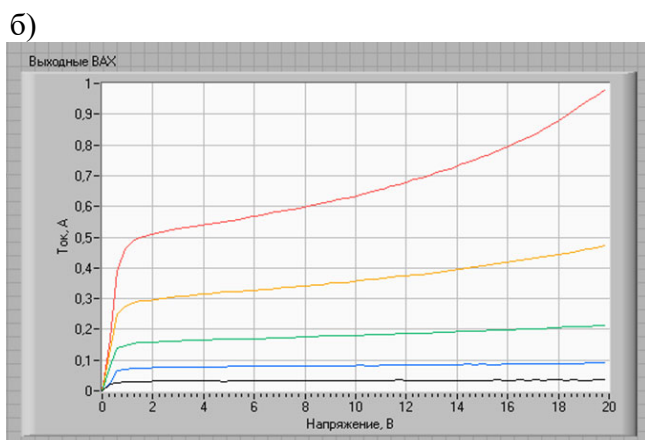
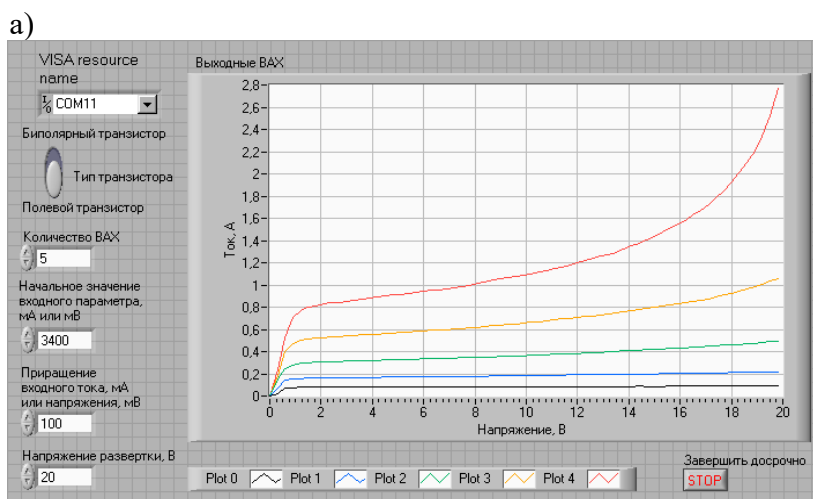


Рис. 6. Выходные ВАХ двух разных транзисторов IRF630 для схемы ОИ (а, б) и ВАХ прямой передачи второго транзистора (в)

Заключение. Таким образом, в работе предложено решение задачи получения ВАХ мощных полупроводниковых приборов, встречающейся на практике и требующей дорогостоящего специализированного оборудования. Такая задача часто возникает как в исследовательских, так и в учебных лабораториях. Процесс измерения полностью автоматизирован благодаря разработке соответствующего алгоритма и его реализации в среде графического программирования LabVIEW. Практической значимостью является то, что в отличие от распространённых решений низковольтных и слаботочных характериографов реализован построитель ВАХ полупроводниковых приборов средней и большой мощности. Он позволяет исследовать биполярные и полевые транзисторы в разных схемах включения. Предусмотрены гибкое задание параметров на лицевой панели, визуализация характеристик в процессе их построения, статистическая обработка экспериментальных значений для улучшения стабильности. Предлагаемое решение позволяет без дополнительных затрат получить востребованный измерительный инструмент.



ЛИТЕРАТУРА

1. Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы: справ. – М.: Радио и связь, 2014. – 560 с.
2. Нефедов, А. В. Отечественные транзисторы для бытовой, промышленной и специальной аппаратуры / А. В. Нефедов, А. И. Аксенов. – М.: СОЛОН, 2006. – 600 с.
3. Знаенко, В. Н. Разработка способа подвода тока к плечу выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза на базе IGBT-транзисторов / В. Н. Знаенко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 10-19.
4. Ющенко, Л. В. Использование полупроводниковых диодов для получения перемещающегося магнитного поля / Л. В. Ющенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V (53). – С. 19-23.
5. Иноземцев, В. Характериограф для транзисторов / В. Иноземцев // Радио. – 1990. – № 12. – С. 78-79.
6. Лисовский, Д. Цифровой запоминающий характериограф полупроводниковых приборов Л2-100 ТЕКО / Д. Лисовский, М. Рагозин // Современная электроника. – 2014. – № 9. – С. 48-51.
7. Дьяконов, В. П. Современная техника и приборы для измерения резистивности и снятия ВАХ / В. П. Дьяконов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 10. – С. 137-144.
8. Воробьев, Н. В. Многофункциональный характериограф для экспресс-анализа радиоэлектронной аппаратуры / Н. В. Воробьев, О. В. Петров // Известия вузов. Электроника. – 2012. – № 1 (93). – С. 72-78.
9. Иванов, Б. В. Применение характериографа для исследования вакуумных и твёрдотельных приборов: учеб. пособие / Б. В. Иванов, А. Д. Тупицын, А. К. Шануренко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 100 с.
10. 32 volt DC 3.0 amp three output programmable linear power supply PPS2320A // Circuit Specialists, сайт. – URL: https://www.circuitspecialists.com/hantek_pps2320a_power_supply?srsltid=AfmBOor-anV2FumhzL_3gbbN515f4K7mPYwL00Z7VuPDGIQsE9vvzzEN (дата обращения: 05.01.2026). – Текст: электронный.
11. Киргизбаев, В. П. Применение команд SCPI для автоматизации проведения лабораторных специальных исследований с использованием анализаторов спектра / В. П. Киргизбаев // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». – 2022. – № 2 (16). – С. 216-226. – URL: <https://ojs.ircgups.ru/index.php/mns/article/view/725> (дата обращения: 05.01.2026). – Текст: электронный.
12. Копытов, С. М. Использование среды LabVIEW для автоматизации измерений на базе программируемого моста переменного тока MT2822 / С. М. Копытов, А. С. Шмакова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025. – № 4. – С. 267-272.
13. Communication Protocol PPS2320A // Circuit Specialists, сайт. – URL: https://www.circuitspecialists.com/pdf/hantek_power_supply_communication_protocol.pdf (дата обращения: 05.01.2026). – Текст: электронный.
14. Евдокимов, Ю. К. LabVIEW в научных исследованиях / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. – М.: ДМК пресс, 2018. – 400 с.

Фролов А. В., Кукин Д. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХХОДОВОГО ПОВОРОТНОГО КРАНА С КАНАЛОМ Т-ТИПА И ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Фролов А. В., Кукин Д. В.

A. V. Frolov, D. V. Kukin

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХХОДОВОГО ПОВОРОТНОГО КРАНА С КАНАЛОМ Т-ТИПА И ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

RESEARCH OF A T-TYPE THREE-WAY ROTARY VALVE WITH AN ELECTRIC DRIVE FOR USE IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

Фролов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Aleksei V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Кукин Дмитрий Викторович – студент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: peit@knastu.ru.

Dmitriy V. Kukin – Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: peit@knastu.ru.

Аннотация. Приводятся результаты исследования регулировочной характеристики неполнопроходного трёхходового поворотного шарового крана с Т-образным каналом типа ТИМ ½” (dy15), а также регулировочной характеристики электропривода ЭПК24. Показано, что регулировочная характеристика электропривода отличается достаточно высокой степенью линейности. Регулировочная характеристика трёхходового крана отличается нелинейностью и зависимостью от схемы включения крана. При использовании поворотного крана в системах автоматического регулирования с подключением выходной магистрали к среднему порту рекомендуется использование углов регулирования $\pm 40 \dots \pm 80^\circ$ для получения относительно линейной передаточной характеристики. При подключении выходной магистрали к боковому порту крана рекомендуется использование углов регулирования $-80 \dots -30^\circ$ для получения относительно линейной передаточной характеристики. Полученные зависимости могут быть использованы при настройке параметров автоматических регуляторов в системах отопления различного назначения.

Summary. There are presented the results of the research of the control characteristics of a non-full-bore three-way rotary ball valve with a T-channel of the TIM ½” (DN15) type, as well as the control characteristics of the EPK24 electric drive. It is shown, that the electric drive control characteristic is characterized by a fairly high degree of linearity. The three-way valve control characteristic is nonlinear and dependent on the valve connection circuit. When using a rotary valve in automatic control systems with the outlet line connected to the middle port, it is recommended to use control angles of $\pm 40^\circ \dots \pm 80^\circ$ to obtain a relatively linear transfer characteristic. When connecting the outlet line to the valve side port, it is recommended to use control angles of $-80^\circ \dots -30^\circ$ to obtain a relatively linear transfer characteristic. This dependency can be used to configure the parameters of automatic controllers in heating systems for various purposes.

Ключевые слова: исследование, регулировочная характеристика, трёхходовой кран, поворотный кран, электропривод, автоматическое управление.

Key words: research, control characteristic, three-way valve, rotary valve, electric drive, automatic control.

Статья подготовлена при поддержке ФГБОУ ВО «КНАГУ» (грант № ВН001/2023).

УДК 681.587.3

Введение. В настоящее время в тепловых системах с жидким теплоносителем активно применяются электрические системы автоматического управления. Это относится к тепловым пунктам, водяным калориферам и другим системам теплоснабжения и отопления. Несмотря на

расширение области применения методов автоматического управления, основанных на нечёткой логике [4; 5; 12–14], адаптивных алгоритмах, включая использование самообучающихся систем [8], в практике наиболее распространённым принципом регулирования в системах автоматического управления всё ещё остаётся пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) благодаря его высокой надёжности, точности, быстродействию, универсальности, минимальным требованиям к вычислительным ресурсам, простой настройке и т. д. Но корректная работа ПИД-регулятора возможна для линейных систем.

В системах водяного отопления в качестве регулирующего элемента используется трёхходовой кран с T-образным каналом и с электроприводом (см. рис. 1) [10]. В последнее время наблюдается тенденция применения не только седельных (штоковых) кранов, но и поворотных шаровых кранов, работающих в регулирующем режиме [2; 6; 11; 15], т. е. в режиме частичного открытия/закрытия, несмотря на то что шаровые краны изначально разрабатывались для использования в запорном режиме. Применение поворотных (шаровых кранов) связано с такими их особенностями, как быстродействие, простота, надёжность, малые размеры, низкое гидравлическое сопротивление и др.

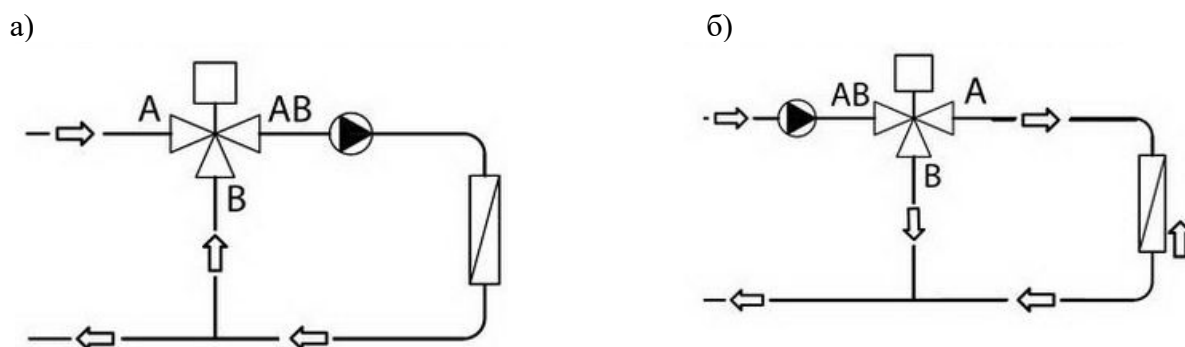


Рис. 1. Схемы включения трёхходового крана: а – в режиме смешивания потоков; б – в режиме разделения потоков

При повороте шарового клапана проходные отверстия его портов представляют собой фигуры, полученные пересечением окружностей (см. рис. 2). Кроме того, «перемычки» между отверстиями поворотного клапана также уменьшают проходное сечение. Вышеуказанное обуславливает нелинейный характер регулировочной характеристики крана, что не позволяет его эффективно применять в системах с ПИД-регуляторами, рассчитанными на работу с линейными системами.

Для компенсации нелинейностей применяются разные подходы [1], но наиболее простым можно считать введение в алгоритм управления функции, обратной функции регулировочной характеристики (метод обратной нелинейности) [3]. Для этого необходимо разработать математическую модель регулировочной характеристики. Для запорного двухпортового шарового крана пропускную характеристику часто приводят в паспорте на кран. Для круглого отверстия эта характеристика может быть аппроксимирована экспоненциальной или квадратичной зависимостью. Для отверстий прямоугольной и более сложных форм производители добиваются получения заданных характеристик – от линейной до равнопроцентной [9; 16]. Но для трёхходового крана найти подобные характеристики не удалось. Аналитически рассчитать пропускные характеристики достаточно сложно, т. к. необходимо решить несколько задач: определить зависимость площади проходных сечений портов крана от угла поворота регулирующего клапана; определить гидравлическое сопротивление каналов клапана для каждого порта с учётом формы проходного сечения, режима протекания жидкости (при больших площадях – ламинарное, при малых – турбулентное), соотношения длины и площади проходного канала (при больших площадях проходного сечения часть крана можно заменить на эквивалентную дроссельную шайбу, при малых площадях – на эквивалентную трубу, длина которой сопоставима с диаметром отверстия) и других особенностей.

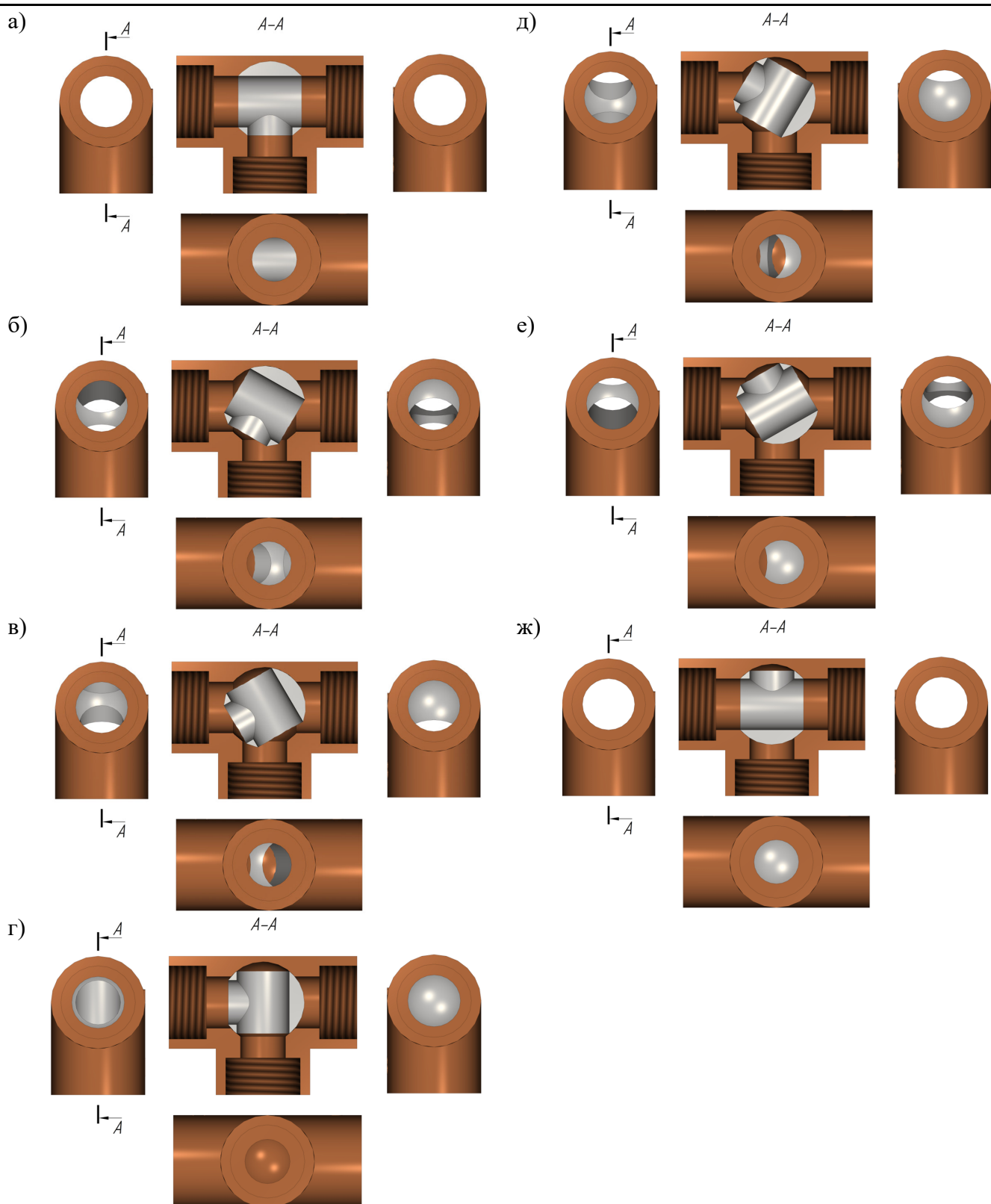


Рис. 2. Положение регулирующего шарового клапана трёхходового крана и форма проходных сечений его портов при углах поворота клапана:
а – 0°; б – 30°; в – 60°; г – 90°; д – 120°; е – 150°; ж – 180°

Для управления регулировочными кранами обычно используются электроприводы с аналоговым управлением – с управлением сигналами (0...10) В или (4...20) мА и заявленной линейной передаточной функцией.

В связи с широким распространением трёхходовых регулирующих поворотных кранов в системах автоматического регулирования систем теплоснабжения и отопления, необходимостью изучения их нелинейной регулировочной характеристики для эффективного использования в системах с ПИД-регуляторами, настоящая работа была посвящена исследованию зависимости расходной характеристики трёхходового поворотного крана от сигнала управления электроприводом (положения регулирующего клапана).

Методика эксперимента. В работе использовался электропривод поворотного крана ЭПК24 со следующими заявленными характеристиками: питание – 24 В; мощность – 5 Вт; усилие – 10 Н·м; время поворота на 90° – 35 с; сигналы управления – (0...10) В, (4...20) мА [7].

Для задания сигнала управления использовался лабораторный источник питания Б5-44.

Угол поворота штока трёхходового крана измерялся с помощью электронного клинометра WD-100 с разрешением 0,05°, закреплённого на приводе штока крана.

При исследовании электропривода определялись зависимость угла поворота штока крана α от напряжения управления U_y , скорость вращения штока $\frac{d\alpha}{dt}$, а также зона нечувствительности U_T электропривода (см. рис. 3).

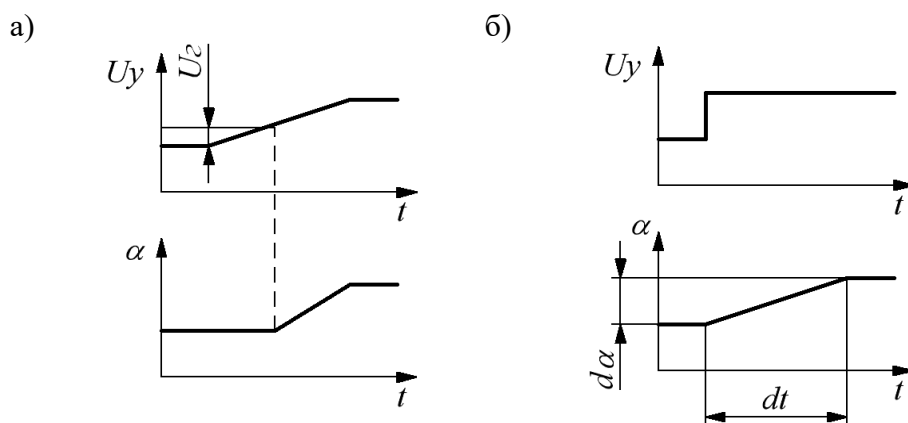


Рис. 3. Исследование передаточной характеристики электропривода поворотного крана в режимах линейного изменения входного сигнала (а), ступенчатого изменения входного сигнала (б)

Для исследования пропускных характеристик трёхходового крана использовались две схемы (см. рис. 4), включающие в себя: насос (P1) МТ24-25-100р с номинальной производительностью 25 л/мин; счётчики воды (MQ1, MQ2) СВ15-110; трёхходовой кран (BV1) ТИМ ½” (dy15). Диаметры условного прохода: насоса – dy15; трёхходового крана – d14, d12 (см. рис. 5); счётчиков воды – dy10.

Измерение расхода воды производилось для разных углов поворота штока крана, при этом за нулевое положение принималось положение, при котором все порты максимально открыты (см. рис. 2, а). Положительный угол поворота штока соответствует повороту против часовой стрелки.

Измерение расхода выполнялось следующим образом. Перед началом измерения производилась фотофиксация показаний счётчиков воды V_H . После чего включался секундомер. Через $t = 1$ мин производилась фотофиксация показаний счётчиков воды V_K . После чего производился расчёт расхода воды по формуле: $Q = \frac{V_K - V_H}{t}$. Показания счётчиков округлялись до 0,1 л. От момента включения насоса до начала измерения выдерживалась пауза 5 мин. Температура воды +35 °С.

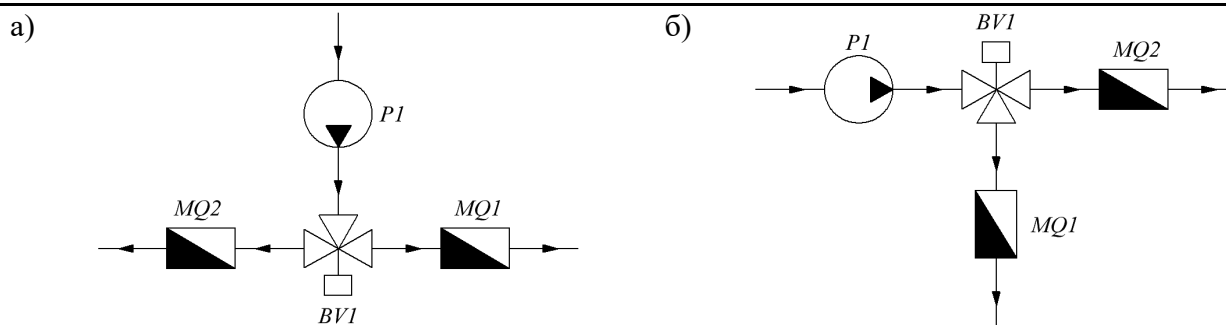


Рис. 4. Схемы исследования трёхходового крана: а – с подключением общего трубопровода к среднему порту; б – с подключением общего трубопровода к боковому порту

Относительный расход воды определялся по формулам: $Q1' = \frac{Q1}{Q1+Q2}$, $Q2' = \frac{Q2}{Q1+Q2}$. Суммарный расход воды во время эксперимента составлял $Q1 + Q2 = 20$ л/мин, что соответствует ламинарному режиму течения.

Результаты исследований и их обсуждение. Исследованные характеристики представлены на рис. 6-8.

Регулировочные характеристики электропривода при увеличении и при уменьшении сигнала управления несколько отличаются друг от друга. Максимальная погрешность характеристики по сравнению с идеальной, проходящей через точки (0 В; 0°) и (10 В; 90°), составляет 10 %. Характеристики могут быть описаны следующими формулами с точностью аппроксимации $R^2 = 0,9997$:

$$\alpha = 9,8038 \cdot U_y - 0,2931;$$

$$\alpha = 9,579 \cdot U_y - 0,1033.$$

Или усреднённой формулой:

$$\alpha = 9,7 \cdot U_y - 0,2, \quad (1)$$

где α – угол поворота штока, гр.; U_y – напряжение управления, В.

Зона нечувствительности не превышает 0,2 В, что соответствует углу поворота не более 2 %. Скорость вращения штока электропривода составляет порядка 4 гр./с.

Регулировочная характеристика трёхходового крана при подключении общего трубопровода к среднему порту (см. рис. 7) приведена только для поворота штока в одну сторону. При вращении штока в противоположную сторону характеристика будет аналогичной, но характеристики расходов в направлениях портов «В-А» и «В-Б» поменяются местами. Анализ этих характеристик показывает, что управление расходами воды возможно при изменении угла поворота штока в диапазоне от 40° (расход в направлении портов А и Б одинаковый) до 80° (весь расход направлен в порт А), а также в диапазоне от -40° (расход в направлении портов А и Б одинаковый) до -80° (весь расход направлен в порт Б). В диапазоне углов поворота -40...+40° расход воды практически не меняется и составляет порядка 50 % в каждый порт. Математически регулировочные характеристики для угла поворота штока 40...80° могут быть описаны следующими линейными формулами с точностью аппроксимации $R^2 = 0,975$:

$$Q_A = 0,0127 \cdot \alpha + 0,0034, \quad (2)$$

$$Q_B = -0,0127 \cdot \alpha + 0,9966, \quad (3)$$

где Q_A и Q_B – относительные расходы воды из порта В в порты А и Б соответственно; α – угол поворота штока, гр.

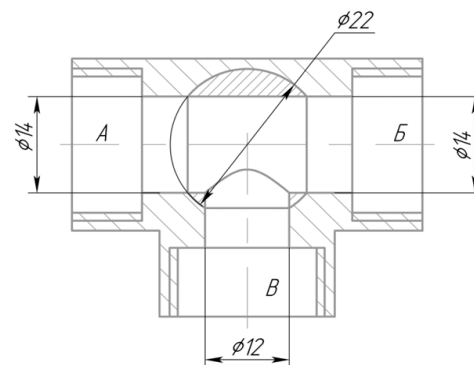


Рис. 5. Эскиз трёхходового крана

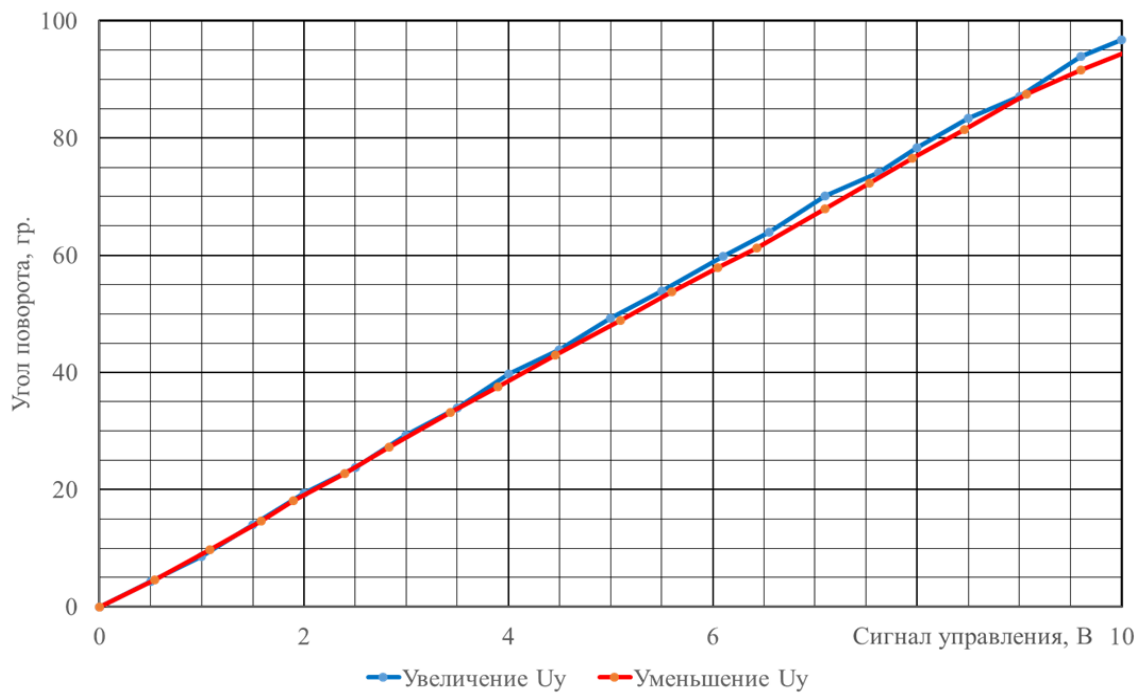


Рис. 6. Регулировочная характеристика электропривода ЭПК24 с сигналом управления 0-10 В

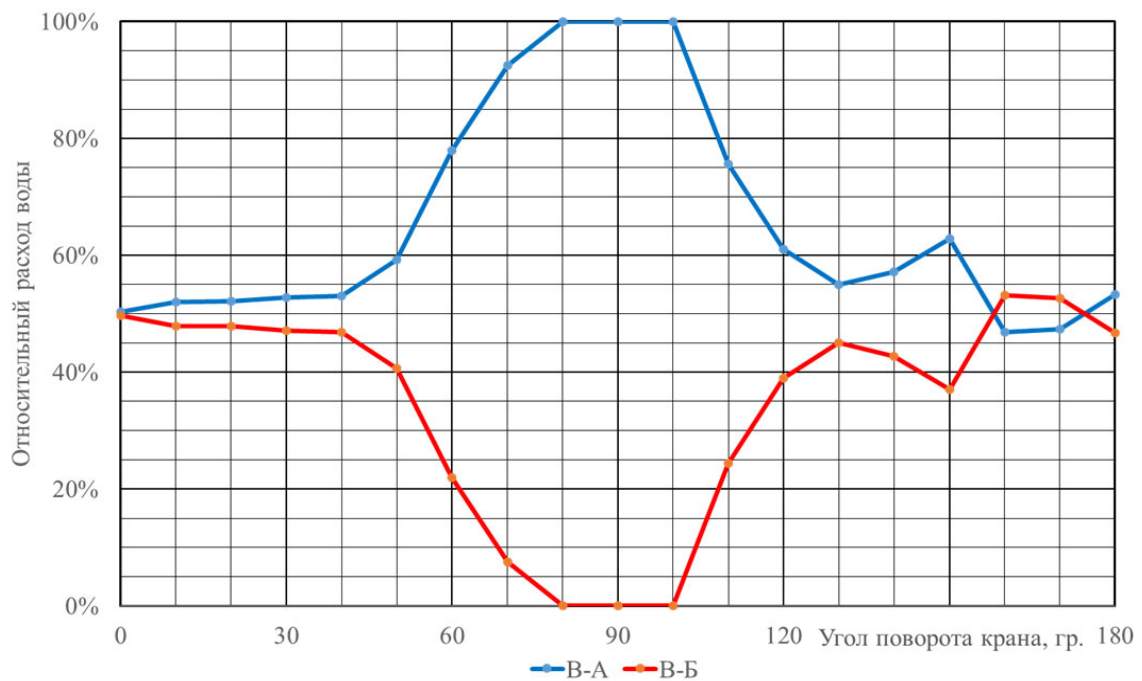


Рис. 7. Нагрузочная характеристика трёхходового крана при подключении общего трубопровода к среднему порту

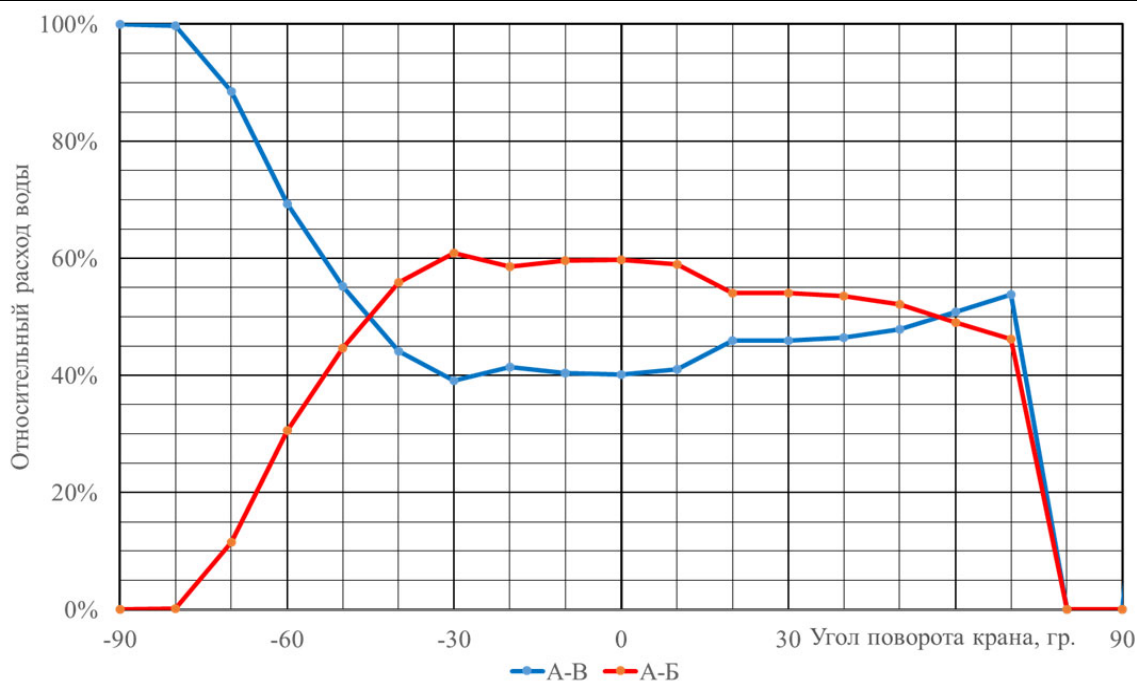


Рис. 8. Нагрузочная характеристика трёхходового крана при подключении общего трубопровода к боковому порту

Анализ регулировочной характеристики трёхходового крана при подключении общего трубопровода к боковому порту (см. рис. 8) показывает, что управление расходом воды возможно в диапазоне углов поворота штока от -80° (вся вода протекает в направлении портов А-В) до -30° (расходы воды распределяются в направлениях А-В = 40 % и А-Б = 60 % из-за разных диаметров портов Б и В). Математически регулировочные характеристики для угла поворота штока $-80 \dots -30^\circ$ могут быть описаны следующими линейными формулами с точностью аппроксимации $R^2 = 0,975$:

$$Q_B = 0,0129 \cdot \alpha + 1,0471, \quad (4)$$

$$Q_{\bar{B}} = -0,0129 \cdot \alpha - 0,0471, \quad (5)$$

где Q_B и $Q_{\bar{B}}$ – относительные расходы воды из порта А в порты В и Б соответственно; α – угол поворота штока, гр.

Выводы:

1. Трёхходовые поворотные краны могут быть использованы в качестве регулирующих элементов в системах автоматического управления тепловыми установками с ПИД-регуляторами.
2. Трёхходовые поворотные краны обеспечивают относительно линейные регулировочные характеристики при ламинарном режиме течения теплоносителя, но в достаточно узком диапазоне углов поворота штока: $40 \dots 80^\circ$ или $-40 \dots -80^\circ$ при подключении общего трубопровода к среднему порту; $-80 \dots -30^\circ$ при подключении общего трубопровода к боковому порту. Эти характеристики описываются формулами (2) – (5) с точностью аппроксимации не хуже $R^2 = 0,975$.
3. При использовании трёхходового крана с подключением общего трубопровода к среднему порту в качестве смесительного или распределительного устройства в диапазоне углов поворота штока $-40 \dots +40^\circ$ наблюдается зона нечувствительности, которая в совокупности с инерционностью электропривода может значительно ухудшить характеристики системы управления.
4. Электропривод поворотного крана отличается достаточно линейной регулировочной характеристикой, описываемой уравнением (1) с точностью аппроксимации не хуже $R^2 = 0,9997$, гистерезисом порядка 0,2 В или 2° и скоростью вращения штока 4 гр./с.



5. Полученные данные дают общее представление о регулировочных характеристиках трёхходовых регулировочных кранов и справедливы для малого расхода воды (суммарный расход 20 л/мин), отсутствия циркуляционных насосов и элементов со значительными гидравлическими сопротивлениями в трубопроводах отходящих портов. Для применения полученных зависимостей для реальных схем управления тепловыми установками необходимо повторение экспериментов с учётом реальных элементов гидравлических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудим, А. С. Интеллектуальная система компенсации нелинейностей систем автоматического управления / А. С. Гудим, Д. О. Савельев, В. В. Плохотнюк // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 4-11.
2. Дорофеева, Н. Л. Автоматизация температурных режимов в водяных системах отопления / Н. Л. Дорофеева, А. В. Бабик // Молодёжный вестник ИрГТУ. – 2021. – Т. 11. – № 2. – С. 67-70.
3. Клевцов, С. И. Компенсация нелинейности и температурной зависимости градуировочной характеристики датчика давления / С. И. Клевцов // Известия ТРТУ. – 2004. – № 1 (36). – С. 42-43.
4. Купова, А. В. Программная реализация нечёткого регулятора компенсирующего устройства на языке функциональных блоков / А. В. Купова, А. В. Купов, В. А. Соловьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № V (77). – С. 36-44.
5. Максимова, Н. А. Особенности моделирования развитых нечётких систем с алгоритмом вывода Мамдани для управления электроприводами постоянного тока / Н. А. Максимова, С. П. Черный, С. И. Сухорук // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I (49). – С. 37-50.
6. Опыт регулирования теплопотребления путём модернизации индивидуального теплового пункта / Т. И. Королева, В. В. Салмин, Е. Г. Ежов, Н. Ю. Иващенко // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2. – С. 109-114.
7. Паспорт (руководство по эксплуатации) электропривод ЭПК // Сенсорматика, 2015-2026. – URL: <https://sensormatica.ru/filemanager/download/78962> (дата обращения: 19.04.2026). – Текст: электронный.
8. Применение методов машинного обучения в задачах оценки технологических процессов / О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев, Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII (55). – С. 68-72.
9. Регулирующие (балансирующие) шаровые краны ТМ «Маршал» // ООО «АРМАТУРА М», 2026. – URL: <https://lztamarshal.ru/support/tekhnicheskaya-dokumentatsiya/reguliruyushchie-balansirovochnye-sharovye-krany-tm-marshal/> (дата обращения: 19.04.2026). – Текст: электронный.
10. Трёхходовой клапан для отопления с терморегулятором: виды и преимущества // Краны.су: портал о сантехнической арматуре, 2008-2026. – URL: <https://krani.su/art/item/trekhkhodovoy-klapan-dlya-otopleniya-stermoregulyatorom-vidy-i-preimushchestva-477/> (дата обращения: 19.04.2026). – Текст: электронный.
11. Хорошина, А. А. Схемы автоматизации индивидуального теплового пункта и подбор оборудования для удалённого контроля / А. А. Хорошина, И. А. Бахтина, В. М. Иванов // Ползуновский альманах. – 2018. – № 1. – С. 216-220.
12. Хрульков, В. Н. Особенности реализации нечётких алгоритмов управления на базе программируемых логических контроллеров / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 52-62.
13. Черный, С. П. Моделирование развитой нечёткой системы управления с интеграцией внутренних модулей на основе оператора умножения / С. П. Черный, А. В. Охотников // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 102-108.
14. Черный, С. П. Применение многокаскадных нечётких систем для реализации процедур управления в производственно-технологических процессах / С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № VII (87). – С. 43-48.
15. Шулепина, П. А. Автоматизация индивидуального теплового пункта / П. А. Шулепина, А. А. Михайлова // Modern Science. – 2021. – № 8. – С. 220-224.
16. Control Valve Characteristics // Spirax Sarco Limited, 2026. – URL: <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/control-hardware-electric-pneumatic-actuation/control-valve-characteristics#article-top> (дата обращения: 19.04.2026). – Текст: электронный.

Магола Д. С.
D. S. Magola

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АГЕНТАМИ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ
В БИОИНСПИРИРОВАННОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ОБУЧЕНИЯ
С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ**

**ADAPTIVE CONTROL OF ANOMALY DETECTION AGENTS IN A BIO-INSPIRED SENSOR
SYSTEM BASED ON REINFORCEMENT LEARNING**

Магола Дмитрий Степанович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: magola.ds@knastu.ru.

Dmitry S. Magola – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: magola.ds@knastu.ru.

Аннотация. В работе предлагается развитие ранее разработанной биоинспирированной системы обнаружения аномалий SpiderWeb Security System (SWSS), основанной на метафоре паутины как распределённой сенсорной системы. Вместо детерминированных правил перемещения и исследования агентов-«пауков» вводится механизм адаптивного управления на основе обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL). Формализована марковская задача принятия решений (MDP) для автономного агента, включающая пространство состояний, дискретные действия и комбинированную функцию награды. Выполнено экспериментальное сравнение RL-агента с детерминированным агентом исходной модели SWSS на синтетических сценариях компьютерных атак. Показано, что предложенный подход повышает эффективность в среднем по всем типам атак на 15 %. Полученные результаты говорят о возможностях развития идеи создания полностью автономных, самонастраивающихся систем мониторинга киберугроз.

Summary. This paper proposes a further development of the previously developed bioinspired anomaly detection system, SpiderWeb Security System (SWSS), based on the metaphor of a spiderweb as a distributed sensory system. Instead of deterministic rules for movement and investigation of spider-agents, an adaptive control mechanism based on reinforcement learning (RL) is introduced. A Markov decision process (MDP) for an autonomous agent is formalized, including a state space, discrete actions, and a combined reward function. An experimental comparison of the RL agent with the deterministic agent of the original SWSS model is performed on synthetic computer attack scenarios. It is shown that the proposed approach increases the average efficiency across all attack types 15 %. The obtained results indicate the potential for developing fully autonomous, self-tuning cyber threat monitoring systems.

Ключевые слова: обнаружение аномалий, информационная безопасность, адаптивная сенсорная система, биоинспирированные алгоритмы, обучение с подкреплением.

Key words: anomaly detection, information security, adaptive sensory system, bioinspired algorithms, reinforcement learning.

УДК 519.711.3

Введение. Современные целевые кибератаки (Advanced Persistent Threats, АРТ) характеризуются многоэтапностью, длительным скрытым присутствием в инфраструктуре и использованием легитимных инструментов, что делает их труднообнаружимыми для классических сигнатурных систем обнаружения вторжений (IDS). Поведенческие системы (UEBA) частично решают проблему, однако страдают от высокого уровня ложных срабатываний и требуют сложной ручной настройки базовых профилей нормальной активности.

В работе [8] была предложена биоинспирированная система обнаружения аномалий SpiderWeb Security System (SWSS), в которой компьютерная сеть представляется в виде адаптивного графа, угрозы распространяются по принципу «вибрации паутины», а автономные агенты-«пауки» перемещаются по графу, расследуют подозрительные узлы и инициируют нейтрализацию

угроз. Модель показала высокую эффективность на синтетических данных, однако поведение агентов в ней определялось жёсткими детерминированными правилами, что ограничивает адаптивность системы к изменяющимся условиям сети и новым типам атак.

Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) зарекомендовало себя как эффективный инструмент для управления автономными агентами в динамических средах с частичной наблюдаемостью [1, 3]. В отличие от детерминированных стратегий, RL-агент способен самостоятельно вырабатывать оптимальную политику поведения на основе проб и ошибок, максимизируя накопленную награду.

Целями настоящей работы являются моделирование и экспериментальное исследование RL-управления агентами-«пауками» в системе SWSS, обеспечивающего повышение эффективности обнаружения аномалий по сравнению с детерминированной стратегией.

Постановка задачи. Для управления агентом-«пауком» в системе SWSS задача принятия решений формализуется в виде марковского процесса принятия решений (Markov Decision Process, MDP), задаваемого кортежем:

$$M = (S, U, P, r, \gamma_{disc}),$$

где S – пространство состояний среды (каждое состояние описывает всю информацию, необходимую агенту для принятия решения: уровень вибрации узлов, историю посещений, остаточный ресурс и т. д.); U – множество допустимых действий агента (перемещение к соседу, расследование, нейтрализация, подготовка отчёта и ожидание); $P = P(s' | s, u)$ – вероятность перехода из состояния s в состояние s' при выполнении действия u (в детерминированной среде SWSS переходы определяются динамикой вибрации узлов и перемещениями агента); $r = r(s, u)$ – функция награды, определяющая немедленное вознаграждение (или штраф) при выполнении действия u в состоянии s (служит сигналом обратной связи для агента); $\gamma_{disc} \in [0, 1)$ – коэффициент дисконтирования, определяющий вес будущих наград относительно текущих.

Состояние среды в момент времени t для одного агента определяется вектором

$$s(t) = (\phi_c(t), \{\phi_n(t)\}, h, res(t)),$$

где $\phi_c(t)$ – уровень вибрации узла, в котором находится агент; $\{\phi_n(t)\}$ – вектор уровней вибрации соседних узлов; h – бинарный вектор истории посещения за K шагов; $res(t)$ – показатель, моделирующий ограниченное время жизни агента (остаточный ресурс). Значение, равное 1, соответствует началу работы агента, а значение, равное 0 – полному исчерпанию ресурсов, после чего агент прекращает функционировать. Параметр направлен на эффективное использование агентом своих ресурсов.

Размерность пространства состояний фиксирована и составляет

$$\dim(S) = R1 + N_{max} + K + R2,$$

где $R1 = 1$ – размерность уровня вибрации текущего узла; N_{max} – максимальное количество соседей, учитываемых при формировании наблюдения (по умолчанию значение не превышает 10); K – глубина истории посещений (по умолчанию $K = 10$); $R2 = 1$ – размерность остаточного ресурса.

Агент может выполнять дискретные действия из множества $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$:

- перемещение к соседу: агент переходит в один из соседних узлов;
- расследование: углублённый анализ текущего узла;
- нейтрализация: устранение подтверждённой угрозы;
- отчёт: формирования отчёта о нейтрализации;
- ожидание: агент остаётся на месте.

Общее количество действий: $|U| = N_{max} + 4$. Мощность множества U состоит из количества возможных действий по перемещению в соответствии с числом соседей и 4 дополнительными действиями: расследование, нейтрализация, отчёт, ожидание. Такая структура позволяет агенту выбирать не только что делать, но и куда двигаться.

Функция награды имеет следующий вид:

$$r(s, u) = r_d + r_n + r_f + r_m + r_w + r_e,$$

где r_d – обнаружение реальной аномалии (при расследовании), $r_d = +10$; r_n – успешная нейтрализация, $r_n = +20$; r_f – ложное срабатывание (при расследовании), $r_f = -5$; r_m – перемещение, $r_m = -0.1 \times d$, где d – расстояние; r_w – ожидание, $r_w = -0.05$ – штраф за бездействие; r_e – исследование нового узла (первое посещение узла), $r_e = +0.2$.

Коэффициент дисконтирования $\gamma = 0.99$ выбран для ориентации на долгосрочную перспективу. Значение, близкое к 1, означает, что агент учитывает будущие награды почти так же сильно, как и текущие, что важно для многоэтапных атак, где полезное действие может не давать немедленной награды.

Моделирование обучения с подкреплением. Для решения сформулированной MDP-задачи был использован алгоритм обучения с подкреплением на основе методов градиента политики – Proximal Policy Optimization (PPO) [2]. PPO относится к семейству методов, где одновременно обучаются две функции:

1. Политика $\pi_\omega(u|s)$ – вероятностное распределение действий в каждом состоянии. Определяет, какое действие выбрать. Политика аппроксимируется нейронной сетью [4–7; 9–10], которая на входе получает состояние s , а на выходе выдаёт вероятности каждого возможного действия. Обучение направлено на увеличение вероятности действий, приводящих к высокой награде.

2. Функция ценности $V_\psi(s)$ – оценка ожидаемой суммарной награды из состояния s . Определяет, насколько хорошо текущее состояние. Функция ценности аппроксимируется нейронной сетью – двухслойным полносвязанным персептроном [7].

Оптимизация политики в PPO осуществляется через максимизацию целевой функции L :

$$L_{\pi_\omega} = \text{mean}[\min(r \times Adv, \text{clip}(\rho, 1 - c, 1 + c) \times Adv)],$$

где mean – среднее арифметическое; \min – операция взятия минимального значения; $\rho = \pi_{\text{new}}(u|s)/\pi_{\text{old}}(u|s)$ – отношение вероятностей выбора действия u в состоянии s согласно новой (обновляемой) политике и выбора действия u в состоянии s согласно старой политике; $\text{clip}(x, \min, \max)$ – функция, ограничивающая x диапазоном $[\min, \max]$; c – параметр функции clip (по умолчанию $c = 0,2$); Adv – показатель преимущества. Преимущество Adv оценивается с помощью метода Generalized Advantage Estimation (GAE) [2]. При значении больше 0 действие лучше среднего, при значении меньше 0 действие хуже среднего.

PPO обновляет политику, но не позволяет быть слишком сильным изменениям за 1 шаг.

Обучение функции ценности производится минимизацией среднеквадратичной ошибки:

$$L_{V_\psi} = \text{mean}[(V_\psi(s) - G)^2],$$

где mean – среднее арифметическое по батчу; $V_\psi(s)$ – предсказанная ценность состояния; G – фактическая суммарная накопленная награда, вычисляемая как дисконтированная сумма мгновенных наград от текущего шага до конца эпизода.

Цель обучения – минимизировать разницу между предсказанием и реальностью, т. е.

$$V_\psi(s) \rightarrow G.$$

Таким образом, PPO обеспечивает стабильное обучение политики $\pi_\omega(u|s)$ за счёт ограничения изменений на каждом шаге (clipping), а функция ценности $V_\psi(s)$ служит базой для вычисления преимущества Adv , направляющего обновления политики. Совместное обучение политики и функции ценности позволяет агенту постепенно улучшать стратегию поведения, максимизируя суммарную дисконтированную награду.

Для аппроксимации политики $\pi_\omega(u|s)$ и функции ценности $V_\psi(s)$ используются две отдельные нейронные сети: актер и критик. Обе сети имеют двухслойную полносвязную архитектуру [7]:

- входной слой: размерность $\dim(S) = 1 + N_{\text{max}} + K + 1$;
- скрытые слои: два слоя по 128 нейронов с активацией ReLU;

– выходной слой актора: $|U| = N_{\max} + 4$ нейронов с активацией Softmax (вероятности действий);

– выходной слой критика: 1 нейрон с линейной активацией (оценка ценности состояния).

Параметры сетей обновляются с использованием оптимизатора Adam. Градиенты вычисляются методом обратного распространения ошибки.

Результаты моделирования. С учётом описанного математического аппарата обучения с подкреплением и использования RL-агентов в системе SWSS был включён соответствующий функционал поведения агентов. Обновлённый интерфейс представлен на рис. 1.

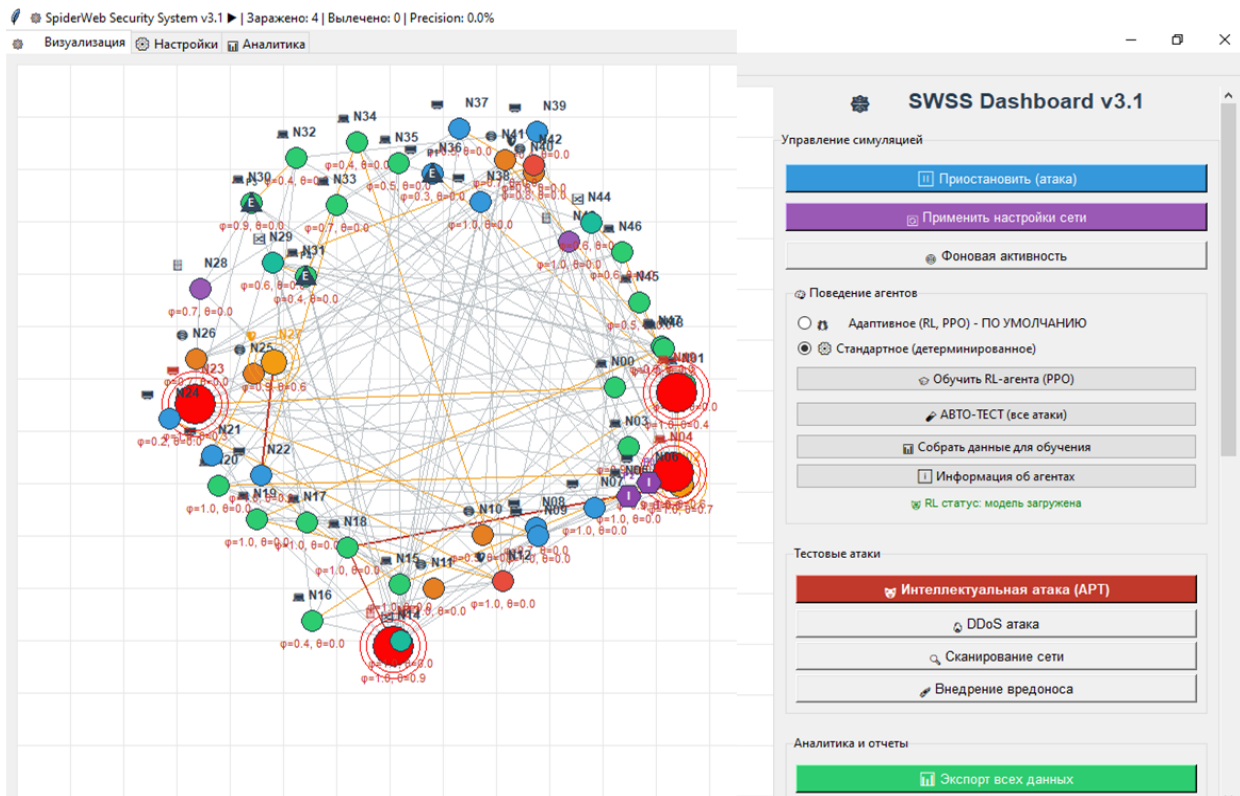


Рис. 1. Система с выбором поведения агентов

Обучение агента с подкреплением проводилось с использованием алгоритма PPO на основе следующих параметров:

- количество шагов обучения: 300 000;
- размер батча: 64;
- количество шагов между обновлениями нейронной сети: 2048 шагов;
- длительность эпизода: 500 шагов;
- количество эпох обучения: 10;
- тип атак: многоуровневая (APT), отказ в обслуживании (DDoS), сканирование сети (Scan), внедрение вредоносного ПО (Malware);
- коэффициент clipping = 0.2;
- коэффициент GAE = 0.95.

При обучении каждые 2048 шагов выполнялось обновление параметров нейронных сетей (10 эпох, батч 64). Всего было выполнено 146 итераций обновления, что обеспечило устойчивую сходимости политики и стабилизацию суммарной награды.

Для оценки эффективности предложенного RL-подхода было проведено экспериментальное сравнение с детерминированным агентом исходной модели SWSS. Эксперименты проводились на синтетических графах со следующими параметрами:

- количество узлов: 50;
- количество агентов: 1;
- длительность эпизода: 500 шагов;
- тип атак: APT, DDoS, Scan, Malware;
- количество эпизодов на каждый тип атаки: 10.

В качестве основной метрики использовалась суммарная награда за эпизод, которая вычислялась по формуле функции награды. Дополнительно рассчитывалась эффективность как отношение награды к числу шагов в эпизоде.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1-3 и на рис. 2-4, на которых закрашенные столбцы представляют собой результаты детерминированного агента, а заштрихованные – результаты RL-агента.

Таблица 1

Сравнение наград детерминированного и RL-агентов

Тип атаки	Детерминированный агент	RL-агент (PPO)	Разница	Улучшение, %
APT	4351.3	4985.3	+634.0	+15
DDoS	4413.3	4983.5	+570.2	+13
Scan	3947.6	4984.1	+1033.5	+26
Malware	4371.0	4746.9	+375.9	+9
Среднее	4270.8	4925.7	+654.9	+15

Таблица 2

Сравнение эффективности детерминированного и RL-агентов (награда/шаги)

Тип атаки	Детерминированный агент	RL-агент (PPO)	Улучшение, %
APT	8.703	9.971	+15
DDoS	8.827	9.967	+13
Scan	7.895	9.968	+14
Malware	8.742	9.494	+9
Среднее	8.542	9.850	+15

Таблица 3

Количественная оценка стратегий детерминированного и RL-агентов

Стратегия	Детерминированный агент	RL-агент	Эффект
Средняя длина перемещения за эпизод	~250 шагов	~220 шагов	Экономия ~12 %
Количество расследований за эпизод	~15	~12	Снижение на 20 %
Доля успешных расследований	~85 %	~95 %	Рост на 10 %
Время реакции на угрозу	~50 шагов	~35 шагов	Ускорение на 30 %

Полученные результаты демонстрируют следующие закономерности:

1. Преимущество RL-агента на всех типах атак. RL-агент стабильно превосходит детерминированного агента по суммарной награде на всех типах атак. Наибольшее улучшение достигнуто на атаке типа Scan (+26 %), где детерминированный агент показал наихудший результат (3947.6). На атаках APT, DDoS и Scan RL-агент достиг практически максимальной награды, что свидетельствует об оптимальном выполнении задачи.

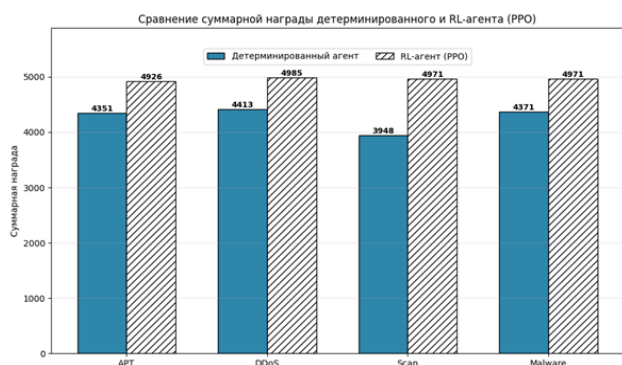


Рис. 2. Сравнение наград

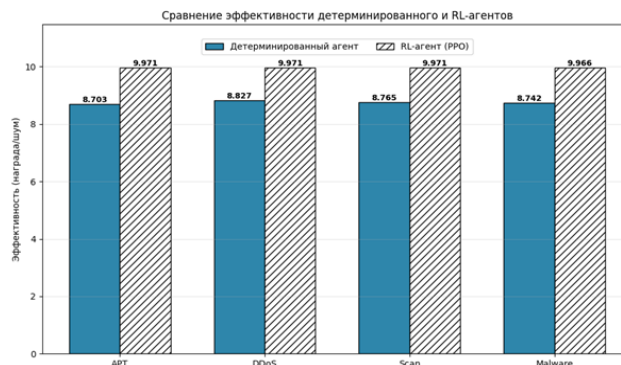


Рис. 3. Сравнение эффективности

2. Эффективность использования ресурсов. Средняя эффективность RL-агента (9.852) выше, чем у детерминированного (8.54), что означает более высокую награду за каждый шаг. Это подтверждает, что RL-агент не только лучше обнаруживает угрозы, но и делает это быстрее и с меньшими затратами ресурсов.

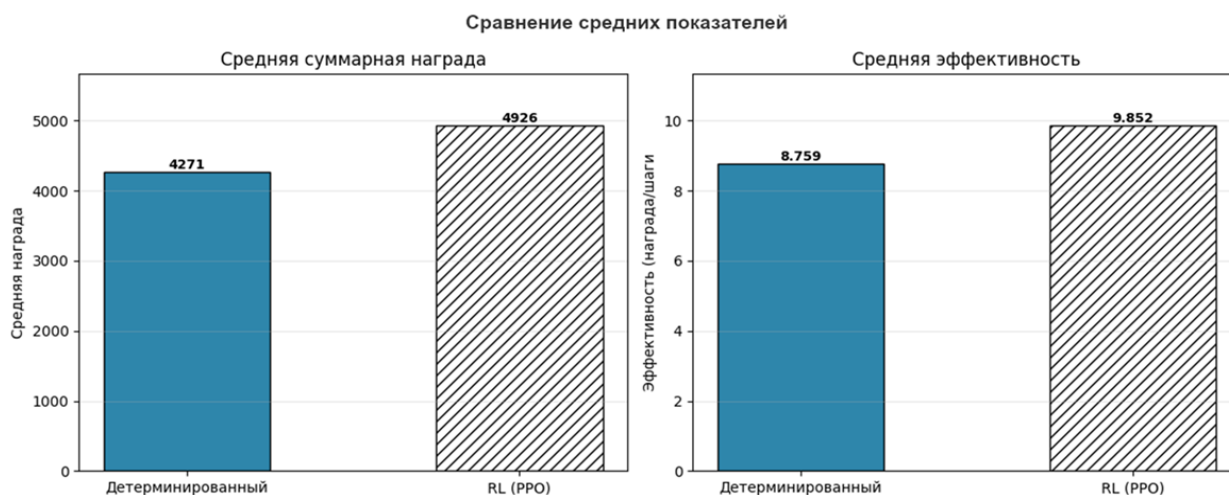


Рис. 4. Сравнение средних показателей

3. Стабильность результатов. RL-агент демонстрирует стабильно высокие результаты на всех типах атак (от 4746.9 до 4985.3), в то время как детерминированный агент показывает заметную вариативность (от 3947.6 до 4413.3). Это говорит о большей устойчивости RL-подхода к различным сценариям атак.

В ходе анализа выученной политики RL-агента были выявлены следующие стратегии, обеспечившие его преимущество над детерминированным агентом:

1. Оптимизация маршрутов. RL-агент сокращает путь к заражённым узлам по сравнению с детерминированным агентом. Если детерминированный агент следует фиксированной целевой функции, что приводит к избыточным перемещениям, то RL-агент вырабатывает оптимальную траекторию, минимизируя количество шагов до цели. Это подтверждается более высокой эффективностью RL-агента (9.85 против 8.54 у детерминированного).

2. Снижение ложных срабатываний. Благодаря контекстному анализу RL-агент реже реагирует на изолированные шумовые всплески. Детерминированный агент, руководствуясь жёсткими правилами, вынужден расследовать любой узел, превысивший порог вибрации, что приводит к дополнительным затратам ресурсов. RL-агент, напротив, оценивает паттерн распространения вибрации и игнорирует единичные выбросы, не подтверждённые активностью соседних узлов.

3. Адаптивная глубина расследования. При низком уровне угрозы RL-агент сокращает время анализа, экономя ресурсы. Детерминированный агент всегда выполняет расследование в течение фиксированного периода, тогда как RL-агент способен досрочно прекращать расследование, если уровень вибрации не подтверждает наличие угрозы. Это особенно важно при работе с ограниченным ресурсом агента.

4. Приоритизация критических узлов. RL-агент вырабатывает стратегию циклического патрулирования узлов с высокой центральностью. В отличие от детерминированного агента, который перемещается исключительно в сторону максимальной вибрации, RL-агент учитывает топологию сети и уделяет повышенное внимание узлам, играющим ключевую роль в распространении угроз (например, маршрутизаторы, файловые серверы). Это позволяет ему быстрее реагировать на латеральное перемещение атакующего.

Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода. RL-агент, обученный по алгоритму PPO, превосходит детерминированного агента в среднем на 15 % по суммарной награде и на 15 % по эффективности.

Следует отметить, что предложенный подход имеет следующие ограничения:

- Чувствительность к сетевому шуму. В условиях реального сетевого трафика и высокого уровня шума требуется дополнительная фильтрация событий. Хотя RL-агент демонстрирует лучшую устойчивость к ложным срабатываниям по сравнению с детерминированным агентом, при высоком уровне шума может потребоваться предварительная обработка данных (например, с использованием вейвлет-фильтрации).

- Вычислительная сложность. При большом количестве узлов (более 100) и связей расчёт вибрации и поведения агентов может требовать оптимизации. Основные вычислительные затраты связаны с распространением вибрации по графу, принятием решений агентами (время вывода нейронной сети), прогнозированием новых связей.

- Гиперпараметры требуют тонкой настройки под конкретную сетевую среду. Неоптимальный выбор параметров может привести к снижению эффективности обнаружения или росту ложных срабатываний.

- Ограничения обучения. RL-агент обучался в среде с одним агентом. При масштабировании системы до нескольких агентов требуется переход к многоагентному обучению с подкреплением, т. к. текущая политика не учитывает взаимодействия между агентами.

- Синтетический характер данных. Все эксперименты проводились на синтетических графах и сценариях атак. Реальные сети имеют более сложную топологию, нестационарную нагрузку и трудно предсказуемые паттерны аномалий, что может потребовать дополнительной адаптации модели.

Заключение. В рамках настоящей работы был разработан и экспериментально апробирован метод адаптивного управления агентами-«пауками» в биоинспирированной системе обнаружения аномалий SWSS на основе обучения с подкреплением. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

- формализация MDP-задачи для агента SWSS, включающая пространство состояний $s(t)$, множество дискретных действий U и комбинированную функцию награды $r(s,u)$, обеспечивает корректную постановку задачи обучения;

- экспериментальное сравнение RL-агента (обученного по алгоритму PPO) с детерминированной стратегией исходной модели SWSS на синтетических графах (50 узлов, 500 шагов, 10 эпизодов на тип атаки) показало среднее улучшение по всем типам атак (15 %) и по эффективности (15 %);

- анализ эффективности показал, что RL-агент достиг практически максимальной награды на атаках APT, DDoS и Scan, что свидетельствует об оптимальности выученной политики;

- анализ выученной политики выявил следующие нетривиальные стратегии: оптимизация маршрутов – сокращение пути к заражённым узлам; снижение ложных срабатываний – контекстное игнорирование изолированных шумовых всплесков; адаптивная глубина расследования –

досрочное прекращение анализа при низком уровне угрозы; приоритизация критических узлов – циклическое патрулирование узлов с высокой центральностью.

Перспектива дальнейших исследований включает:

- многоагентное обучение – переход к кооперативному поведению нескольких агентов-«пауков» с разделением зон ответственности и обменом информацией. Предварительные оценки показывают, что использование 3-5 агентов может повысить полноту обнаружения при сохранении приемлемого уровня ложных срабатываний;
- адаптация к динамической топологии – разработка методов дообучения (fine-tuning) политики при изменении структуры графа (добавление/удаление узлов, изменение связей) без полного переобучения;
- использование реальных сетевых данных – валидация предложенного подхода на открытых наборах данных сетевого трафика с размеченными атаками (CICIDS, NSL-KDD, UNSW-NB15);
- объяснимость решений – разработка методов интерпретации действий RL-агента для повышения доверия со стороны администраторов систем информационной безопасности;
- гибридные стратегии – комбинирование детерминированных правил для стандартных ситуаций и RL-политики для нештатных сценариев, что может снизить вычислительные затраты и повысить надёжность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mnih, V. Human-level control through deep reinforcement learning / V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver [et al.] // Nature. – 2015. – Vol. 518, No. 7540. – P. 529-533.
2. Schulman, J. Proximal Policy Optimization Algorithms / J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal [et al.] // arXiv preprint. – 2017. – arXiv:1707.06347.
3. Sutton, R. S. Reinforcement Learning: An Introduction / R. S. Sutton, A. G. Barto. – 2nd ed. – Cambridge: MIT Press, 2018. – 552 p.
4. Амосов, О. С. Сетевая классификация атак в задачах информационной безопасности на основе интеллектуальных технологий, фрактального и вейвлет-анализа / О. С. Амосов, Д. С. Магола, С. Г. Баена // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № IV-1 (32). – С. 19-29.
5. Амосов, О. С. Фрактальный и вейвлет-анализ телекоммуникационных рядов информационной системы / О. С. Амосов, Д. С. Магола, Н. В. Муллер // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 28-36.
6. Классификация сетевых атак на основе глубоких нейронных сетей с 1D-свёрточными и рекуррентными слоями / О. С. Амосов, Д. С. Магола, Ф. Ф. Пашенко, С. Г. Амосова // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17-20 июня 2019. – М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 2091-2095.
7. Круглов, В. В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
8. Магола, Д. С. Моделирование адаптивной сенсорной системы обнаружения аномалий на основе биоинспирированного агентного подхода / Д. С. Магола // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2026. – № I (89). – С. 64-71.
9. Марков, Р. А. Исследование нейросетевых технологий для выявления инцидентов информационной безопасности / Р. А. Марков, В. В. Бухтояров, А. М. Попов // Молодой учёный. – 2015. – № 23. – С. 55-60.
10. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.

Носков С. И., Беляев С. В., Антипина Н. В.
УТОЧНЕНИЕ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СМЕШАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Носков С. И., Беляев С. В., Антипина Н. В.
S. I. Noskov, S. V. Belyaev, N. V. Antipina

УТОЧНЕНИЕ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СМЕШАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

REFINEMENT OF THE ALGORITHM FOR CONSTRUCTING A LINEAR REGRESSION BASED ON THE APPLICATION OF THE MIXED PARAMETER ESTIMATION METHOD

Носков Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Sergey I. Noskov – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Information Systems and Information Security Department, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Беляев Сергей Вячеславович – ассистент кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: bsv2001@list.ru.

Sergey V. Belyaev – Assistant, Information Systems and Information Security Department, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: bsv2001@list.ru.

Антипина Наталья Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Математические методы и цифровые технологии» Байкальского государственного университета (Россия, Иркутск). E-mail: natant2012@mail.ru.

Natalya V. Antipina – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Mathematical Methods and Digital Technologies Department, Baikal State University (Russia, Irkutsk). E-mail: natant2012@mail.ru.

Аннотация. В статье дан краткий обзор публикаций по анализу свойств исходной информации при построении математических, к примеру регрессионных, моделей сложных систем. В частности, рассмотрены: методология определения качества грунтовых вод на водоразделах с использованием гидрохимических данных, взаимосвязь между предпроектным планированием и успехом проекта с помощью отраслевых проектных данных и использования методов статистического регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей, модель множественной линейной регрессии для определения уязвимости водоносного горизонта к загрязнению нитратами подземных вод, модель линейной регрессии для определения величины добычи нефти. Разработан способ точной реализации метода смешанного оценивания параметров линейной регрессионной модели, основанный на решении задачи линейно-булева программирования. Использование этого метода позволяет одновременно решить две задачи: построить разумный компромисс между всеми применёнными методами оценивания параметров и разбить исходную выборку на подвыборки, каждая из которых соответствует «своему» методу. Построено уточнение регрессионной модели грузооборота автомобильного транспорта Российской Федерации.

Summary. This article provides a brief overview of publications on the analysis of the properties of initial information when constructing mathematical models, in particular regression models, of complex systems. Specifically, the article examines: a methodology for determining groundwater quality in watersheds using hydrochemical data; the relationship between pre-project planning and project success using industry-specific project data and the use of statistical regression analysis methods and artificial neural networks; a multiple linear regression model for determining aquifer vulnerability to groundwater nitrate contamination; and a linear regression model for determining oil production. A method for accurately implementing a mixed parameter estimation method for a linear regression model, based on solving a linear Boolean programming problem, has been developed. This method allows for the simultaneous solution of two problems: constructing a reasonable compromise between all applied parameter estimation methods and dividing the initial sample into subsamples, each corresponding to its own method. A refinement of the regression model of freight turnover of road transport in the Russian Federation has been constructed.



Ключевые слова: линейная регрессионная модель, метод смешанного оценивания параметров, булевы переменные, задачи линейного и линейно-булева программирования, грузооборот автомобильного транспорта.

Key words: linear regression model, mixed parameter estimation method, Boolean variables, linear and linear-Boolean programming problems, road freight turnover.

УДК 519.852

Введение. Построение математических моделей, в частности регрессионного типа, при исследовании сложных систем часто сопровождается анализом свойств исходной информации. Так, в работе [1] представлена многоуровневая регрессионная модель для расчёта величины и значимости влияния показателей окружающей среды и характеристик домохозяйств на потребление энергии в жилых помещениях (REC). Используются и проанализированы данные США за 2009 год, состоящие из 10 838 уникальных случаев. Выявлено 26 основных факторов, определяющих REC: группы населения, тип жилья, размер дома, использование оборудования для обогрева помещений, размер домохозяйства, использование кондиционеров и т. д. В статье [2] описана методология определения качества грунтовых вод на водоразделах с использованием гидрохимических данных, сочетающая множественную линейную регрессию и моделирование структурными уравнениями. Произведён анализ этих данных для изучения состава проб подземных вод фреатического водоносного горизонта и происхождения минерализации воды в бассейне реки Макнасси (центральный Тунис). Исследование [3] посвящено изучению влияния автомобильного и железнодорожного шумов на цены на недвижимость. Используется метод гедонической регрессии на шведском массиве данных, который содержит информацию как об автомобильном, так и о железнодорожном шуме для каждого объекта недвижимости. Установлено, что дорожный шум оказывает большее негативное влияние на цены на недвижимость, чем железнодорожный. Это вполне согласуется с данными акустической литературы. В публикации [4] изучается взаимосвязь между предпроектным планированием и успехом проекта с помощью отраслевых проектных данных и использования двух методов: статистического регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей (ANNS). Собрана и исследована информация о предпроектном планировании и эффективности по 62 промышленным и 78 строительным проектам, общая стоимость строительства которых составляет около 5 миллиардов долларов США. В [5] для региона Осона (Северо-Восточная Испания) разработана модель множественной линейной регрессии для определения уязвимости водоносного горизонта к загрязнению нитратами подземных вод. Модель основана на наборе данных о содержании нитратов в 57 частных скважинах в 2010 году. Для статистического определения ключевых параметров, определяющих концентрацию нитратов в подземных водах на исследуемой территории, было проанализировано до 70 независимых переменных.

В статье [6] представлен подход с ограниченным правдоподобием для выбора переменных в моделях с конечной комбинацией регрессий. Метод предполагает введение штрафных санкций, которые зависят от величины коэффициентов регрессии и структуры смеси. Показано, что данный способ непротиворечив при выборе переменных. Разработан адаптивный к данным алгоритм выбора параметров настройки для эффективных численных расчётов. В исследовании [7] предлагается модель линейной регрессии для определения величины добычи нефти. Она учитывает такие независимые переменные, как температура в скважине и давление в насосно-компрессорных трубах. Предлагаемый метод позволяет с высокой точностью прогнозировать и анализировать фактическую величину добычи, получая при этом весьма интересные и неочевидные результаты. В [8] на основе анализа данных по индексу цен на жильё в США предлагается непараметрическая конечная комбинация регрессионных моделей. Изучается проблема идентифицируемости предложенных моделей, и разрабатывается процедура оценки с использованием базовой регрессии. Далее систематически изучаются свойства выборки для предложенных оценок и устанавливается их асимптотическая нормальность. В публикации [9] проведено сравнительное исследование оценки эффективности регрессионного и байесовского методов, когда они используются для характери-

стики модуля деформации на основе одного и того же набора данных для массива горных пород, полученных с двух проектных площадок. В исследовании также изучается эффективность различных типов уравнений регрессии при оценке модуля деформации. В статье [10] изучается проблема обучения при передаче данных в рамках многомерной регрессии с множественными ответами, которая связана с повышением точности оценки путём передачи знаний из информативных исходных наборов данных. Предлагаемый метод прямого отбора источников информации является новым по сравнению с существующей системой трансферного обучения за счёт более глубокого теоретического понимания и существенных методологических инноваций.

Следует также отметить следующие публикации: анализ методов сглаживания, направленных на улучшение точности поиска информации в системах обработки больших объёмов данных [11], нейросетевая модель алгоритма ранжирования текстовых документов в базах данных систем геомониторинга [12], исследование влияния состязательных атак на качество регрессионных моделей машинного обучения [13], итерационное выпуклое оценивание линейных регрессионных моделей в условиях стохастической неоднородности данных [14], способ построения линейных регрессионных моделей, основанный на порождении и выборе признаков [15].

Рассмотрим линейное регрессионное уравнение:

$$y_k = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y – зависимая, а x_i – i -я независимая переменные; α_i – i -й подлежащий вычислению параметр; ε – ошибки аппроксимации; k – номер наблюдения; n – их число.

Представим уравнение (1) в матричной форме:

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

где $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$; $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)^T$; $\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)^T$; $X = (n \times (m + 1))$ – матрица с компонентами x_{ki} , $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{0, m}$. При этом $x_{k0} = 1$, $k = \overline{1, n}$.

В работе [16] приведён метод смешанного оценивания (МСО) параметров регрессии. Его суть состоит в вычислении вектора α *одновременно*, в рамках единой задачи, с помощью нескольких известных методов, каждый из которых «работает» на своём участке выборки данных (X, y) . Формально это выглядит следующим образом.

Пусть при построении модели (1) задействовано L методов оценивания параметров, каждому из которых соответствует своя функция потерь $J_{v_j}^{N_j}(\alpha)$, $j = \overline{1, L}$:

$$J_{v_j}^{N_j}(\alpha) = \sum_{k \in N_j} |\varepsilon_k|^{v_j}, v_j \geq 1. \quad (2)$$

Заметим, что при $j = L$ подразумевается предельный переход $v_L \rightarrow \infty$ и используется $J_{\infty}^{N_L}(\alpha) = \max_{k \in N_L} |\varepsilon_k|$. При этом для $v_j = 1$ функция потерь (2) соответствует методу наименьших модулей (МНМ), а для $v_L \rightarrow \infty$ – методу антиробастного оценивания (МАО), причём имеет место равенство [17]

$$J_{\infty}^{N_L}(\alpha) = \max_{k \in N_L} |\varepsilon_k|. \quad (3)$$

Использование МСО предполагает разбиение исходной выборки данных с номерами наблюдений из индексного множества $N = \{1, 2, \dots, n\}$ на L непересекающихся подвыборок N_j , $j = \overline{1, L}$:

$$N = \bigcup_{i=1}^L N_i, N_i \cap N_j = \emptyset, i \neq j.$$

Задача состоит в минимизации обобщённой функции потерь $J(\alpha, N_1, \dots, N_L)$:

$$J(\alpha, N_1, \dots, N_L) = \sum_{j=1}^L \rho_j \sum_{k \in N_j} |\varepsilon_k|^{v_j}, \quad (4)$$

где $\rho_j = 1 / |N_j|$, здесь $|N_j|$ – число элементов в множестве N_j , а при $v_L \rightarrow \infty$ $\rho_L = 1$, т. к. в соответствии с (3) предполагается минимизация лишь одной – максимальной – ошибки аппроксимации.

Таким образом, в соответствии с задачей минимизации функции (4) требуется не только вычислить вектор параметров α , но и сформировать индексные множества $N_j, j = \overline{1, L}$. Отметим, что в общем случае задача (4) представляет собой весьма сложную задачу нелинейного программирования.

Применение МСО позволяет одновременно решить две важные задачи:

1. обеспечить построение компромисса между L методами оценивания параметров;
2. выполнить кластеризацию исходной выборки на подвыборки, каждая из которых соответствует «своему» методу.

В [16] задача (4) для $L = 2, v_1 = 1, v_2 \rightarrow \infty$ и заранее заданного множества N_1 (а значит, и $N_2 = N \setminus N_1$) сведена к задаче линейного программирования (ЛП). При этом использованы известные приёмы для такого сведения [18; 19], упоминавшиеся ещё в [17].

В работах [20; 21] описаны различные эвристические приёмы формирования множеств N_1 и N_2 для $L = 2, v_1 = 1, v_2 \rightarrow \infty$ в задаче (4). Ниже представлен алгоритм её точного решения при заданном числе $|N_1| = d$ путём решения задачи линейно-булева программирования (ЛБП), основанный на известном способе сведения МНМ и МАО к соответствующим задачам ЛП с ограничениями-неравенствами [22].

Введём в рассмотрение булевы переменные $\sigma_k, k = \overline{1, n}$:

$$\sigma_k = \begin{cases} 1, & k \in N_1 \\ 0, & k \in N_2 \end{cases}$$

Тогда эквивалентная задаче (4) задача ЛБП может быть представлена в виде

$$\alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} - z_k + M\sigma_k \leq y_k + M, k = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$\alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + z_k - M\sigma_k \geq y_k - M, k = \overline{1, n}, \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^n \sigma_k = d, \quad (7)$$

$$\alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} - h_k - M\sigma_k \leq y_k, k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$\alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + h_k + M\sigma_k \geq y_k, k = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$$h_k - r \leq 0, k = \overline{1, n}, \quad (10)$$

$$z_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (11)$$

$$h_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$\sigma_k \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, \quad (13)$$

$$\frac{1}{d} \sum_{k=1}^n z_k + r + \mu \sum_{k=1}^n h_k \rightarrow \min, \quad (14)$$

где M и μ – наперёд заданные большое и малое положительные числа соответственно; z_k – вспомогательные неотрицательные переменные для формирования суммы абсолютных ошибок на подвыборке N_1 (МНМ-часть), h_k – вспомогательные неотрицательные переменные для ограничения ошибок на подвыборке N_2 (МАО-часть), r – переменная, ограничивающая максимальную абсолютную ошибку на N_2 (аналог $\max |\varepsilon_k|$).

Проиллюстрируем точную реализацию МСО для случая $\nu_1 = 1, \nu_2 \rightarrow \infty$ на примере разработки регрессионной модели грузооборота автомобильного транспорта Российской Федерации по статистической информации за 2007-2020 гг. ($n = 14$) [21]. Введём обозначения: y – грузооборот автомобильного транспорта Российской Федерации, млрд ткм; x_1 – протяжённость автомобильных дорог, тыс. км; x_2 – объём погрузки, тыс. т.

В [21] приведена регрессионная модель для данного объекта, построенная с помощью МНМ:

$$y = -8.52 + 0.099x_1 + 0.02x_2 + \varepsilon, \quad (15)$$

$$P = 3.02,$$

где P – средняя абсолютная ошибка аппроксимации:

$$P = \sum_{k \in N} |\varepsilon_k| / n.$$

В [21] предложен эвристический, приближённый, подход к формированию множеств N_1 и N_2 , предполагающий при реализации МСО последовательное решение двух задач ЛП. В данном случае он приводит к модели

$$y = -1.73 + 0.098x_1 + 0.019 + \varepsilon, \quad (16)$$

$$P = 3.12.$$

Применение же описанного выше алгоритма точной реализации МСО путём решения задачи ЛБП (5) – (14) приводит к модели

$$y = -2.1 + 0.099 + 0.019 + \varepsilon, \quad (17)$$

$$P = 3.08.$$

Таким образом, модель (17), как и (16), по-прежнему несколько уступает модели (15) по точности аппроксимации (что вполне естественно), но на величину 0.04 превосходит последнюю по этому критерию. При этом индексные множества N_1 и N_2 приняли вид

$$N_1 = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 12\},$$

$$N_2 = \{1, 2, 3, 10, 11, 13, 14\}.$$

Заключение. В работе предложен точный способ реализации метода смешанного оценивания параметров линейной регрессионной модели, основанный на решении задачи линейно-булева программирования. Применением МСО обеспечивается решение двух задач: построение компромисса между всеми задействованными методами оценивания параметров (в данном случае – меж-



ду МНМ и МАО); разбиение исходной выборки на подвыборки, каждая из которых соответствует «своему» методу. Несмотря на то что модель (17) имеет несколько более высокую среднюю абсолютную ошибку аппроксимации (3.08 против 3.02 у МНМ), она обладает лучшими обобщающими свойствами за счёт подавления влияния потенциальных выбросов, отнесённых в подвыборку N_2 , и позволяет получать более устойчивые прогнозы. Таким образом, преимущество метода не в максимизации точности на обучающей выборке, а в повышении робастности и интерпретируемости структуры данных. Уточнена регрессионная модель грузооборота автомобильного транспорта Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Geoffrey K. F. Tso, Jingjing Guan. A multilevel regression approach to understand effects of environment indicators and household features on residential energy consumption. *Energy*, 2014, 66. – P. 722-731.
2. I. Chenini & S. Khemiri. Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2009, 6. – P. 509-519.
3. Henrik Andersson, Lina Jonsson & Mikael Ögren. Property Prices and Exposure to Multiple Noise Sources: Hedonic Regression with Road and Railway Noise. *Environmental and Resource Economics*, 2010, 45. – P. 73-89.
4. Yu-Ren Wang, G. Edward Gibson Jr. A study of preproject planning and project success using ANNs and regression models. *Automation in Construction*, 2010, 19, No. 3. – P. 341-346.
5. Mercè Boy-Roura, Bernard T. Nolan, Anna Menció, Josep Mas-Pla. Regression model for aquifer vulnerability assessment of nitrate pollution in the Osona region (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 2013, 505. – P. 150-162.
6. Abbas Khalili & Jiahua Chen. Variable Selection in Finite Mixture of Regression Models. *Journal of the American Statistical Association*, 2007, 102 (479). – P. 1025-1038.
7. Rehab Alharbi, Nojood Alageel, Maryam Alsayil, Rahaf Alharbi, A'aeshah Alhakamy. Prediction of Oil Production through Linear Regression Model and Big Data Tools. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2022, 13 (12).
8. Mian Huang, Runze Li & Shaoli Wang. Nonparametric Mixture of Regression Models. *Journal of the American Statistical Association*, 2013, 108 (503). – P. 929-941.
9. Adeyemi Emman Aladejare, Musa Adebayo Idris. Performance analysis of empirical models for predicting rock mass deformation modulus using regression and Bayesian methods. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12 (6). – P. 1263-1271.
10. Seyoung Park, Eun Ryung Lee, Hyunjin Kim & Hongyu Zhao. Transfer Learning Under Large-Scale Low-Rank Regression Models. *Journal of the American Statistical Association*, 2025, 10. – P. 1-13.
11. Петрова, А. Н. Анализ методов сглаживания для повышения точности информационного поиска в системах больших данных / А. Н. Петрова, Д. О. Фролов, Т. Л. Дмитриева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 45-49.
12. Тарков, М. С. Регрессионный анализ алгоритма ранжирования результатов текстового поиска в базах данных систем геомониторинга с помощью нейронных сетей / М. С. Тарков, О. А. Кожушко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 36-43.
13. Легашев, Л. В. Исследование состязательных атак на регрессионные модели машинного обучения в беспроводных сетях 5G / Л. В. Легашев, А. Ю. Жигалов // Вопросы кибербезопасности. – 2024. – № 3 (61). – С. 61-67.
14. Голованов, О. А. Итерационное выпуклое оценивание линейных регрессионных моделей в условиях стохастической неоднородности данных / О. А. Голованов, А. Н. Тырсин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2025. – Т. 29. – № 2. – С. 294-318.
15. Крымова, Е. А. Сравнение эвристических алгоритмов выбора линейных регрессионных моделей / Е. А. Крымова, В. В. Стрижов // Математические методы распознавания образов. – 2009. – Т. 14. – № 1. – С. 145-148.
16. Носков, С. И. О методе смешанного оценивания параметров линейной регрессии / С. И. Носков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2019. – № 1 (2). – С. 41-45.

17. Демиденко, Е. З. Линейная и нелинейная регрессии / Е. З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
18. Wagner M. H. Linear programming techniques for regression analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 1959, 54 (285). – P. 206-212.
19. Wagner M. H. Non-linear regression with minimal assumptions. *Journal of the American Statistical Association*, 1962, 57 (299). – P. 572-578.
20. Носков, С. И. Метод смешанного оценивания параметров линейной регрессии: особенности применения / С. И. Носков // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 1. – С. 126-132.
21. Носков, С. И. Метод смешанного оценивания параметров регрессионной модели с произвольным составом групп наблюдений / С. И. Носков, Е. С. Попов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2024. – № 3 (51). – С. 98-104.
22. Носков, С. И. Альтернативные линейно-программные формы реализации методов наименьших модулей и антиробастного оценивания в регрессионном анализе / С. И. Носков, О. В. Хамаева // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2025. – № 1 (25). – С. 37-40.



Новиков А. Н., Зайченко И. В., Соколова В. С., Сизинцева А. С.
A. N. Novikov, I. V. Zaichenko, V. S. Sokolova, A. S. Sizintseva

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛОВ ЛОКОМОТИВОВ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ
ERP-СРЕДЕ**

**MATHEMATICAL MODELING OF FORECASTING PROCESSES OF LOCOMOTIVE UNIT
RESIDUAL RESOURCE IN AN INTEGRATED ERP ENVIRONMENT**

Новиков Антон Николаевич – студент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: novikowl@mail.ru.

Anton N. Novikov – a Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: novikowl@mail.ru.

Зайченко Илья Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zaichenko@inbox.ru.

Илья V. Zaichenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: zaichenko@inbox.ru.

Соколова Вера Сергеевна – старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sokolova.v.s@mail.ru.

Vera S. Sokolova – Senior Lecturer, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sokolova.v.s@mail.ru.

Сизинцева Анна Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «История, педагогика и лингвистика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sizintsann@gmail.com.

Anna S. Sizintseva – PhD in Engineering, Associate Professor, History, Pedagogy and Linguistics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sizintsann@gmail.com.

Аннотация. В статье рассматривается проблема математического моделирования остаточного ресурса узлов локомотивов как ключевого компонента специализированной ERP-системы управления техническим обслуживанием и ремонтом. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию с прогнозированием отказов. Разработана комбинированная математическая модель, объединяющая параметрический анализ Вейбулла и нейросетевое прогнозирование временных рядов. Моделирование выполнено в среде MATLAB с использованием статистических данных наработки на отказ буксовых узлов локомотивов. Проведён сравнительный анализ точности прогнозирования различными методами, показавший преимущество комбинированного подхода (средняя ошибка 7,2 % против 12,8 % у классических методов). Предложена архитектура интеграции разработанного прогностического модуля в ERP-систему класса EAM/CMMS. Результаты могут быть использованы при создании специализированного программного обеспечения для предприятий железнодорожного транспорта.

Summary. The article discusses the problem of mathematical modeling of locomotive unit residual resource as a key component of a specialized ERP system for maintenance and repair management. The relevance of the study is due to the need to switch from routine maintenance to maintenance based on the actual condition with the prediction of failures. A combined mathematical model has been developed that combines parametric Weibull analysis and neural network time series forecasting. The simulation was performed in the MATLAB environment using statistical data on the failure time of locomotive axle boxes. A comparative analysis of the accuracy of forecasting by

various methods was carried out, which showed the advantage of the combined approach (the average error is 7.2 % versus 12.8 % for classical methods). The architecture of integration of the developed predictive module into an ERP system of the EAM/CMMS class is proposed. The results can be used to create specialized software for railway transport enterprises.

Ключевые слова: математическое моделирование, ERP-система, техническое обслуживание и ремонт, прогнозирование остаточного ресурса, распределение Вейбулла, нейронные сети, MATLAB, локомотивы.

Key words: mathematical modeling, ERP system, maintenance and repair, residual resource forecasting, Weibull distribution, neural networks, MATLAB, locomotives.

УДК 004.42:629.4.083

Введение. Современное состояние железнодорожной отрасли характеризуется возрастающими требованиями к надёжности подвижного состава и эффективности его обслуживания. Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) локомотивов представляют собой сложный организационно-технический комплекс, включающий планирование работ, управление материально-техническим обеспечением, контроль состояния узлов и агрегатов [1]. Внедрение ERP-систем на предприятиях железнодорожного транспорта, таких как ГК «ЛокоТех» [2], позволяет автоматизировать учётные функции и документооборот, однако вопросы прогнозирования технического состояния остаются недостаточно проработанными.

Ключевой проблемой при создании специализированной ERP-системы для ТОиР локомотивов является отсутствие адекватных математических моделей, позволяющих на основе накопленных эксплуатационных данных прогнозировать момент наступления предельного состояния узлов с приемлемой для практики точностью. Существующие ERP-системы (SAP, 1C:ERP, Oracle EBS) либо не содержат прогностических модулей вовсе, либо используют упрощённые статистические модели, не учитывающие индивидуальные особенности эксплуатации конкретных единиц подвижного состава [3].

В рамках настоящей работы были выполнены разработка и исследование математической модели прогнозирования остаточного ресурса узлов локомотивов, пригодной для интеграции в ERP-систему управления ТОиР, и решены следующие задачи:

- анализ существующих подходов к математическому моделированию надёжности технических систем;
- разработка комбинированной модели, объединяющей параметрический анализ выживаемости и нейросетевое прогнозирование;
- реализация модели в среде MATLAB и её валидация на реальных эксплуатационных данных;
- оценка точности прогнозирования и сравнительный анализ методов;
- разработка архитектуры интеграции прогностического модуля в ERP-систему.

Объектом моделирования выступает процесс изменения технического состояния узлов локомотивов в эксплуатации. Формально состояние каждого узла в момент времени t характеризуется вектором параметров $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$, где x_i – диагностические признаки (вибрация, температура, износ и т. д.). Отказ наступает при достижении хотя бы одним параметром предельного значения $x_i \geq x_i^{\wedge} \text{lim}$ или при наработке T , превышающей назначенный ресурс.

Задача прогнозирования заключается в определении функции распределения времени до отказа $F(t) = P(T < t)$ или оценке остаточного ресурса $R(t) = E[T - t | T > t]$ для конкретного узла с учётом его предыстории.

Математически задача может быть сформулирована следующим образом: по известной выборке наблюдений $\{(t_j, \delta_j, X_j(t))\}_{j=1..N}$, где t_j – время наблюдения, δ_j – индикатор цензурирования (1 – отказ, 0 – усечение), построить модель, минимизирующую функционал ошибки прогноза:

$$Q = \sum_{i=1}^M (T_i^{fact} - T_i^{pred})^2 \rightarrow \min$$

при ограничениях на вычислительную сложность, допускающую интеграцию модели в реальном масштабе времени в ERP-систему.

Особенностями задачи являются наличие цензурированных данных (узлы, снятые с эксплуатации до наступления отказа) и необходимость учёта многомерных диагностических признаков.

Анализ существующих подходов к моделированию ресурса. В современной теории надёжности сложилось несколько подходов к математическому моделированию ресурса технических систем. Статистические методы основаны на подборе параметрических распределений (Вейбулла, экспоненциального, нормального, логарифмически нормального) к эмпирическим данным о наработке на отказ [4]. Наибольшее распространение получило распределение Вейбулла с функцией надёжности:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right],$$

где β – параметр формы; η – масштабный параметр. Достоинством метода является его простота и наличие стандартных процедур оценки параметров (метод максимального правдоподобия). Недостаток – невозможность учёта индивидуальных особенностей эксплуатации.

Методы искусственного интеллекта, включая нейронные сети, позволяют моделировать сложные нелинейные зависимости между диагностическими признаками и остаточным ресурсом [5]. В работе [6] показано применение MATLAB для прогнозирования остаточного ресурса подшипников с использованием диагностического алгоритма. Нейросетевая модель представляет собой многослойный персептрон с функцией активации:

$$y = f \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b \right),$$

где w_i – весовые коэффициенты; b – смещение. Обучение сети производится на исторических данных с использованием алгоритма обратного распространения ошибки.

Комбинированные методы объединяют преимущества параметрического и нейросетевого подходов. В частности, возможно использование распределения Вейбулла для описания «базовой» надёжности и нейронной сети для коррекции прогноза с учётом текущих диагностических данных.

В диссертационной работе [7] разработана система поддержки принятия решений для ремонта подвижного состава, использующая гибридный подход с применением MATLAB, LabVIEW и Access. Однако предложенное решение ориентировано на послеремонтный анализ, а не на оперативное прогнозирование.

Анализ существующих подходов позволяет сделать вывод о целесообразности разработки комбинированной модели, сочетающей параметрический анализ выживаемости для описания популяционных закономерностей и нейросетевое прогнозирование для индивидуализации оценок.

Математическая модель процесса обучения. Предлагаемая модель состоит из двух взаимосвязанных блоков:

1. Блок параметрического анализа – оценка параметров распределения Вейбулла по всей совокупности данных о наработке на отказ (включая цензурированные наблюдения).
2. Блок нейросетевой коррекции – нейронная сеть, корректирующая прогноз с учётом индивидуальных диагностических признаков.

Математически прогнозируемое значение остаточного ресурса определяется как

$$\hat{R} = R_W(t, \eta, \beta) \cdot K_{NN}(X),$$

где $R_W(t, \eta, \beta)$ – оценка по Вейбуллу, $K_{NN}(X)$ – корректирующий коэффициент, вычисляемый нейронной сетью.

Для оценки параметров распределения Вейбулла по цензурированным данным используется метод максимального правдоподобия. Функция правдоподобия для выборки с цензурированием имеет вид

$$L(\eta, \beta) = \prod_{i=1}^N [f(t_i)]^{\delta_i} [R(t_i)]^{1-\delta_i},$$

где $f(t)$ – плотность распределения Вейбулла:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \right].$$

Логарифмируя и приравнявая частные производные к нулю, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \left[\delta_i \left(\frac{1}{\beta} + \ln t_i - \ln \eta \right) - \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \ln \left(\frac{t_i}{\eta} \right) \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^N \left[\delta_i \frac{\beta}{\eta} - \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \right] = 0 \end{cases}.$$

Решение системы осуществляется численно (методом Ньютона – Рафсона) в среде MATLAB.

Для коррекции прогноза разработана нейронная сеть прямого распространения со следующими характеристиками:

- Входной слой: 5 нейронов (нормированные диагностические признаки: вибрация, температура, пробег от последнего ремонта, нагрузка, условия эксплуатации).
- Два скрытых слоя: первый – 10 нейронов с функцией активации *tansig*, второй – 5 нейронов с функцией активации *logsig*.
- Выходной слой: 1 нейрон с линейной функцией активации (корректирующий коэффициент в диапазоне [0.5, 1.5]).

Функционирование сети описывается выражением

$$K_{NN} = \text{purelin}(W_3 \cdot \text{logsig}(W_2 \cdot \text{tansig}(W_1 \cdot X + b_1) + b_2) + b_3).$$

Обучение сети производится на выборке пар «вектор признаков – фактический остаточный ресурс» с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта, обеспечивающего быструю сходимость.

Разработанный программный комплекс в среде MATLAB включает следующие модули:

1. Модуль импорта и предобработки данных – чтение данных из форматов Excel и CSV, фильтрация выбросов, нормализация.
2. Модуль параметрического анализа – оценка параметров распределения Вейбулла, построение функций надёжности и интенсивности отказов.
3. Модуль нейросетевого прогнозирования – создание, обучение и валидация нейронной сети.
4. Модуль визуализации – построение графиков распределений, сравнение прогнозов с фактическими значениями.
5. Модуль экспорта результатов – генерация отчётов и экспорт данных в форматы, совместимые с ERP-системами (XML, JSON).

Результаты тестирования и их анализ. Для тестирования модели использовались данные о наработке на отказ буксовых узлов локомотивов (выборка из 250 наблюдений, из них 185 отказов и 65 цензурированных). Диагностические признаки включали: среднеквадратичное значение вибрации (мм/с), температуру буксы (°C), пробег от последнего ремонта (тыс. км), осевую нагрузку (т), коэффициент условий эксплуатации (1 – депо, 2 – магистраль).

Для оценки эффективности разработанной модели проведено сравнение трёх подходов к прогнозированию остаточного ресурса:

1. M1 – классический метод Вейбулла (усреднённая оценка по всей совокупности).
2. M2 – нейросетевое прогнозирование без учёта распределения.
3. M3 – комбинированный метод (предлагаемая модель).

Оценка производилась на тестовой выборке из 50 узлов с известным фактическим остаточным ресурсом. Использовались метрики:

- Средняя абсолютная ошибка (MAE): $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i^{fact} - R_i^{pred}|$.
- Среднеквадратичная ошибка (RMSE): $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i^{fact} - R_i^{pred})^2}$.
- Средняя относительная ошибка (MAPE): $MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|R_i^{fact} - R_i^{pred}|}{R_i^{fact}} \cdot 100\%$.

Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов прогнозирования

Метод	MAE, тыс. км	RMSE, тыс. км	MAPE, %
Метод Вейбулла (M1)	52.3	67.8	18.6
Нейросеть (M2)	38.7	49.2	12.8
Комбинированный (M3)	24.5	31.6	7.2

Анализ результатов показывает:

1. Метод Вейбулла даёт наибольшую ошибку, т. к. не учитывает индивидуальные особенности узлов.

2. Нейросетевое прогнозирование значительно точнее, но подвержено влиянию выбросов и требует большого объёма обучающих данных.

3. Комбинированный метод обеспечивает наименьшую ошибку прогноза (снижение MAPE на 61 % относительно M1 и на 44 % относительно M2).

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.89$ свидетельствует о высокой точности модели.

Проведён анализ чувствительности модели к изменению входных параметров. Наибольшее влияние на прогноз оказывают вибрация (коэффициент эластичности 0.42) и температура (0.31), что согласуется с физикой процессов деградации подшипников качения. Наименьшее влияние оказывает осевая нагрузка (0.12), что объясняется относительно стабильным режимом нагружения в пассажирском движении.

Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность повышения точности прогнозирования остаточного ресурса за счёт комбинирования параметрических и нейросетевых методов. Разработанная модель обладает следующими преимуществами:

- учёт цензурированных наблюдений (важно для реальных эксплуатационных данных);
- индивидуализация прогноза на основе текущих диагностических признаков;
- адаптивность – возможность дообучения нейронной сети по мере накопления данных;
- вычислительная эффективность – время прогноза для одного узла составляет менее 0.1 с на ПЭВМ средней производительности.

Ограничением модели является необходимость представительной обучающей выборки для настройки нейронной сети. При недостаточном объёме данных целесообразно использование только параметрического блока с последующим подключением нейросетевой коррекции по мере накопления статистики.

Разработанный прогностический модуль может быть интегрирован в существующие ERP-системы класса EAM/CMMS (SAP EAM, 1C:ERP УП, Oracle EAM, TRIM). Предлагаемая архитектура интеграции включает следующие компоненты:

1. Источники данных – АСУТП депо, системы мониторинга, датчики на локомотивах, журналы ремонтов.
2. Промежуточный слой ETL – извлечение, трансформация и загрузка данных в форматы, пригодные для анализа.
3. Прогностический модуль (MATLAB) – реализация разработанных алгоритмов, доступ через REST API или COM-интерфейс.
4. ERP-система – получение прогнозов, формирование планов ремонтов, управление заказами.
5. Интерфейс пользователя – визуализация прогнозов, оповещения о приближении предельного состояния.

Интеграция MATLAB с ERP-системами может осуществляться несколькими способами:

- MATLAB Production Server – развёртывание моделей в виде веб-сервисов.
- MATLAB Compiler – создание автономных исполняемых модулей или библиотек (.NET, Java, Python).

– Прямой обмен данными – через общие форматы (XML, JSON) и базы данных.

Для типовой конфигурации на платформе «1С:Предприятие» разработан протокол обмена, включающий:

- запрос от 1С к MATLAB-сервису с передачей идентификатора узла и текущих диагностических признаков;
- вычисление прогноза остаточного ресурса;
- возврат результата в формате JSON;
- обновление карточки узла в 1С и автоматическое формирование заявки на ремонт при снижении ресурса ниже порогового значения.

Заключение. В результате выполненного исследования получены следующие основные результаты:

1. Разработана комбинированная математическая модель прогнозирования остаточного ресурса узлов локомотивов, объединяющая параметрический анализ распределения Вейбулла (учёт цензурированных наблюдений) и нейросетевую коррекцию (индивидуализация прогноза по диагностическим признакам).

2. Реализован программный комплекс в среде MATLAB, включающий модули параметрического анализа, нейросетевого прогнозирования, визуализации и экспорта данных. Комплекс протестирован на реальных эксплуатационных данных буксовых узлов локомотивов.

3. Проведён сравнительный анализ методов прогнозирования, показавший, что предлагаемая комбинированная модель обеспечивает среднюю относительную ошибку прогноза 7.2 %, что на 44 % точнее, чем использование только нейросетевого подхода, и на 61 % точнее, чем классический метод Вейбулла.

4. Предложена архитектура интеграции разработанного прогностического модуля в корпоративные ERP-системы класса EAM/CMMS, обеспечивающая автоматическое формирование заявок на ремонт при достижении пороговых значений остаточного ресурса.

Направления дальнейших исследований включают расширение номенклатуры узлов, для которых построены модели, учёт взаимного влияния узлов в многокомпонентной системе, разработку моделей оптимизации периодичности ремонтов с учётом прогнозируемых ресурсов, применение методов глубокого обучения для анализа вибросигналов.

Практическая значимость работы заключается в возможности создания на базе предложенных моделей специализированного программного обеспечения для ERP-систем предприятий железнодорожного транспорта, что позволит повысить эффективность использования локомотивного парка за счёт снижения простоев в неплановых ремонтах и оптимизации складских запасов запасных частей.



ЛИТЕРАТУРА

1. Daniyan, I. A. The use of a diagnostic and prognostic tool for predictive maintenance in the railway industry / I. A. Daniyan, K. Mrofu, F. Fameso // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 91. – P. 415-420.
2. Цифровая трансформация сервисного локомотивного депо: опыт ГК «ЛокоТех» // *Железнодорожный транспорт*. – 2021. – № 5. – С. 28-33.
3. Кириллов, А. Г. ERP-системы в управлении ремонтами подвижного состава: проблемы и перспективы / А. Г. Кириллов, А. М. Набатчиков // *Автоматизация на транспорте*. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 145-159.
4. Рябинин, И. А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2018. – 456 с.
5. Егоров, С. В. Применение нейронных сетей для прогнозирования технического состояния узлов локомотивов / С. В. Егоров, А. С. Андреев // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2021. – № 3. – С. 45-54.
6. Zhang, X. Development of multi-component maintenance decision support system for electric multiple units / X. Zhang, Y. Xu // *Journal of Beijing Jiaotong University*. – 2019. – Vol. 43, No. 3. – P. 112-119.
7. Bosso, N. Application of deep learning for the prognostics of railway axle bearings / N. Bosso, M. Magelli, N. Zampieri // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2022. – Vol. 165. – P. 108-124.
8. Левин, Б. А. Математические модели надёжности технических систем на железнодорожном транспорте / Б. А. Левин, В. М. Круглов. – М.: УМЦ ЖДТ, 2020. – 312 с.
9. MATLAB Deep Learning Toolbox™ User's Guide. – The MathWorks, Inc., 2023. – 1850 p.
10. ISO 13381-1:2015. Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics – Part 1: General guidelines. – Geneva: ISO, 2015. – 34 p.

Фролов Д. О.
ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ
ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ

Фролов Д. О.
D. O. Frolov

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ

APPROACH TO ASSESSING THE STRESS STATE OF THICK-WALLED PIPES UNDER PRESSURE BASED ON DEFORMATION FIELDS

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

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

Аннотация. В работе рассматривается задача восстановления распределения остаточных напряжений в автофретированных толстостенных цилиндрических оболочках на основе полей деформаций. Рассмотрен вопрос получения профилей остаточных напряжений по данным о конечно-элементном расчёте полей деформаций. Предложенный подход позволит на практике количественно оценивать информативность экспериментальных методик и выбирать рациональные схемы измерений при контроле напряжённно-деформированного состояния элементов высокого давления.

Summary. The paper considers the problem of restoring the distribution of residual stresses in autofretted thick-walled cylindrical shells based on the deformation fields. The issue of obtaining residual stress profiles based on the finite-element calculation of deformation fields is discussed. The proposed approach will allow for a quantitative assessment of the information content of experimental methods and the selection of rational measurement schemes for monitoring the stress-strain state of high-pressure elements.

Ключевые слова: напряжения, деформации, толстостенная труба, нейросетевая модель.

Key words: stresses, deformations, thick-walled pipe, neural network model.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №25-79-10135, <https://rscf.ru/project/25-79-10135/>.

УДК 004.942

Современные элементы высоконагруженных гидравлических систем широко изготавливаются из автофретированных толстостенных цилиндрических оболочек, для которых распределение остаточных напряжений по толщине оказывает решающее влияние на долговечность и надёжность. Традиционные экспериментальные методы оценки остаточных напряжений часто связаны с высокой трудоёмкостью, разрушением объекта и ограниченной глубиной зондирования, а их интерпретация требует решения некорректных обратных задач. В итоге задача построения достоверных профилей остаточных напряжений для реальных изделий остаётся сложной и актуальной. В настоящей работе предлагается комбинированный подход, основанный на численном моделировании процесса автофретирования методом конечных элементов и применении нейросетевых моделей для решения обратной задачи восстановления остаточных напряжений по полям деформаций. Такой подход позволяет, с одной стороны, сформировать реалистичный «цифровой полигон» для оценки информативности различных схем измерения деформаций, а с другой – исследовать возможности и ограничения нейросетевых методов при использовании их в качестве инструмента неразрушающего контроля напряжённно-деформированного состояния автофретированных цилиндров.

В работе рассматривается толстостенная цилиндрическая оболочка внутреннего радиуса r_i , наружного радиуса r_o и длины $L \gg r_o$. Это позволяет пренебречь краевыми эффектами и использовать осесимметричную модель плоской деформации. Материал принимается изотропным, упру-

го-пластическим с упрочнением, задаваемым диаграммой «напряжение-деформация» в одноосном растяжении. Используются цилиндрические координаты (r, θ, z) , ось z совпадает с осью цилиндра. Внутренняя поверхность $r = r_i$ нагружается внутренним давлением $p(t)$, реализующим процесс автофретирования. Нагружение моделируется как квазистатическое приложение давления от нуля до максимума p_{af} с последующей разгрузкой.

Численная реализация выполняется в осесимметричной постановке. Область $\Omega = (r, z)$; $r_i \leq r \leq r_o$, $0 \leq z \leq L$ дискретизируется конечными элементами. Нагружение разбивается на шаги по давлению Δp , на каждом шаге реализуется итерационный упруго-пластический пересчёт. В результате для каждого уровня давления p_k и для разгруженного состояния определяются поля напряжений и деформаций, в том числе эквивалентная деформация ε_{eq} и остаточные напряжения σ^{res} . Эти данные используются для анализа автофретированного цилиндра и формирования выборок для решения обратной задачи восстановления остаточных напряжений по деформациям.

Согласно предлагаемому подходу, датасет формируется по результатам серии КЭ-расчётов автофретирования для множества сочетаний геометрических и физико-механических параметров. Каждый расчёт задаётся вектором

$$p_j = (r_i^{(j)}, r_o^{(j)}, p_{af}^{(j)}, E^{(j)}, \nu^{(j)}, \theta_h^{(j)}), j = 1, \dots, N,$$

где $r_i^{(j)}, r_o^{(j)}$ – радиусы, $p_{af}^{(j)}$ – максимальное давление автофретирования, $E^{(j)}, \nu^{(j)}$ – упругие характеристики, $\theta_h^{(j)}$ – параметры диаграммы упрочнения. Для каждого p_j решается прямая задача, получаются поля напряжений и деформаций при уровнях давления p_k и в остаточном состоянии.

Входными данными нейросети служат двумерные карты деформаций. Для заданных p_j и p_k вычисляется эквивалентная деформация

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} [(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2]}.$$

На вход сети подаётся либо одна карта для выбранного p_k , либо тензор из карт для нескольких уровней давления

$$X_j = (E_{j,l}, \dots, E_{j,K}) \in R^{K \times M \times N}.$$

Выходом являются профили остаточных напряжений по толщине в разгруженном состоянии

$$\sigma_r^{res}(r; p_j), \sigma_\theta^{res}(r; p_j), \sigma_z^{res}(r; p_j),$$

которые дискретизируются в узлах $r_l, l = 1, \dots, L_r$:

$$S_j = [\sigma_r^{res}(r_l; p_j), \sigma_\theta^{res}(r_l; p_j), \sigma_z^{res}(r_l; p_j)]_{l=1}^{L_r} \in R^{L_r \times 3}.$$

Один элемент датасета задаётся парой

$$(X_j, S_j), \quad j = 1, \dots, N.$$

С учётом пространственной структуры входа в качестве базовой архитектуры используется свёрточная нейронная сеть, задающая последовательность преобразований:

$$h_l = F_l(X), \dots, h_L = F_L(h_{L-1}), \hat{S} = N_\Phi(X) = h_L,$$

где F_l включают операции свёртки, активации, подвыборки/апсемплинга, нормализации и полносвязные слои. Для каждого узла rl сеть восстанавливает вектор

$$\hat{s}_{j,l} = (\hat{\sigma}_{r,l}^{(j)}, \hat{\sigma}_{\theta,l}^{(j)}, \hat{\sigma}_{z,l}^{(j)}).$$

Базовая функция потерь задаётся как MSE между предсказанными и истинными профилями:

$$\mathcal{L}(\phi) = \frac{1}{N_{train}} \sum_{j \in \mathcal{I}_{train}} \sum_{l=1}^{L_r} |\hat{s}_{j,l}(\phi) - s_{j,l}|^2,$$

где ϕ – обучаемые параметры.

Для учёта механических ограничений добавляется регуляризатор:

$$\mathcal{L}_{reg}(\phi) = \sum_{j \in \mathcal{I}_{train}} \sum_{l=1}^{L_r-1} \left[\alpha \left(\frac{\hat{\sigma}_{r,l+1}^{(j)} - \hat{\sigma}_{r,l}^{(j)}}{\Delta r_l} + \frac{\hat{\sigma}_{r,l}^{(j)} - \hat{\sigma}_{\theta,l}^{(j)}}{r_l} \right)^2 + \beta, |D_r^2 \hat{s}_{j,l}|^2 \right],$$

где первое слагаемое отвечает за штрафование отклонений от дискретного уравнения равновесия, а второе ограничивает избыточную кривизну профилей (оператор D_r^2 аппроксимирует вторую производную по радиусу). Итоговая функция потерь:

$$\mathcal{L}_{tot}(\phi) = \mathcal{L}(\phi) + \lambda, \mathcal{L}_{reg}(\phi),$$

где λ, α, β – коэффициенты регуляризации.

Обучение параметров ϕ выполняется методом стохастического градиентного спуска или его адаптивных вариантов на обучающей подвыборке, качество контролируется на валидационной и тестовой. Для имитации реальных ограничений эксперимента рассматриваются варианты:

- сокращение области доступных деформаций (часть толщины, отдельные сечения);
- добавление шума

$$\tilde{\varepsilon}_{eq} = \varepsilon_{eq} + \eta, \quad \eta \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\eta^2);$$

- уменьшение числа уровней давления K .

Это позволяет оценить влияние объёма и качества деформационной информации на точность восстановления остаточных напряжений.

Двумерные карты эквивалентной деформации $\varepsilon_{eq}(r, \theta; p_k)$ дискретизировались по регулярной сетке по радиальной и угловой координатам и преобразовывались в матрицы (изображения), формирующие входные данные датасета. Набор таких матриц для различных уровней давления использовался как вход нейросетевой модели, аппроксимирующей отображение от деформационных полей к профилям остаточных напряжений по толщине цилиндрической оболочки.

Таким образом, в работе предложен подход к определению остаточных напряжений в автофретированных цилиндрических элементах, объединяющий численное моделирование, нейросетевой анализ.

Численный эксперимент и анализ результатов. Для верификации предложенного подхода была сформирована серия численных экспериментов на основе параметрического варьирования характеристик цилиндрической оболочки. В качестве базового варианта рассматривалась оболочка с соотношением радиусов $k = r_o/r_i = 2,0$, изготовленная из конструкционной стали с модулем упругости $E = 200$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$ и пределом текучести $\sigma_0 = 800$ МПа. Максимальное давление автофретирования выбиралось из условия пластической зоны, распространяющейся на 60-80 % толщины стенки, что соответствует типовым режимам обработки высоконагруженных цилиндров.

Конечно-элементная сетка строилась из осесимметричных восьмиузловых элементов со сгущением к внутренней поверхности, где градиенты напряжений и деформаций максимальны. Шаг нагружения составлял $\Delta p = 0,01$ *raf*, итерационный процесс на каждом шаге завершался при достижении невязки по нормам напряжений менее 10^{-4} . Разгрузка моделировалась как упругое снятие давления от *raf* до нуля с сохранением накопленных пластических деформаций. В результате для каждого расчётного варианта получались поля эквивалентной деформации $\varepsilon_{eq}(r, z; p_k)$ при десяти уровнях давления, а также профили остаточных напряжений $\sigma_r^{res}(r)$, $\sigma_\theta^{res}(r)$, $\sigma_z^{res}(r)$ в разгруженном состоянии.

Полученные профили остаточных напряжений демонстрируют характерную картину: в приповерхностном слое у внутренней поверхности ($r \approx r_i$) формируются значительные остаточные сжимающие напряжения окружного $\sigma_\theta^{res} < 0$, достигающие по абсолютной величине 40-60 % от σ_0 , тогда как у наружной поверхности ($r \approx r_o$) наблюдаются растягивающие остаточные напряжения. Такое перераспределение напряжений существенно повышает ресурс цилиндра при циклическом нагружении, препятствуя зарождению и развитию усталостных трещин с внутренней поверхности. Распределение радиальных остаточных напряжений $\sigma_r^{res}(r)$ удовлетворяет граничным условиям $\sigma_r^{res}(r_i) = \sigma_r^{res}(r_o) = 0$, что служит дополнительным критерием правильности расчёта.

Датасет, использованный для обучения нейросетевой модели, включал $N = 3000$ расчётных вариантов, охватывающих диапазоны: $k \in [1,5; 3,0]$, $\sigma_0 \in [600; 1200]$ МПа, степень автофретирования $\varphi \in [0,4; 0,9]$. Датасет делился на обучающую (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %) выборки. В качестве нейросетевой архитектуры применялась свёрточная сеть с пятью блоками, за которыми следовали два полносвязных слоя с регуляризацией Dropout ($p = 0,2$). Обучение проводилось методом Adam с начальной скоростью обучения 10^{-3} и расписанием её уменьшения на плато валидационных потерь.

Оценка точности и чувствительности к качеству входных данных. Качество восстановления остаточных напряжений оценивалось по нескольким метрикам. В качестве основной использовалась относительная среднеквадратическая ошибка (RMSE) по всем компонентам напряжений и всем узлам профиля, нормированная на σ_0 соответствующего варианта. На тестовой выборке достигнутая точность составила $RMSE/\sigma_0 \approx 3,2$ % для окружных напряжений, $\sigma_\theta^{res} \approx 4,7$ % для радиальных σ_r^{res} . Наибольшие погрешности наблюдались в области упруго-пластической границы, где крутизна профиля напряжений максимальна и сетевая модель испытывала трудности с точным воспроизведением резкого градиента.

Рассматривались три сценария деградации входных данных:

- добавление гауссовского шума с уровнем $\sigma_\eta/\varepsilon_{eq,max} = 1, 3$ и 5 %;
- ограничение зоны измерений – доступна лишь внешняя половина толщины стенки ($r_i + \frac{r_o - r_i}{2} \leq r \leq r_o$);
- сокращение числа уровней давления до $K = 3$ вместо 10. Результаты показали, что при уровне шума до 3 % точность снижается незначительно ($RMSE/\sigma_0$ возрастает до 4,5 %), тогда как ограничение области измерений вызывает более существенное ухудшение – $RMSE/\sigma_0 \approx 8,1$ %.

Важным результатом является также анализ вклада физической регуляризации L_{reg} в общую функцию потерь. Сравнение моделей, обученных с $\lambda = 0$ (без регуляризации) и $\lambda = 0,05$, показало, что введение ограничений на выполнение уравнения равновесия и кривизну профилей позволяет снизить осцилляции восстановленных профилей напряжений на 35-40 % (по норме вторых разностей), при этом незначительно ухудшая метрику MSE на тестовой выборке. Таким образом, физически обоснованная регуляризация повышает интерпретируемость результатов, что критически важно для инженерных приложений.

Сводные результаты численного исследования точности нейросетевого восстановления остаточных напряжений при различных сценариях деградации входных данных приведены в табл. 1. Анализ данных подтверждает, что предложенная архитектура с физической регуляризацией демонстрирует устойчивость к умеренному шуму и сокращению числа уровней давления, однако чувствительна к ограничению пространственного охвата деформационных измерений.

Приведённые данные наглядно демонстрируют иерархию влияния различных факторов на точность метода. Наиболее критичным является пространственное ограничение зоны измерений: недоступность внутренней половины толщины стенки, где сосредоточены максимальные пластические деформации и наиболее резкие градиенты напряжений, приводит к двукратному росту ошибки по сравнению с базовым вариантом. Это объясняется тем, что нейросетевая модель лишается информации о наиболее информативных зонах деформационного поля, характеризующих глубину проникновения пластической зоны. Сокращение числа уровней давления с $K = 10$ до

$K = 3$ также ощутимо снижает точность ($RMSE/\sigma_0$ возрастает с 3,2 до 5,3 % для σ_θ^{res}), поскольку уменьшается объём информации о нелинейной эволюции деформационного поля в процессе нагружения. В то же время умеренный шум (до 3 %) оказывает относительно слабое влияние, что свидетельствует о высокой робастности обученной модели к случайным погрешностям измерения, обусловленной применением регуляризации и аугментации обучающей выборки.

Таблица 1

Сводные результаты численного исследования точности нейросетевого восстановления остаточных напряжений при различных сценариях деградации входных данных

Сценарий	RMSE/ σ_0 для σ_θ^{res} , %	RMSE/ σ_0 для σ_r^{res} , %	Снижение осцилляций, %
Базовый (без шума, полная область, $K = 10$)	3,2	4,7	-
Шум $\sigma_\eta/\varepsilon_{eq,max} = 1\%$	3,6	5,1	37
Шум $\sigma_\eta/\varepsilon_{eq,max} = 3\%$	4,5	6,3	35
Шум $\sigma_\eta/\varepsilon_{eq,max} = 5\%$	6,8	9,2	31
Ограниченная зона (внешняя половина толщины)	8,1	11,4	28
Сокращённое число уровней давления ($K = 3$)	5,3	7,6	33

Предложенный подход позволяет:

- воспроизвести процесс автофреттирования с учётом реальных механических характеристик материала и диаграммы упрочнения;
- получить набор полей эквивалентных деформаций и соответствующих профилей остаточных напряжений по толщине стенки;
- сформировать репрезентативный синтетический датасет для обучения и валидации нейросетевой модели.

На основе такого датасета может быть построена нейросетевая модель, аппроксимирующая отображение от деформационных полей (или их одномерных проекций) к распределениям остаточных окружных и осевых напряжений. Данная модель способна корректно передавать характер изменения напряжений по радиусу и улавливать основные особенности автофреттированного состояния, включая переход от растяжения у наружной поверхности к сжатию в объёме.

Разработанный нейросетевой подход может рассматриваться как эффективный инструмент решения обратной задачи – восстановления остаточных напряжений по деформационным данным при испытаниях реальных ответственных элементов. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- расширение обучающего датасета за счёт разнообразия геометрий, режимов автофреттирования и свойств материалов;
- интеграция априорных физических ограничений (равновесие, совместность деформаций, критерии прочности) в структуру нейросетевой модели;
- адаптация метода к другим типам нагружения и конструкциям (многослойные оболочки, трубопроводы высокого давления и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Feoktistov, S. I. Modeling of Hydraulic Autofrettage of Thick-Walled Cylindrical Shells Taking into Account Elastoplastic Anisotropy Caused by the Bauschinger Effect / S. I. Feoktistov, I. K. Andrianov, H. Lin // Mechanics of Solids. – 2025. – Vol. 60, No. 2. – P. 891-911. – DOI 10.1134/S0025654424603367.
2. Андрианов, И. К. Анализ нагружения толстостенных оболочек в пространстве Ильюшина при автофреттировании / И. К. Андрианов, С. И. Феоктистов // Прикладная математика и механика. – 2025. – Т. 89. – № 2. – С. 295-309.



3. Андрианов, И. К. Оценка несущей способности оболочек с центральной симметрией в условиях физической и геометрической нелинейностей / И. К. Андрианов, Е. К. Чепурнова // Жилищное строительство. – 2025. – № 12. – С. 12-17.
4. Андрианов, И. К. Гидростатическое сжатие толстостенной сферической оболочки при нелинейном законе упрочнения / И. К. Андрианов, Е. К. Чепурнова // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4-3 (70). – С. 169-174.
5. Андрианов, И. К. Осесимметричное деформирование толстостенной стеснённой оболочки под внутренним давлением при нелинейном законе деформационного упрочнения / И. К. Андрианов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 44-51.
6. Андрианов, И. К. Обратная задача упругопластического деформирования свободной толстостенной цилиндрической оболочки с учётом нелинейного закона упрочнения / И. К. Андрианов, С. И. Феоктистов // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Т. 86. – № 3. – С. 259-269.
7. Андрианов, И. К. Метод определения наиболее термонагруженной области на поверхности лопатки газотурбинного двигателя с использованием нейронной сети / И. К. Андрианов, Д. О. Фролов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 11-15.
8. Петрова, А. Н. Влияние различных типов шумов и пропусков данных на качество нейросетевого ранжирования / А. Н. Петрова, Д. О. Фролов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2026. – № I (89). – С. 94-104.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINERY

Косачев К. Д., Саблин П. А., Серебренникова А. Г.
K. D. Kosachev, P. A. Sablin, A. G. Serebrennikova

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА МАРКИ VT3

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PROCESSING MODE PARAMETERS ON SURFACE QUALITY WHEN TURNING BLANKS OF VT3 TITANIUM PARTS

Косачев Кирилл Дмитриевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета, ассистент кафедры «Машиностроение» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: KodmicH@yandex.ru.

Kirill D. Kosachev – Postgraduate Student, Assistant, Department of Mechanical Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: KodmicH@yandex.ru.

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Серебренникова Анжела Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: S_angel@kmscom.ru.

Angela G. Serebrennikova – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: S_angel@kmscom.ru.

Аннотация. Проведено исследование влияния скорости резания при обработке точением титанового сплава VT3 на качество обработанной поверхности. Предложен критерий прогнозирования шероховатости поверхности изделия при обработке на токарном станке – амплитудные значения виброускорений.

Summary. The effect of cutting speed during turning of titanium alloy VT3 on the quality of the treated surface has been studied. A criterion for predicting the roughness of the surface of a product during machining on a lathe is proposed – the amplitude values of vibration accelerations.

Ключевые слова: титан, точение, качество поверхности, шероховатость, вибрации, сила резания, стружкообразование.

Key words: titanium, turning, surface quality, roughness, vibrations, cutting force, chip formation.

УДК 621.9

Введение. Титановые сплавы находят широкое применение в различных отраслях промышленности ввиду их высокой удельной прочности, коррозионной стойкости во многих агрессивных средах. Обработка титана резанием затруднена из-за склонности к налипанию, низкой теплопроводности и плохих антифрикционных свойств. В связи с чем актуально исследование процесса точения титана с целью последующей оценки полученного качества поверхности.

Цель работы заключается в повышении эксплуатационных характеристик деталей из титанового сплава VT3 путём исследования шероховатости поверхности, получаемой в результате точения, а также в выявлении возможных критериев, позволяющих прогнозировать шероховатость поверхности при лезвийной обработке на токарном станке.

Исследование проводилось на лабораторном стенде STD.201-2 для исследования режимов резания, установленном на универсальном токарно-винторезном станке 1К625. Функционально стенд состоит из головки-резцедержателя, интерфейсного блока, персонального компьютера и комплекта кабелей (см. рис. 1).

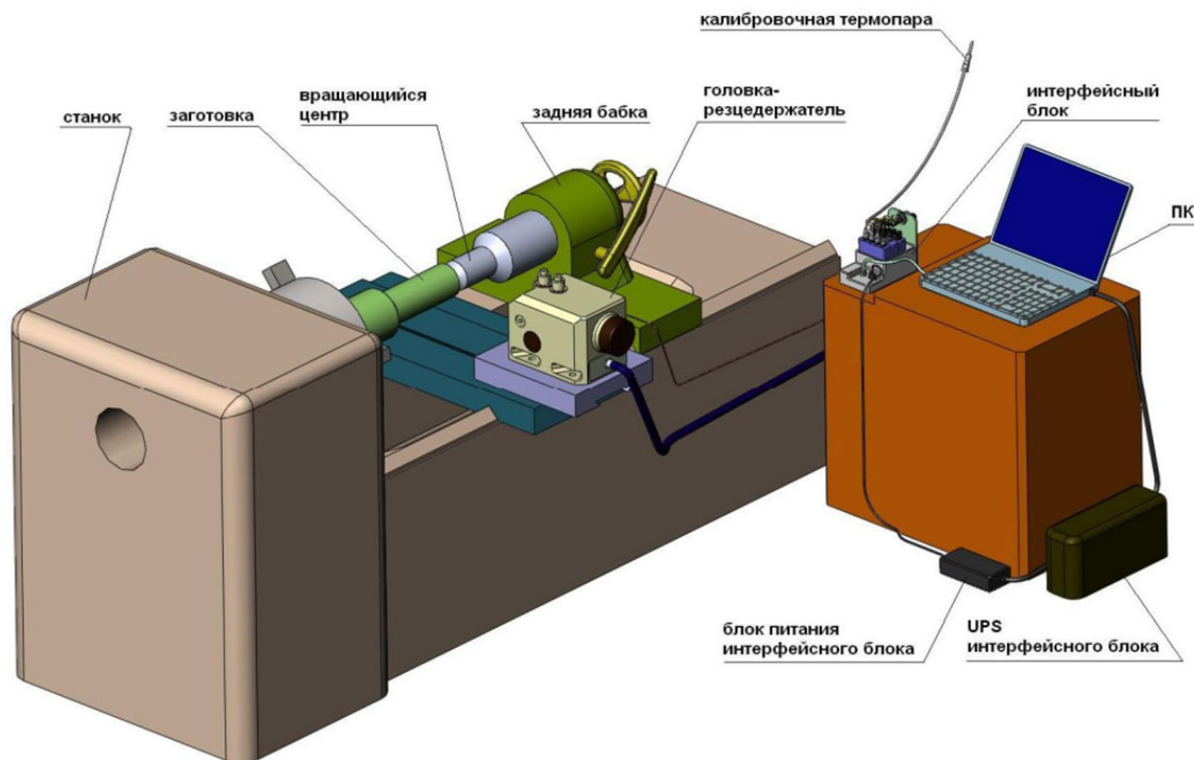


Рис. 1. Схема расположения элементов стенда

Стенд позволяет фиксировать составляющие силы резания по трём осям (P_x , P_y , P_z) при помощи трёх тензодатчиков консольного типа BSA-2, установленных в головке-резцедержателе. Диапазон измерения нагрузок P_x , P_y – от 0 до 9800 Н, диапазон измерения нагрузки P_z – от 0 до 14 700 Н. Также в головке-резцедержателе установлены три вибропреобразователя AP-2037-100, позволяющие считывать виброускорение с амплитудой до 500 м/с². Измерение параметров осуществлялось с частотой 1560 Гц.

Производилась обработка подготовленной цилиндрической заготовки из титана марки ВТ3 диаметром 80 мм без СОЖ. В качестве режущего инструмента использовался резец с твёрдосплавной пластиной из материала ВК8 со следующей геометрией: $\gamma = 14^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\varphi = 45^\circ$. Точение осуществлялось при подаче $S = 0,11$ мм/об на шести разных скоростях резания с длиной прохода 20 мм. Подготовка заготовки заключалась в создании канавок шириной 5 мм через каждые 20 мм для исследования различных режимов резания на одной заготовке (см. рис. 2).

После точения производилось измерение параметра шероховатости R_a детали профилометром модели TR 200.

На основании полученных в ходе эксперимента данных построены графики зависимости амплитудных значений виброускорения по трём осям от скорости резания, график зависимости шероховатости поверхности R_a от скорости резания, а также графики сил резания при различных скоростях. Графики представлены на рис. 3, 4.

На построенном графике зависимости амплитудных значений виброускорения и шероховатости поверхности R_a от скорости резания (см. рис. 3) наблюдается корреляция между амплитудными значениями виброускорений и шероховатостью поверхности. Среднее значение коэффициента корреляции между шероховатостью поверхности и амплитудой вибрации по трём осям соста-

вило 0,74. При уменьшении амплитуды виброускорений снижается шероховатость поверхности, за исключением случаев обработки при скоростях 50,3 и 62,8 м/мин. При исключении данных точек (50,3 и 62,8 м/мин) средний коэффициент корреляции по трём осям составляет 0,91.

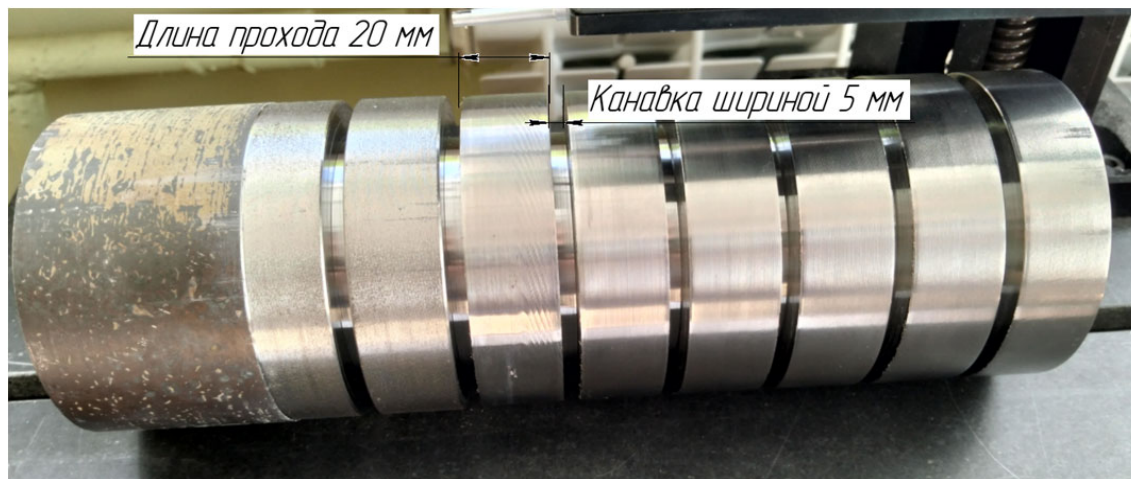


Рис. 2. Внешний вид заготовки из титана ВТЗ

В результате анализа графиков силы резания при обработке на скоростях 50,3 и 62,8 м/мин (см. рис. 4) наблюдаются длинноволновые колебания всех проекций силы резания, причём при скорости 62,8 м/мин амплитуда колебаний меньше (на примере силы P_x : при скорости 50,3 м/мин проекция силы изменяется от 60 до 100 Н, в то же время при скорости 62,8 м/мин проекция силы изменяется от 75 Н до 100 Н), что объясняется образованием элементной стружки при данных скоростях резания – происходит накопление энергии, затем отрыв элемента стружки от заготовки, что приводит к снижению силы резания. При увеличении скорости резания элементная стружка переходит в сливную, что приводит к исчезновению длинноволновых колебаний силы резания.

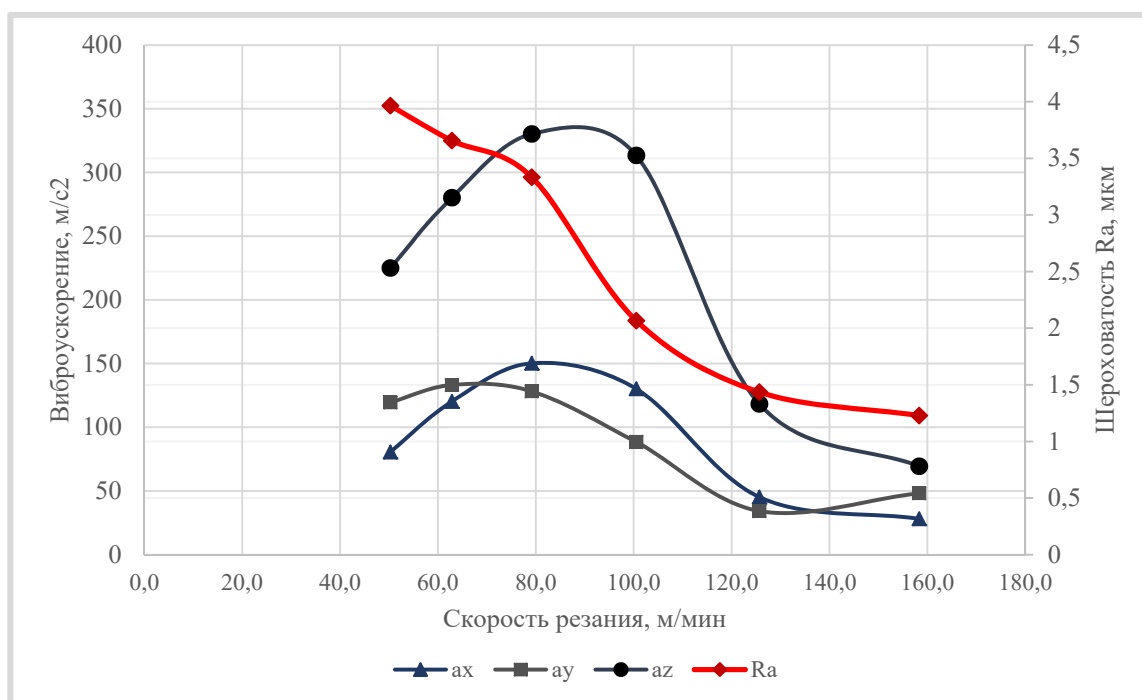


Рис. 3. Зависимость амплитуды виброускорения и шероховатости Ra от скорости резания

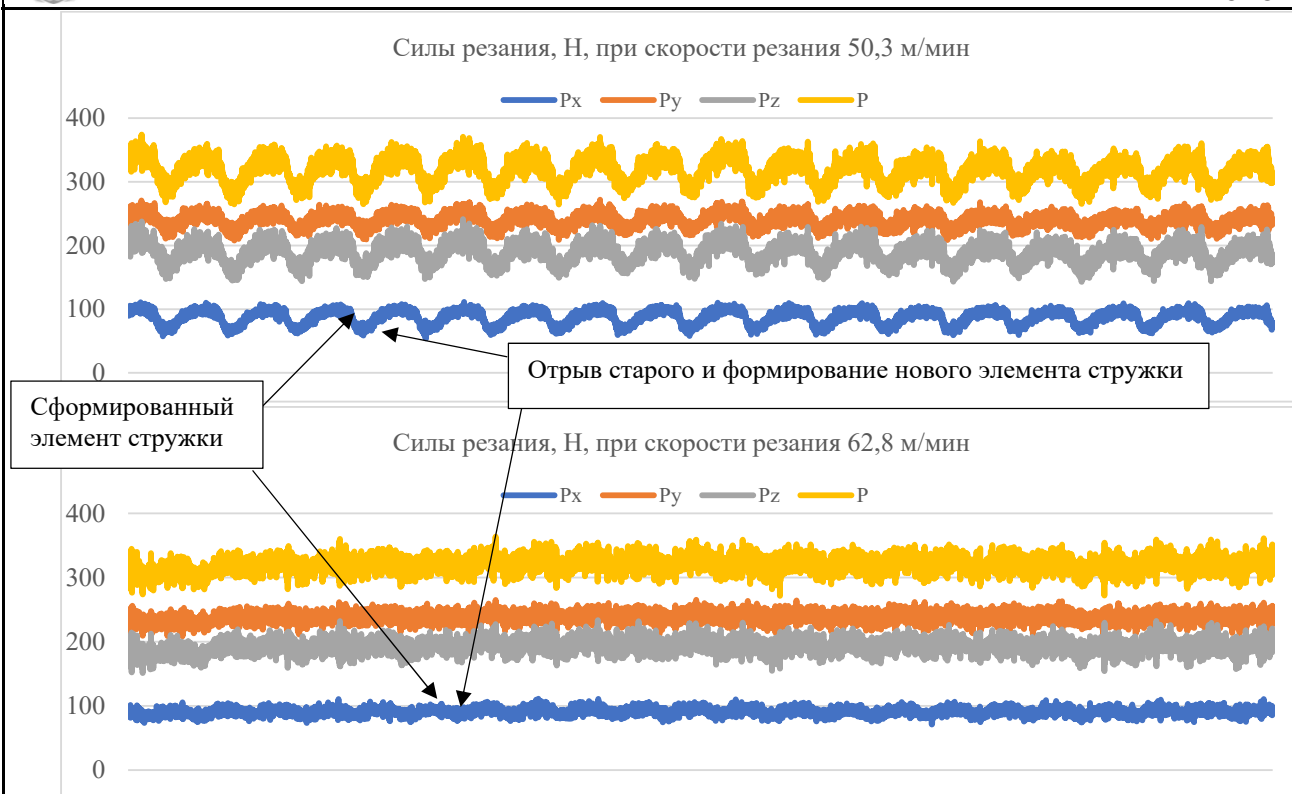


Рис. 4. Графики силы резания

Образование элементной стружки при обработке титана на скоростях от 40 до 60 м/мин обусловлено повышением температуры в месте контакта срезаемого слоя с передней поверхностью режущего инструмента. Из-за высокой активности титан начинает интенсивно поглощать кислород и азот, в результате чего теряется пластичность, происходит охрупчивание срезаемого слоя. Однако при дальнейшем повышении скорости резания элементная стружка переходит в стружку скалывания, что объясняет снижение колебаний силы резания при более высоких скоростях.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что при обработке точением титана марки ВТЗ в областях скоростей выше 60 м/мин возможно прогнозирование шероховатости поверхности по амплитудным значениям сигналов виброускорения при обработке. Однако данная гипотеза требует подтверждения с большим количеством экспериментальных данных.

Установлено, что при повышении скорости резания улучшается шероховатость поверхности R_a , а следовательно, и эксплуатационные свойства изделий. Наименьшая шероховатость поверхности ($R_a = 1,228$ мкм) достигнута при обработке на скорости 158,3 м/мин. Наибольшее значение шероховатости поверхности ($R_a = 3,97$ мкм) достигнуто при наименьшей исследуемой скорости резания 50,3 м/мин – при такой скорости резания не наблюдается корреляция между амплитудой виброускорений и шероховатостью поверхности, что объясняется образованием элементной стружки при данной скорости резания.

Установлено, что при обработке на скоростях резания 50,3 м/мин и 62,8 м/мин амплитудные значения виброускорений не соотносятся со значениями шероховатости, что объясняется образованием стружки скалывания. Подобное несоответствие не позволяет прогнозировать шероховатость поверхности по амплитудным значениям виброускорений в данном диапазоне скоростей резания.

Выводы. Проведено исследование влияния скорости резания при обработке точением заготовок деталей из титанового сплава ВТЗ на шероховатость обработанной поверхности. Установлено, что при повышении скорости резания снижается шероховатость поверхности изделий, а зна-

чит, и повышаются эксплуатационные свойства деталей машин (например, усталостная прочность, долговечность разъемных соединений).

Предложен критерий прогнозирования шероховатости поверхности изделия при обработке на токарном станке – амплитудные значения виброускорений.

В дальнейших исследованиях планируется найти и оценить иные критерии для прогнозирования шероховатости поверхности, например, такие как информационная энтропия вибросигнала, спектр мощности вибросигнала и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безъязычный, В. Ф. Справочник токаря-универсала / В. Ф. Безъязычный, В. Г. Моисеев, Д. Г. Белецкий. – М.: Машиностроение, 2007. – 576 с.
2. Калинин, С. В. Получение шероховатости высокой чистоты на поверхности штока гидроцилиндра из титанового сплава ВТ-6 / С. В. Калинин, А. О. Гришарин // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сборник науч. трудов 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 04-05 июня 2015 года / отв. ред. А. А. Горохов. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 160-162.
3. Ким, В. А. Математическое моделирование стружкообразования при точении титанового сплава / В. А. Ким, Е. В. Самар, Ч. Ф. Якубов // Технология машиностроения. – 2017. – № 12. – С. 42-48.
4. Кривоухов, В. А. Обработка резанием титановых сплавов / В. А. Кривоухов, А. Д. Чубаров. – М.: Машиностроение, 1970. – 184 с.
5. Некоторые особенности механической обработки титановых сплавов / Е. С. Дорофеева, Д. С. Литвиненко, Н. Ф. Янковская, Н. А. Амельченко // Решетневские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 494-496.
6. Обработка металлов резанием: справ. технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; под общ. ред. А. А. Панова. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.
7. Процессы структурообразования при высокоскоростной механической обработке поверхности элементов из титанового сплава ВТ20, обеспечивающие надёжность летательных аппаратов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев, А. В. Солнцева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № V (61). – С. 92-100.
8. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справ. / Я. Л. Гуревич, М. В. Горохов, В. И. Захаров и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
9. Самар, Е. В. Новый подход к управлению параметрами технологической системы резания / Е. В. Самар, Б. Я. Мокрицкий // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 76-82.
10. Справочник металлиста. В 5 т. Т. 2 / Под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема. – М.: Машиностроение, 1976. – 720 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, А. Г. Косилова [и др.]. – 5-е изд., исправ. – М.: Машиностроение, 2003. – 944 с.



Джемалядинов Р. М., Абдулгазис Д. У., Моисеев Д. В., Башкова Т. И.
R. M. Dzhemalyadinov, D. U. Abdulgazis, D. V. Moiseev, T. I. Bashkova

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ШЛИФОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE PRODUCTIVITY OF TOOL STEELS COMBINED GRINDING

Джемалядинов Руслан Марленович – начальник Студенческого конструкторского бюро Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru.

Ruslan M. Dzhemalyadinov – Head of the Student Design Bureau, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru.

Абдулгазис Дилявер Умерович – заведующий кафедрой «Охрана труда в машиностроении и социальной сфере», доцент Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: gruntex@rambler.ru.

Dilyaver U. Abdulgazis – Head of the Department of Occupational Safety in Mechanical Engineering and the Social Sphere, Associate Professor, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: gruntex@rambler.ru.

Моисеев Дмитрий Владимирович – доктор технических наук, доцент, декан факультета информационных технологий Севастопольского государственного университета (Россия, Севастополь). E-mail: dvmoiseev@sevsu.ru.

Dmitriy V. Moiseev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Information Technology, Sevastopol State University (Russia, Sevastopol). E-mail: dvmoiseev@sevsu.ru.

Башкова Татьяна Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и материаловедение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: telem01@mail.ru.

Tatyana I. Bashkova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Chemistry and Materials Science Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: telem01@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены особенности учёта производительности алмазных кругов на металлической связке при круглом шлифовании инструментальных сталей с введением в зону обработки дополнительной электрической энергии. Показано, что традиционные методы оценки производительности, учитывающие только кинематические особенности процесса, не отражают реальных условий съёма материала при комбинированном шлифовании. Предложены показатели фактической производительности и коэффициента съёма материала, учитывающие показатели электрического воздействия и реальное время контакта шлифовального круга с деталью. Установлено, что воздействие дополнительной энергии электрического импульса способствует стабилизации режущей способности алмазного круга и повышает производительность процесса.

Summary. This paper investigates the performance of metal-bonded diamond grinding wheels used in cylindrical grinding of tool steels using auxiliary electrical energy. It is shown that traditional productivity evaluation methods, which consider only the kinematic characteristics of the process, do not reflect the actual material removal conditions during combined grinding. Indicators of actual productivity and material removal rate are proposed, taking into account the electrical impact and the actual contact time of the grinding wheel with the workpiece. It is established that the additional energy of the electrical pulse contributes to the stabilization of the diamond wheel's cutting performance and improves process productivity.

Ключевые слова: комбинированное шлифование, инструментальные стали, производительность, импульсное электрическое воздействие, алмазное шлифование.

Key words: combined grinding, tool steels, productivity, pulsed electrical action, diamond grinding.

УДК 621.923.02

Введение. Алмазное шлифование широко применяется при обработке инструментальных сталей на операциях полустойковой и чистой обработки [1–4]. При работе кругами на металлических связках процесс часто сопровождается засаливанием рабочей поверхности, что приводит к снижению режущей способности и, как следствие, к уменьшению производительности во времени [5; 6]. Производительность обработки является одним из ключевых показателей работоспособности алмазных кругов.

Одним из эффективных способов интенсификации процесса является введение в зону резания дополнительной электрической энергии [7]. Электрические импульсы оказывают локальное эрозионное воздействие на связку круга и продукты адгезии, обеспечивая поддержание оптимального выступания алмазных зёрен. В этих условиях возникает необходимость уточнения методики учёта производительности алмазного шлифовального круга.

Анализ последних исследований и публикаций. При шлифовании сплошного припуска расчётная производительность Q_p определяется по формуле [8; 9]

$$Q_p = S_n \cdot S_{np} \cdot R_1 \cdot \pi, \quad (1)$$

где S_n – поперечная подача, мм/дв.ход; S_{np} – продольная подача, м/мин; R_1 – радиус обрабатываемой заготовки, мм.

Фактическая производительность Q_f для классической кинематики определяется по зависимости [10]

$$Q_f = \frac{M}{\tau \cdot \delta}, \quad (2)$$

где M – масса сошлифованного за время опыта материала, г; τ – операционное время, мин; δ – плотность обрабатываемого материала, г/см³.

Коэффициент фактической производительности $K_{ф.п}$ представляет собой отношение фактического съёма обрабатываемого материала к расчётному:

$$K_{ф.п} = Q_f / Q_p.$$

Коэффициент шлифования G использовался при сравнении алмазного шлифования с абразивным. Он представляет собой отношение объёма сошлифованного обрабатываемого материала к объёму израсходованного рабочего слоя инструмента. Для алмазного инструмента

$$G = \frac{8,78 \cdot K}{q_v},$$

где K – концентрация алмазов, %; q_v – объём израсходованного рабочего слоя инструмента.

Эффективная мощность шлифования определяется как разность общей мощности и мощности холостого хода электродвигателя привода шлифовального круга. Мощность измерена ваттметром RS485. Расход электроэнергии измерялся счётчиком активной энергии СА4-514.

При выводе формулы (1) для расчётной производительности имеется в виду, что за каждый продольный ход (или двойной ход) стола равномерно по всему объёму заготовки круг снимает слой обрабатываемого материала, равный объёму кольца с толщиной S_n . Таким образом, расчётная производительность по формуле (1) определяет предельно возможную производительность при заданных режимах в условиях непрерывного контакта инструмента с деталью (см. рис. 1).

Фактический съём металла Q_f при шлифовании всегда меньше расчётного, что объясняется непрерывным уменьшением величины подачи S_n вследствие износа круга и упругими отжатиями в технологической системе СПИЗ (станок-приспособление-инструмент-заготовка) [8]. Это различие определяется конкретными условиями обработки и может изменяться в значительных пределах,

особенно при алмазном шлифовании на прочных металлических связках, когда из-за засаливания круга с течением времени уменьшается выступание зёрен над связкой [3].

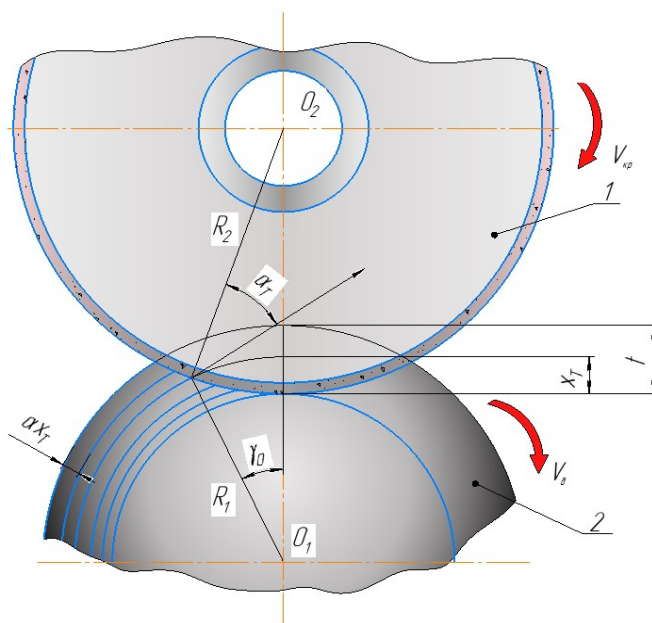


Рис. 1. Расчётная схема круглого наружного шлифования:
 1 – шлифовальный круг, 2 – обрабатываемая деталь, V_d – скорость вращения детали, $V_{кр}$ – скорость вращения круга, R_1 – радиус детали, R_2 – радиус круга, α_T – угол входа заготовки в рабочую поверхность круга, x_T – глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, t – глубина шлифования, αx_T – величина элементарной цилиндрической оболочки с исходной шероховатостью

Для точного расчёта фактического съёма материала по формуле (2) необходимо либо обеспечивать при различных опытах равенство времени обработки, либо в каждом опыте точно измерять его. Обеспечить равноценные условия работы исследуемых инструментов по времени контакта (времени обработки) при черновом шлифовании, т. е. при наличии поверхностных микронеровностей, не представляется возможным ввиду неповторимости нерегулярного профиля покрытия, изменяющегося, кроме того, с течением времени в процессе обработки.

При экспериментальных исследованиях наиболее целесообразно рассчитывать фактическую производительность по формуле (2) при контроле времени контакта, для чего и разработано специальное устройство (см. рис. 2).

В качестве примера приведены данные по расчёту производительности при черновом шлифовании заготовки 3X2B8 кругом 1A1 250×20×127×2 AC15 D126 100 R M 50 м/с на железоникелевой связке МНК и связке на основе бронзы М1. Режимы обработки: $S_{п} = 20$ мкм/дв.ход; $S_{пр} = 0,4$ м/мин; $V_d = 20$ м/мин; $V_{кр} = 25$ м/с; $U_m = 35$ В, τ_k – время контакта инструмента с обрабатываемой заготовкой. Радиус детали $R_1 = 75$ мм. Расчётная производительность определена по формуле (1).

Как видно из таблицы, только контроль времени контакта позволяет объективно оценить фактический съём материала в единицу времени и учесть в расчётах различие в режущей способности для кругов на различных типах связки. Использование специального устройства позволяет контролировать равенство времени обработки в каждом опыте, обеспечивая равноценность условий эксперимента по времени контакта круга с деталью.

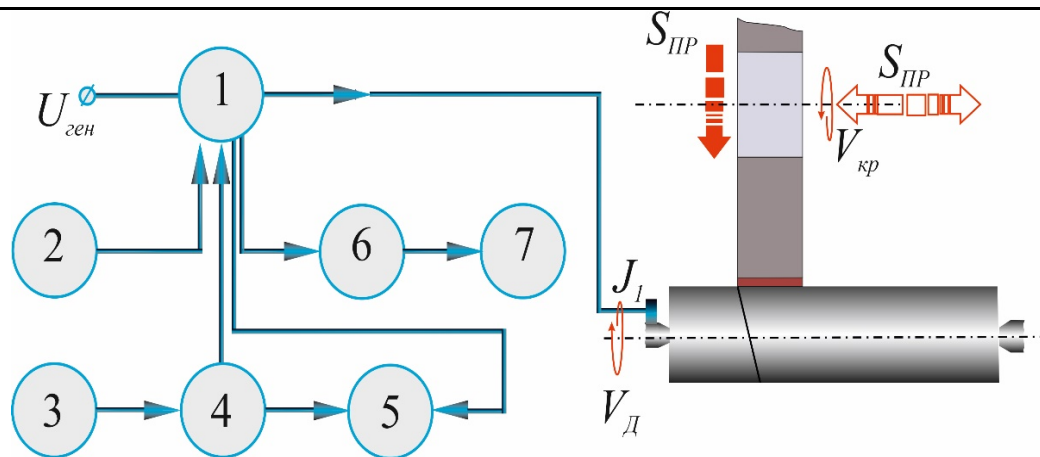


Рис. 2. Схема устройства для контроля времени контакта шлифовального круга с заготовкой:
 1 – датчик сигнала, 2 – источник опорного сигнала постоянной частоты,
 3 – источник постоянного тока, 4 – электронный ключ, 5 – амплитудный детектор,
 6 – фильтр низких частот, 7 – счётчик импульсов, $V_д$ – скорость вращения детали,
 $V_{кр}$ – скорость вращения алмазного круга, $S_{пр}$ – продольная подача, $S_п$ – поперечная подача,
 J – величина импульсов, $U_{ген}$ – генератор импульсного напряжения

Таблица 1

Расчётная и фактическая производительность шлифования

Марка связки	Продолжительность опыта τ_0 , мин	Время контакта τ_K , мин	Q_p , мм ³ /мин	$Q_{ф}$, мм ³ /мин	
				$\tau = \tau_0$	$\tau = \tau_K$
МНК	46,6	20	1890	646	1506
М1	40,1	20	1890	647	1296

Формулировка цели статьи. Целью работы является разработка подхода к учёту производительности алмазного круга при круглом комбинированном шлифовании инструментальных сталей.

Методика проведения эксперимента. Для контроля времени контакта применялась схема бесконтактного измерения электрического тока (см. рис. 2). Устройство для бесконтактного измерения тока не имеет гальванической связи с электрической цепью и исключает потери мощности на шунтах при контактных схемах измерения.

Предлагаемое устройство обеспечивает срабатывание геркона только на первый импульс тока при каждом очередном контакте инструмента с деталью, что снижает износ контактов геркона из-за существенного уменьшения числа его переключений (не на каждый импульс входного тока). Кроме того, вследствие очень искажённых форм импульсов тока J_1 возможно несколько срабатываний геркона во время одного пакета микроимпульсов тока J_1 , что приводило бы к неправильному отсчёту. Фильтр низких частот служит для исключения влияния паразитных колебаний контактов геркона, возникающих вследствие их упругости.

Для оценки точности измерения времени контакта специальным устройством проводилось комбинированное шлифование заготовки (для сравнения результатов), результаты представлены в табл. 2. Время повторных опытов по секундомеру 600 с.

Средняя квадратическая ошибка измерений: $S_\tau = 0,82$ с. Оценка точности измерений с надёжностью $P = 0,95$: $0,07 < S_\tau < 1,57$. Оценка истинного значения измеряемой величины: $600,08 < \tau_K < 601,6$.

Результаты измерения времени обработки специальным устройством

Время контакта τ_k , с							Среднее значение $\tau_{\text{ср}}$, с
τ_{k1}	τ_{k2}	τ_{k3}	τ_{k4}	τ_{k5}	τ_{k6}	τ_{k7}	
601,0	601,04	599,56	600,32	602,12	602,38	600,48	600,84

Расчёт чистого времени контакта производится по формуле

$$\tau = N / f,$$

где N – число импульсов опорного сигнала за время эксперимента; f – частота импульсов опорного сигнала.

Обсуждение полученных результатов. Действие импульсных разрядов на шлифовальный круг при комбинированном шлифовании заключается в основном в удалении тонких слоёв связки круга в результате локального оплавления и испарения, в разрушении налипающих частиц и продуктов засаливания, что обеспечивает непрерывное выступание алмазных зёрен над поверхностью связки, уменьшает контакт её с обрабатываемым металлом и способствует сохранению высокой режущей способности шлифовального круга. Зависимость фактической производительности обработки $Q_{\text{ф}}$ и эффективной мощности $N_{\text{эф}}$ от продолжительности шлифования τ на режиме обработки: $V_{\text{д}} = 40 \text{ м/мин}$; $V_{\text{кр}} = 25 \text{ м/с}$; $S_{\text{пр}} = 0,8 \text{ м/мин}$; $S_{\text{п}} = 0,01 \text{ мм/дв.ход}$ – приведена на рис. 3.

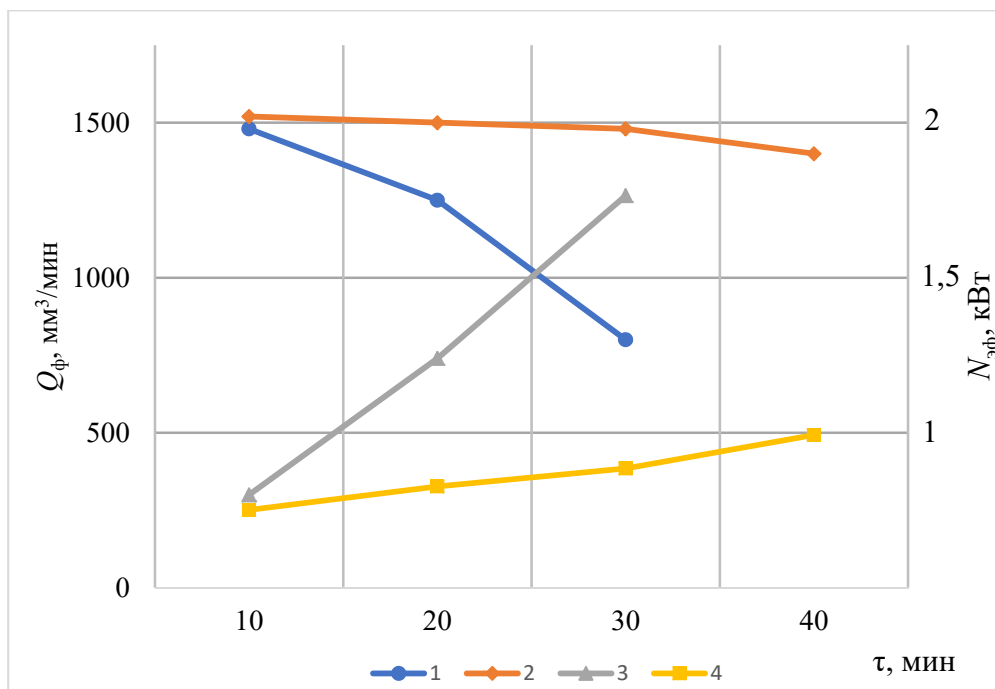


Рис. 3. Зависимость фактической производительности обработки (1, 2) и эффективной мощности (3, 4) от продолжительности шлифования (1, 3 – $U_m = 0 \text{ В}$; 2, 4 – $U_m = 40 \text{ В}$)

Отмеченные особенности процесса алмазного шлифования на связках МНК и М1 являются общими, хотя их количественное выражение существенно корректируется в зависимости от характеристики применяемых алмазных кругов и других условий обработки. Для менее прочных связок М04, М016, которые на определённых режимах могут продолжительное время работать в режиме самозатачивания, эрозионное воздействие может приводить к меньшему эффекту. Однако введе-

ние в зону резания импульсного тока у всех испытываемых кругов повышает производительность шлифования и позволяет работать на более высоких режимах.

Как видно из рис. 3, режущую способность алмазного инструмента, не работающего в режиме самозатачивания, нельзя характеризовать, не определяя, к какому периоду времени работы она относится.

По сравнению с обычным алмазным шлифованием, непрерывная эрозионная правка позволяет поддерживать высокую режущую способность круга при одновременном снижении удельных затрат мощности на съём единицы объёма покрытия. На рис. 3 через 30 мин работы без тока (алмазный круг 1A1 250×20×127×2 AC15 D126 100 R M 50 м/с) производительность шлифования снижается в 2-2,5 раза. При этом алмазные зёрна почти не выступают над связкой.

Можно предположить, что на определённых электрических режимах возможно обеспечить равенство скоростей износа алмазных зёрен и эрозионной правки круга, сохраняя постоянное оптимальное выступание зёрен над связкой.

На рис. 4 показаны зависимости производительности обработки Q_{ϕ} , от амплитудного напряжения импульсов U_m для круга на связке М1. Характеристики кругов и остальные режимы обработки без изменений.

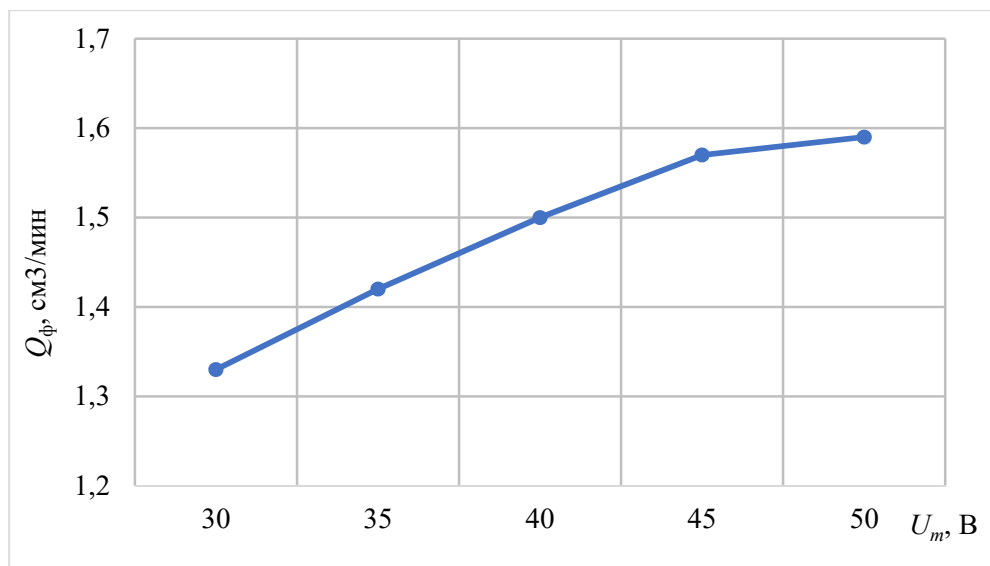


Рис. 4. Зависимость фактической производительности от амплитудного напряжения импульсов

Контроль параметров через 30 мин работы круга показал, что с ростом U_m линейный износ круга неизменно растёт. Однако из-за различной режущей способности, в зависимости от правки круга, конкретным условиям работы соответствует амплитудное напряжение импульсов, при котором удельный расход и удельная себестоимость обработки минимальны.

Увеличение электрической составляющей энергии в допустимых пределах приводит к снижению удельных сил резания и интенсивности засаливания круга, что способствует росту фактической производительности без увеличения механических нагрузок в технологической системе.

Импульсное электрическое воздействие обеспечивает квазистационарное состояние режущего микрорельефа круга, вследствие чего производительность процесса во времени изменяется незначительно.

Заключение

1. Традиционные методы учёта производительности алмазного шлифования не учитывают влияния импульсного электрического воздействия.
2. Предложен подход к оценке производительности комбинированного процесса с использованием модифицированных показателей.



3. Импульсное электрическое воздействие обеспечивает стабилизацию режущей способности алмазного круга и повышение фактической производительности.

4. Разработанная методика позволяет объективно сравнивать режимы обработки и характеристики алмазных кругов при круглом шлифовании инструментальных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федотов, А. А. Засаливание алмазных шлифовальных кругов на металлических связках и пути его снижения / А. А. Федотов // Вестник машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 37-41.
2. Братан, С. М. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учётом взаимных колебаний инструмента и заготовки / С. М. Братан, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25. – № 1. – С. 57-70.
3. Панкин, А. В. Повышение производительности алмазного шлифования инструментальных сталей / А. В. Панкин, С. А. Мельников // Технология машиностроения. – 2011. – № 4. – С. 18-22.
4. Саблин П. А. Поиск оптимального применения цифровых двойников при производстве деталей машин механической обработкой на основе анализа литературных источников / П. А. Саблин, К. Д. Косачев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 67-73.
5. Влияние внешних факторов на технологическую систему высокоточного станка в условиях плавучих мастерских / Е. В. Хекерт, Е. А. Владецкая, С. М. Братан, А. О. Харченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-4 (52). – С. 33-37.
6. Bratan, S. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloys / S. Bratan, T. Stadnik, V. Golovin // Materials Today: Proceedings. 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020. – 2021 – Elsevier Ltd. – P. 2013-2018.
7. Грабченко, А. И. Комбинированные методы абразивной обработки труднообрабатываемых материалов / А. И. Грабченко, В. И. Добровольский, В. А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах. – 2015. – Вып. 85. – С. 45-52.
8. Киселёв, Ю. М. Оценка производительности процессов круглого шлифования / Ю. М. Киселёв, А. Н. Соколов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – № 4. – С. 112-117.
9. Вероятностная модель удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов / С. М. Братан, С. И. Рощупкин, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23. – № 2. – С. 6-16.
10. Malkin, S. Thermal and energy effects in grinding / S. Malkin, C. Guo // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2011. – Vol. 133, No. 6. – P. 061003.

Старцев Е. А., Бахматов П. В.
E. A. Startsev, P. V. Bakhmatov

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА**

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF AN IRON-CONTAINING MATERIAL BASED
ON METALLURGICAL SLAG OBTAINED UNDER AUTOVACUUM CONDITIONS**

Старцев Егор Андреевич – старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Egor A. Startsev – Senior Lecturer, Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В работе рассмотрены структура и свойства железосодержащего материала на основе металлургического шлака, полученного в условиях автовакуума. Актуальность темы связана с необходимостью переработки металлургических отходов и расширением направлений их использования в качестве вторичного сырья. Спекание исходного шлакового материала проводилось в герметичном объёме при участии геттерной среды. Выполнено металлографическое исследование шлифов, и измерена микротвёрдость полученного образца. Показано, что после спекания формируется гетерофазная структура с выраженной морфологической неоднородностью. В объёме материала выделяются светлые, серые и тёмные участки, различающиеся по контрасту, форме и характеру распределения. Светлые области интерпретируются как наиболее железосодержащая составляющая, тогда как тёмная фаза соответствует минеральной матрице шлакового происхождения. Между ними сохраняются переходные зоны, отражающие неполную гомогенизацию материала. Значения микротвёрдости изменяются в широком диапазоне, что подтверждает выраженную неоднородность локальных свойств. В итоге показано, что спекание металлургического шлака в условиях автовакуума приводит к формированию многофазного железосодержащего материала, представляющего интерес как основа для дальнейшей разработки недорогих спечённых материалов прикладного назначения.

Summary. The paper considers the structure and properties of an iron-containing material based on metallurgical slag obtained under autovacuum conditions. The relevance of the topic is related to the need to recycle metallurgical waste and expand the directions of their use as secondary raw materials. Sintering of the initial slag material was carried out in a sealed volume with the participation of a getter medium. A metallographic study of the grinds was performed and the microhardness of the resulting sample was measured. It is shown that after sintering, a heterophase structure with pronounced morphological heterogeneity is formed. There are light, gray, and dark areas in the volume of the material, differing in contrast, shape, and distribution pattern. The light regions are interpreted as the most iron-containing component, while the dark phase corresponds to a mineral matrix of slag origin. Transition zones remain between them, reflecting incomplete homogenization of the material. The microhardness values vary in a wide range, which confirms the pronounced heterogeneity of local properties. As a result, it is shown that sintering of metallurgical slag under autovacuum conditions leads to the formation of a multiphase iron-containing material, which is of interest as a basis for further development of inexpensive sintered materials for applied purposes.

Ключевые слова: металлургический шлак, железосодержащий материал, автовакуум, спекание, микроструктура, микротвёрдость, гетерофазная структура.



Key words: metallurgical slag, iron-containing material, autovacuum, sintering, microstructure, microhardness, heterophase structure.

УДК 621.762.5

Введение. Metallurgical slags are considered among the most massive waste products of metallurgical production [1]. Their accumulation is accompanied by the release of significant areas, an increase in ecological load and loss of raw materials, in the composition of which iron-containing and mineral components are preserved. In connection with this, the reprocessing of slags is considered not only as an environmental protection task, but also as one of the directions for obtaining new materials based on secondary resources [2–3].

One of the promising approaches in this direction is considered to be the application of powder metallurgy methods. For multi-component slag systems, such a way represents a special interest, since it allows using fine-dispersed raw materials, to regulate the composition of the mixture and to form a material under conditions of thermal processing without full melting. Together with this, the behavior of metallurgical slag during sintering is characterized by complexity. This is related to the non-uniformity of the initial composition, the presence of oxide, silicate and iron-containing phases, and also with the possibility of proceeding with restorative processes upon heating [4–5].

Separate importance has sintering in autovacuum conditions, forming a gettering environment. Such an approach allows limiting the influence of the external gas atmosphere and creating more favorable conditions for the transformation of iron-containing components of the slag. As a result, the possibility of obtaining a sintered material, in which an iron-rich composition and a mineral matrix are combined, is realized. At the same time, the key interest represents not only the fact of obtaining a sample, but also the character of the forming structure, since it is precisely she that determines the local properties of the material and its further applied potential [6–9].

Today the question of the internal structure of such materials remains actual. Especially important is to understand how uniform the structure is after sintering, how separate morphological components are distributed and in what limits they change local mechanical properties. In this sense, metallographic analysis and microhardness measurement allow obtaining the most clear representation of the degree of densification of the material, the form of grains, the degree of heterogeneity and the character of structural non-uniformity.

The goal of the present work is the analysis of the structure and properties of an iron-containing material based on metallurgical slag, obtained in autovacuum conditions. The main attention is focused on the features of the microstructure of the sintered sample and on the evaluation of microhardness as an indicator of local non-uniformity of the formed material.

Methodology of the experiment. As the initial material, metallurgical slag of a steel-making plant AO «Amursteel» was used. The formation of a sintered sample based on metallurgical slag in autovacuum conditions has already been considered in the work [10]. In the present work, attention is focused on the preparation of a sample and the subsequent analysis of its microstructure and microhardness.

Microstructural studies were carried out with the help of a Nikon MA200 microscope, sample preparation for microstructural analysis – on a grinding and polishing machine Buehler AutoMet 250 with subsequent etching in 5% alcohol solution of nitric acid for 10–20 s until the microstructure is revealed.

Microhardness was measured by the Vickers method. Indentation with a diamond indenter was used to study the micromechanical properties of individual structural components of the material. Tests were carried out on a microhardness tester HMV-2 Series (Shimadzu), equipped with a pyramid indenter with an angle at the apex of 136° at a load of 0.49 N with a dwell time of 10 s in accordance with the requirements of GOST 9450-76.

Результаты и обсуждение. На первом этапе была выполнена общая оценка поверхности шлифа без полировки и без травления. Структура образца до травления и после представлена на рис. 1.

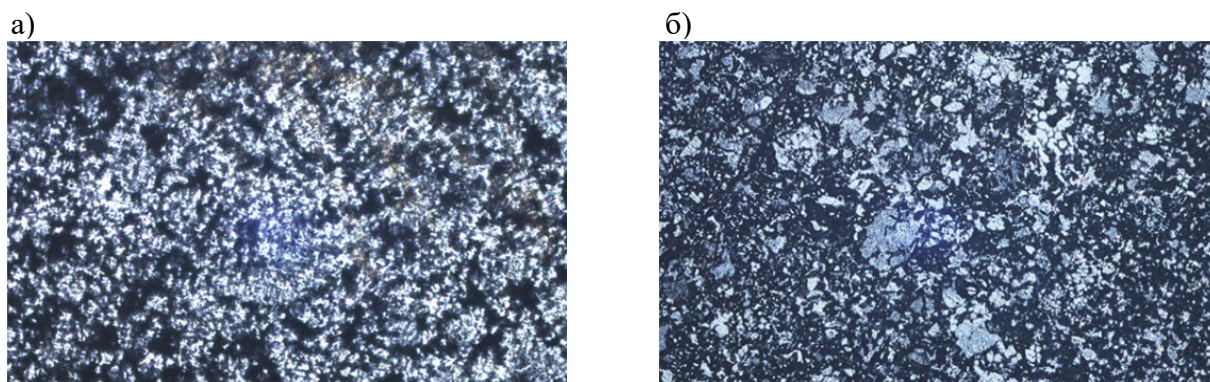


Рис. 1. Структура образца до травления (а) и после (б)

На нетравленном шлифе материал выглядит как тонкодисперсная неоднородная система, в которой уже на уровне общего оптического контраста различаются две основные составляющие. Первая представлена светлыми участками высокой отражающей способности. Они имеют неправильную, местами разветвлённую форму, распределены по полю зрения неравномерно и образуют либо отдельные дискретные фрагменты, либо локальные скопления. Вторая составляющая представлена более тёмным фоном, который занимает межчастковое пространство и визуально связывает всю структуру в единую матрицу. До травления границы между этими составляющими читаются не всегда отчётливо, поэтому структура воспринимается прежде всего как мозаичная и морфологически неоднородная. Уже на этом этапе видно, что спекание не привело к формированию однородной сплошной массы. Материал сохранил выраженную неоднородность по отражающей способности и по характеру распределения отдельных участков.

После травления картина становится значительно более определённой. Светлые области уже не выглядят просто как зоны повышенного блеска, а проявляются как самостоятельные структурные образования с различной формой, размерами и внутренним строением. Среди них выделяются мелкие дисперсные частицы, более крупные зёрна неправильной формы и локальные укрупнённые участки со сложной морфологией. В ряде светлых фрагментов просматриваются собственные внутренние особенности, в том числе неоднородность тона и элементы тонкого рисунка. Это указывает на то, что светлая составляющая не является структурно простой и, вероятно, включает несколько близких по контрасту состояний.

Тёмная составляющая после травления также проявляется яснее и воспринимается уже не как пассивный фон, а как непрерывная матрица, в пределах которой распределены светлые зёрна и их скопления. Между светлыми и тёмными участками местами сохраняются промежуточные по контрасту области. Именно они наиболее важны для интерпретации, поскольку показывают, что границы между структурными составляющими не везде резкие. В материале присутствуют переходные зоны, что характерно для системы, в которой процессы перераспределения вещества и структурного выравнивания прошли не полностью.

Если сравнивать состояние шлифа до и после травления, то до травления фиксируется общий факт неоднородности, тогда как после травления раскрывается её реальный характер. Структура оказывается гетерофазной и разномасштабной. В ней сочетаются более светлые выделения различной морфологии, тёмная матричная составляющая и промежуточные участки, отражающие неполную гомогенизацию материала при спекании. Наиболее корректно интерпретировать эту картину как формирование многофазной железосодержащей системы с выраженной морфологической неоднородностью и зонально неодинаковой степенью структурного преобразования.

На основании сопоставления макроснимка образца с микроструктурой отдельных участков (см. рис. 2) установлено, что материал имеет выраженное зональное строение. По сечению последовательно выделяются светлая, серая и чёрная зоны, различающиеся по соотношению светлых и тёмных структурных составляющих. Светлая зона характеризуется большей долей сравнительно плотных светлых участков. Серая зона занимает промежуточное положение и имеет смешанный характер строения. Чёрная зона отличается преобладанием тёмной матрицы и более дисперсным распределением светлой составляющей. Переход между зонами осуществляется постепенно, без чётких границ, что указывает на неполную гомогенизацию материала после спекания.

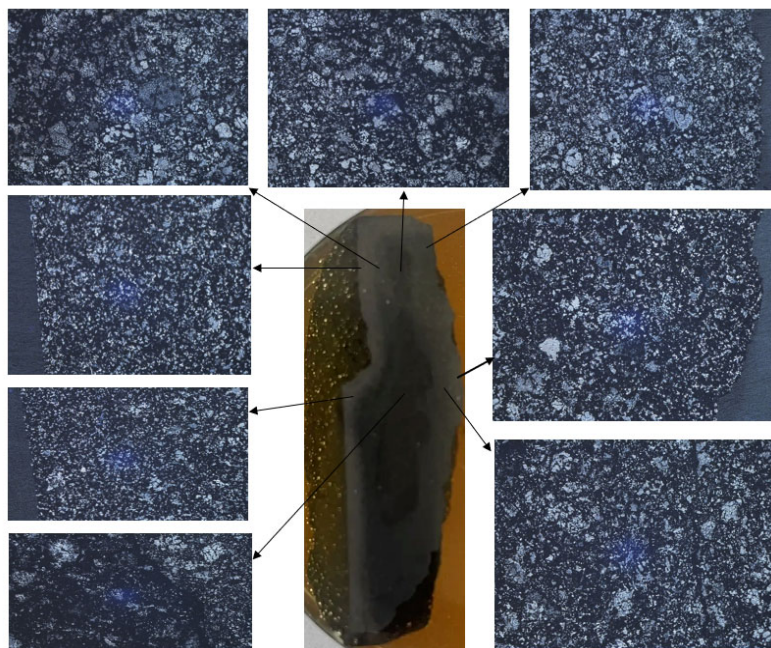


Рис. 2. Микроструктура образца

Светлая зона характеризуется наибольшей долей светлых структурных фрагментов. Здесь они представлены сравнительно крупными участками неправильной формы, местами склонными к укрупнению и слиянию. На их фоне тёмная матрица выражена слабее и занимает меньший объём. Визуально эта зона воспринимается как наиболее насыщенная плотной светлой составляющей. При этом структура не выглядит сплошной и однородной. Светлые участки распределены неравномерно, различаются по размерам и разделены прослойками более тёмной фазы.

Серая зона занимает промежуточное положение как по макроскопическому виду, так и по микроструктурным признакам. В её пределах светлая и тёмная составляющие соотносятся более уравновешенно. Светлые участки здесь мельче, чем в светлой зоне, и распределены более равномерно. Тёмная матрица выражена отчётливее, однако не подавляет светлую фазу полностью. Общая картина выглядит более тонкодисперсной и более смешанной. Именно в серой зоне структура воспринимается как переходная, поскольку здесь не наблюдается явного доминирования ни одной из составляющих. Морфология этой области хорошо отражает промежуточный характер структурного состояния материала.

Чёрная зона отличается наибольшей ролью тёмной матрицы и наиболее дисперсным распределением светлой составляющей. Светлые участки здесь сохраняются, однако они становятся менее крупными, более разобщёнными и чаще представлены отдельными включениями или мелкими скоплениями. Тёмная фаза образует непрерывную основу структуры и в большей степени определяет общий вид данной зоны. По сравнению со светлой и серой областями чёрная зона выглядит менее выровненной и более контрастной по внутреннему строению. Это позволяет интер-

претировать её как участок с наиболее выраженной морфологической неоднородностью и с меньшей степенью структурного преобразования в процессе спекания.

Особый интерес представляют переходы между зонами. Чёткие границы между ними не прослеживаются. Изменение структуры происходит постепенно, за счёт последовательного перераспределения светлой и тёмной составляющих. При переходе от светлой зоны к серой уменьшается доля крупных светлых участков и возрастает роль тёмной матрицы. При дальнейшем переходе к чёрной зоне светлая фаза становится ещё более дисперсной и разобшённой, тогда как тёмная составляющая приобретает доминирующее значение. Такой характер изменения структуры указывает на неполную гомогенизацию материала по объёму образца.

В целом микроструктура по сечению образца может быть охарактеризована как зонально неоднородная. Светлая зона связана с большей концентрацией плотной светлой составляющей, серая зона имеет переходный смешанный характер, а чёрная зона отличается преобладанием тёмной матрицы и более дисперсным распределением светлых участков. Это позволяет рассматривать полученный материал как многофазную железосодержащую систему, в которой структурное состояние изменяется по сечению образца постепенно и неравномерно.

Выявленная морфологическая неоднородность материала должна отражаться и на его локальных механических свойствах. В связи с этим следующим этапом была выполнена оценка микротвёрдости, позволяющая проследить, насколько различия в строении отдельных участков проявляются в сопротивлении материала локальному вдавливанию. Распределение значений микротвёрдости представлено на рис. 3.

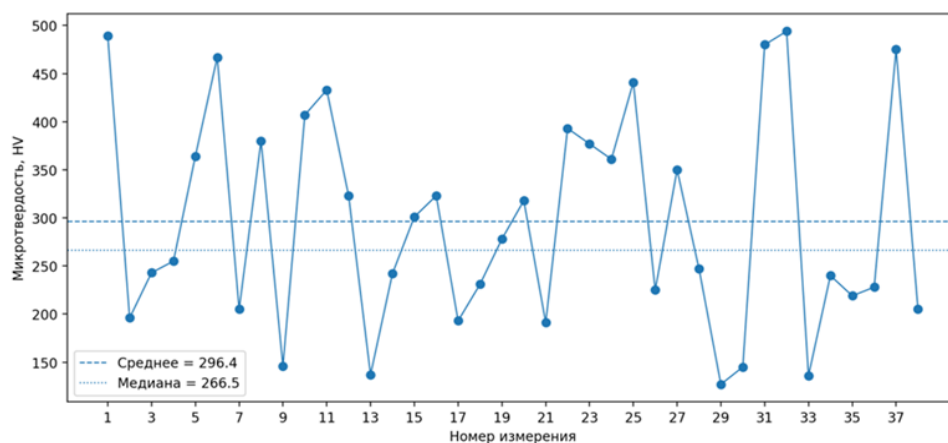


Рис. 3. График распределения микротвёрдости

Полученные значения изменяются в широком диапазоне – от 127 до 494 HV, что указывает на существенное различие локальных механических свойств в пределах одного образца. Среднее значение микротвёрдости составляет 296,4 HV, медиана 266,5 HV. Такой разброс не может рассматриваться как случайный и отражает неоднородность структуры, установленную при металлографическом анализе.

Распределение значений по точкам измерения показывает, что в материале отсутствует единый устойчивый уровень твёрдости. Наряду с участками, для которых характерны сравнительно низкие значения порядка 127-205 HV, фиксируются зоны со средним уровнем микротвёрдости около 220-380 HV, а также отдельные участки, в которых микротвёрдость возрастает до 441-494 HV. Это позволяет говорить о сложном локальном сочетании более мягких и более твёрдых структурных составляющих, сформировавшихся после спекания.

Сопоставление результатов микротвёрдости с данными микроструктурного анализа показывает, что низкие значения, наиболее вероятно, связаны с участками, где сильнее выражена тёмная матрица и менее плотная составляющая материала. Более высокие значения, напротив, можно



соотнести с более плотными светлыми участками, которые на травленном шлифе выделяются отчётливее и интерпретируются как наиболее железосодержащая часть структуры. Промежуточные значения соответствуют переходным зонам, в которых светлая и тёмная составляющие находятся в смешанном соотношении. В итоге разброс микротвёрдости хорошо согласуется с выявленным зональным и гетерофазным строением материала.

Стоит отметить, что полученные значения микротвёрдости для спечённого образца являются весьма высокими. Даже с учётом выраженной неоднородности структуры в материале фиксируются участки с микротвёрдостью до 494 HV, что заметно превышает уровень, характерный для многих конструкционных углеродистых сталей в обычном состоянии. Для сравнения, микротвёрдость феррито-перлитных сталей обычно находится на существенно более низком уровне, тогда как значения, полученные в данной работе, уже соответствуют более твёрдым и упрочнённым структурным состояниям. Это позволяет рассматривать сформировавшийся материал не просто как спечённую массу на основе шлака, а как систему, содержащую локальные участки с высоким сопротивлением пластической деформации. В итоге можно говорить о том, что при спекании формируются достаточно твёрдые структурные составляющие, способные обеспечивать повышенную износостойкость материала.

Выводы.

1. После спекания металлургического шлака в условиях автовакуума формируется гетерофазный железосодержащий материал с выраженной морфологической неоднородностью. На травленном шлифе отчётливо различаются светлые, серые и тёмные участки, отличающиеся по контрасту, форме и характеру распределения.

2. По сечению образца выявлено зональное строение. Светлая зона характеризуется большей долей плотной светлой составляющей, серая зона имеет промежуточный смешанный характер, а чёрная зона отличается преобладанием тёмной матрицы и более дисперсным распределением светлых участков. Переход между зонами осуществляется постепенно, что указывает на неполную гомогенизацию материала.

3. Измерение микротвёрдости подтвердило выраженную неоднородность локальных механических свойств. Значения микротвёрдости изменяются в широком диапазоне – от 127 до 494 HV, что отражает различие структурных состояний отдельных участков материала.

4. Наличие областей с высокой микротвёрдостью показывает, что в процессе спекания формируются достаточно твёрдые структурные составляющие. В итоге полученный материал может рассматриваться как перспективная основа для дальнейшего изучения и разработки недорогих спечённых материалов прикладного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романенко, А. Г. Металлургические шлаки / А. Г. Романенко. – М.: Металлургия, 1977. – 191 с.
2. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства / С. С. Бельский, А. А. Зайцева, А. А. Тютрин [и др.] // *iPolytech Journal*. – 2021. – Т. 25. – № 6. – С. 782-794.
3. Смирнова, И. В. Сравнительная характеристика методов переработки металлургических отходов / И. В. Смирнова // *Молодой учёный*. – 2021. – № 21 (363). – С. 52-54.
4. Порошковая металлургия: материалы, технология, свойства, области применения / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысльский [и др.]; под ред. И. М. Федорченко. – Киев: Наукова думка, 1985. – 624 с.
5. Либенсон, Г. А. Основы порошковой металлургии / Г. А. Либенсон. – М.: Металлургия, 1987. – 208 с.
6. German, R. M. *Sintering Theory and Practice* / R. M. German. – New York: Wiley, 1996. – 568 p.
7. German, R. M. *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles* / R. M. German. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. – 568 p.
8. Душман, С. Научные основы вакуумной техники / С. Душман; пер. с англ. – М.: Иностранная литература, 1952. – 648 с.
9. Cuevas, F. Ti–Cr–V–Fe alloys as hydrogen getters / F. Cuevas, M. Latroche // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 891. – Art. 162052. – DOI 10.1016/j.jallcom.2021.162052.

10. Бахматов, П. В. Исследование спекания прессованных заготовок из металлургического шлака в условиях автовакуума, формируемого геттерной средой / П. В. Бахматов, Е. А. Старцев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № V (85). – С. 79-84.
11. Лиманкин, В. В. Направления переработки техногенных отходов дальневосточных металлургических предприятий / В. В. Лиманкин, Е. А. Старцев, В. В. Бельский // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 119-122.
12. Бахматов, П. В. Влияние режимов дуговой сварки под слоем экспериментального флюса на распределение внутренних напряжений в сварных образцах, выявленных методом магнитной памяти металлов / П. В. Бахматов, Е. А. Старцев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 83-96.
13. Влияние титана на структурообразование и микротвёрдость высокоэнтпийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-V-M (M=Ti), синтезированного СВС-металлургией / И. О. Панышин, Э. Х. Ри, Е. Д. Ким, В. С. Попова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 74-79.
14. Получение лигатуры на основе шеелитового концентрата методом алюминотермии / В. В. Гостищев, Э. Х. Ри, Е. Д. Ким [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № III-1 (31). – С. 84-91.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICS

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.
G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

**ПОСТОЯННАЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА
ФОРМИРОВАНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО КОДА ВСЕЛЕННОЙ**

**FINE STRUCTURE CONSTANT AS A FUNDAMENTAL BASIS FOR FORMING
THE GENETIC CODE OF THE UNIVERSE**

Колыхалов Геннадий Антонович – начальник научно-исследовательского отдела Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Gennady A. Kolykhalov – Head of Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. В работе дан краткий анализ значимости постоянной тонкой структуры (ПТС) как фундаментальной постоянной в научных исследованиях в различных областях науки и техники. Определена временная космологическая цепочка бесконечной протяжённости, названная применительно к расширяющейся Вселенной её генетическим кодом. Показано, что ПТС являются звеньями космологической цепочки, а сама цепочка устанавливает однозначное соответствие между каждым размерным значением времени и его числовым аналогом в виде целого или дробного показателя ПТС. Отмечается, что численное значение ПТС при некоторых допущениях позволяет получить зависимость, определяющую продолжительность жизни Вселенной. Установлена взаимосвязь между процессами в ядре и процессами в оболочке расширяющейся Вселенной с ПТС.

Summary. The paper gives a brief analysis of the significance of the fine structure constant (FSC) as a fundamental constant in scientific research in various fields of science and technology. A temporary cosmological chain of infinite length has been determined, named in relation to the expanding Universe by its genetic code. It is shown that FSC are links of the cosmological chain, and the chain itself establishes an unambiguous correspondence between each dimensional value of time and its numerical analogue in the form of an integer or fractional indicator of PTS. It is noted that the numerical value of the FSC, under some assumptions, makes it possible to obtain a dependence that determines the life expectancy of the Universe. A relationship has been established between processes in the core and processes in the shell of the expanding Universe with FSC.

Ключевые слова: постоянная тонкой структуры, Вселенная, генетическая цепочка, код, время, монада, космологическое число, планковские числа, ядро, оболочка, взаимодействие.

Key words: Fine structure constant, Universe, genetic chain, code, time, monad, cosmological number, Planck numbers, kernel, shell, interaction.

УДК 539.184.25:524.852

В начале 21-го столетия многие физики, в том числе Стивен Хокинг, как отмечается в его книге «Краткая история времени», начали исследовать идею мультивселенной, а постоянная тонкой структуры (ПТС) α была одной из нескольких универсальных констант, которые натолкнули учёных на мысль о тонко настроенной Вселенной [1].

Исторически первой интерпретацией ПТС было отношение скоростей: скорости электрона на первой круговой орбите в боровской модели атома к скорости света. Эта величина была введена Арнольдом Зоммерфельдом в 1916 году для объяснения тонкой структуры уровней энергии атома водорода и равнялась $\alpha = 1/137$.

Однако, как отмечается в работе [2], в процессе научных исследований ПТС начала проявляться в различных областях физики, демонстрируя свою универсальность. Эта константа не только помогла улучшить понимание квантовой механики, но и стала важной частью в изучении более глубоких и фундаментальных аспектов физического мира.

Оказалось, что величина ПТС – это не просто численное значение, а фундаментальное открытие, раскрывающее глубокие связи в природе, подобно тому как другие фундаментальные константы помогают раскрывать секреты Вселенной. Таким образом, $\alpha = 1/137$ – это не случайность, а сам по себе закон природы. Число α давно интригует физиков и математиков своей «загадочностью».

Интересны высказывания известных учёных об этом магическом числе.

Так, Ричард Фейнман писал: «Все хорошие физики-теоретики выписывают это число на стене и мучаются из-за него. ... хотелось бы узнать, как появляется это число: выражается ли оно через π , или, может быть, через основание натуральных логарифмов? Никто не знает» [3].

Вольфганг Паули: «Когда я умру, первым делом рассчитаю спросить у дьявола, – каков смысл постоянной тонкой структуры?» [3].

Макс Борн: «...то обстоятельство, что α имеет значение $1/137$, а не какое-нибудь другое, конечно же, является не делом случая, а законом природы. Ясно, что объяснение числа α есть одна из центральных проблем естествознания» [2].

Поль Дирак: «... неизвестно, почему это выражение имеет именно такое, а не иное значение. Физики выдвигали по этому поводу различные идеи, однако общепринятого объяснения до сих пор нет» [1].

На сегодняшний день мало найдётся крупных учёных, которые не высказали бы по этому поводу своё мнение.

Фундаментальная значимость этого числа наглядно прослеживается в рамках таких физических процессов и свойств, приведённых в Википедии, как электромагнитное взаимодействие, атомная стабильность, квантовая электродинамика, соотношение скоростей, энергетические уровни. Эти примеры можно продолжить.

Важно также отметить довольно широкий спектр свойств Вселенной [3], на которые прямо влияет ПТС, таких как возможность возникновения жизни, эволюция космоса, химические связи, энергия и фотоны, скорость электрона и скорость света, константы связи.

Кроме того, ПТС также играет фундаментальную роль в физике элементарных (субатомных) частиц.

Наука продолжает искать более глубокие объяснения этому фундаментальному аспекту нашей Вселенной, феномену, который до сих пор, по мнению многих выдающихся учёных, остаётся одной из величайших загадок в современной физике [4]. Попытки объяснить значение α через другие фундаментальные константы и теории пока не дали однозначного результата.

Для изучения этого феномена рассмотрим решение проблемы с несколько иных позиций, что возможно, позволит приблизить нас к более глубокому пониманию сути этой проблемы.

Прежде чем приступить к рассмотрению поставленной задачи, введём определение для постоянной тонкой структуры α . На сегодняшний день нет однозначного мнения, зависит или нет ПТС от времени на космологических отрезках времени.

В апреле 2020 года группой учёных опубликованы результаты измерения постоянной тонкой структуры [1] в рекордно далёкий момент прошлого, соответствующий возрасту Вселенной всего 800 млн лет. Отличие от современного значения было оценено как $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = (-2,18-7,27) \cdot 10^{-5}$, что согласуется с предположением о нулевых вариациях постоянной со временем.

Этой же группой в ноябре 2022 года в результате прецизионных исследований опубликованы предельные значения вариации постоянной тонкой структуры. Авторы пришли к выводу, что с точностью $12 \cdot 10^{-9}$ постоянная α не меняется на расстоянии 50 парсек от Земли. Правда, существуют другие гипотезы [5–7], согласно которым α всё-таки может зависеть от времени, однако это пока не доказано.

На сегодняшний день результаты исследований учёных многих стран дают с высокой долей вероятности считать, что α есть постоянная величина.

Мы будем также полагать, что она была такой во все времена и будет такой всегда.

Так как процессы во Вселенной протекают во времени, есть основания полагать, что её величина может быть определена в рамках отношения временных отрезков.

Примем, что ПТС есть отношение двух любых отрезков времени, дающих значение α . Например:

$$\alpha = \frac{t_p}{t_1} = \frac{1}{137}, \quad (1)$$

где t_p – планковское время; t_1 – текущее время, определяемое формулой (1).

Можно α представить также и подобными предыдущему соотношениями:

$$\alpha = \frac{t_1}{t_2} = \frac{t_2}{t_3} = \frac{t_4}{t_5} = \frac{t_5}{t_6} = \dots = \frac{t_{n-1}}{t_n = t_{\max(n)}}, \quad (2)$$

где $t_{\max(n)} = T_n$ – максимальное время для заданного реперного числа n .

При этом реперные числа n имеют целочисленные значения в зависимости от длины цепочки.

Перемножим все отношения, определяющие α по формулам (1) и (2), и определим, какое целочисленное количественное значение n ПТС можно представить в диапазоне времени от t_p до T_n . Цепочка перемножений будет иметь вид

$$\frac{t_p}{t_1} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{t_2}{t_3} \cdot \frac{t_3}{t_4} \cdot \frac{t_4}{t_5} \cdot \frac{t_5}{t_6} \dots \frac{t_{k-1}}{t_k} \cdot \frac{t_k}{T_n} = \frac{t_p}{T_n} = \frac{1}{N_{p(n)}}, \quad (3)$$

$$\alpha \cdot \alpha \cdot \alpha \cdot \alpha \cdot \alpha \cdot \alpha \dots \alpha \cdot \alpha = \alpha^n,$$

где $N_{p(n)}$ – планковское космологическое число для заданного значения n .

Таким образом, формула (3) представляет собой в математическом плане временную космологическую цепочку произвольной протяжённости, определяемой значением n , в которой ПТС α являются её звеньями, соединёнными между собой. Эту цепочку назовём генетическим кодом Вселенной.

Из формулы (3) получаем соотношение

$$\alpha^n = \frac{1}{N_{p(n)}}.$$

В рамках упрощения дальнейших расчётов выразим ПТС α через обратное ей значение:

$$\zeta = \frac{1}{\alpha}.$$

В этом случае последнее соотношение принимает вид

$$\zeta^n = N_{p(n)}, \quad (4)$$

где $\zeta = 137,035\,999\,177\,(21) \approx 137,0$.

Представим формулу (4) с учётом зависимости (3) в форме

$$\zeta^n = N_{p(n)} = \frac{T_n}{t_p}, \quad (5)$$

где $t_p = 5,39 \cdot 10^{-44}$ с.

Для текущих значений времени t формула (5) принимает вид

$$\zeta^{nt} = \frac{t}{t_p}, \quad (6)$$

где n_t – текущее значение показателя, соответствующее времени t .

Необходимо иметь в виду, что все значения t ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$) в соотношении (3) одновременно являются максимальными значениями по знаменателю и минимальными по числителю при переходе от α^1 к α^2 и далее по порядку до α^n при целочисленных значениях n .

Показатель при ПТС n в своих целочисленных значениях формирует так называемые временные реперные точки, которые, в свою очередь, устанавливают временные границы этапов (монад) Вселенной при её расширении. Монада – греческое слово, означает единицу, единое, в нашем понимании отражает бесконечную Вселенную в соответствии с принципом единства микрокосмоса и макрокосмоса через взаимосвязь монад [8].

Поэтому показатель ПТС n можно назвать и показателем монады.

Так $n = 1$ определяет первую временную реперную точку t_1 в процессе расширения Вселенной по формуле $t_1 = \frac{t_p}{\alpha}$ и, соответственно, первую, начальную временную область расширения ($t_1 - t_p$), т. е. первую монаду.

Далее при $n = 2$, что соответствует α^2 , определяется вторая реперная точка t_2 и в итоге формируется расширившаяся область ($t_2 - t_p$). Процесс продолжается при достижении такого значения n и, соответственно, α^n , которое определяет и последнюю реперную точку, в которой $t = T_n$, и окончательную границу расширения Вселенной во времени.

Вид цепочки, звеньями которой являются ПТС α в соотношении (3), наталкивает нас на интересные образные ассоциации. Если сместить в знаменателе формулы (3) все значения времени t на одну позицию вправо, получим её в следующем виде:

$$\frac{t_p}{1} \cdot \frac{t_1}{t_1} \cdot \frac{t_2}{t_2} \cdot \frac{t_3}{t_3} \cdot \frac{t_4}{t_4} \cdot \frac{t_5}{t_5} \dots \frac{t_k}{t_k} \cdot \frac{1}{T_n} = \frac{t_p}{T_n} = \frac{1}{N_{p(n)}}$$

С одной стороны, явно видно, что все внутренние отношения сокращаются и получается формула (4). С другой стороны, если кончиком карандаша соединять линиями значки времени от t_p в числителе с t_1 в знаменателе, далее t_1 в знаменателе с t_1 в числителе, далее t_1 в числителе с t_2 в знаменателе и продолжать этот процесс до конца цепочки, то получим облик некоей зубообразной пилы, у которой у каждого зуба одна сторона наклонная, а другая перпендикулярная к оси времени. Этот образ пилы наталкивает на мысль о том, что осуществляется упорядоченный процесс расширения Вселенной по вполне определённом, заданному закону, при этом вся временная область расширения Вселенной от t_p до T_n разделяется вертикальными линиями на определённые временные этапы (монады), при этом количество этапов определяется строго целым числом n в формуле (4). Границы каждого этапа фиксируются так называемыми реперными точками, имеющими вполне конкретные числовые значения времени t ($t_1, t_2, t_3, \dots, T_n$) от начала расширения оболочки при t_p , а количество этапов n имеет целочисленное значение. Внутри любого этапа каждому конкретному текущему значению времени t однозначно соответствует вполне определённое дробное значение величины n , которое будем обозначать через n_t .

Если мысленно попытаться соединить эти же точки дугами полуокружностей в плоскостях, перпендикулярных к плоскости листа как с наружной, так и с противоположной стороны листа, то мы увидим своеобразную винтовую спираль, чем-то напоминающую по картинкам генетическую спираль ДНК человека.

В нашем случае цепочку по формуле (3) по аналогии с генетической спиралью ДНК человека можно определить как математическое представление генетической цепочки Вселенной, т. е. появляется возможность предположить, что формула (4) внутри себя содержит генетический код формирования и развития Вселенной в рамках её расширения.

Действительно, из работ [9] и [10] известно, что планковское космологическое число N_p определяется зависимостью

$$N_p = N_{p(n)} = \frac{T_n}{t_p} = \frac{R_n}{r_p(l_p)} = \frac{M_n}{m_p} = \dots$$



где R_n, M_n – соответственно гравитационный радиус горизонта Вселенной и максимальная масса при заданном значении n монады Вселенной; r_p, m_p – соответственно планковский радиус (размер) и масса.

Тогда формулу (4) можно записать в форме

$$\xi^n = \frac{T_n}{t_p} = \frac{R_n}{r_p(l_p)} = \frac{M_n}{m_p} = \dots$$

Из этого соотношения мы видим, что ПТС α , выраженная через ξ , является маркером, основополагающей, фундаментальной величиной, связывающей и синхронизирующей все физические процессы, протекающие во Вселенной на всех иерархических уровнях.

Она одинаковым образом определяется как через отношение отрезков времени, так и отношением подобных отрезков любой другой размерности, т. е. она является сущностью материи в её основе и её разнообразии.

Таким образом, можно сказать, что ПТС является фундаментально образующей постоянной, основой, формирующей генетический код, а показатель n в его целочисленном значении определяет длину этого кода, т. е. время жизни Вселенной.

Как следствие, ПТС должна присутствовать во всех процессах, протекающих во Вселенной, она определяет столбовую дорогу её развития.

Реперные точки являются маяками на этой дороге, чтобы не сбиться с пути. Изменение её числового значения в ту или иную сторону может привести к тому, что во Вселенной в процессе её расширения и развития будут возникать те или иные катаклизмы с вытекающими отсюда последствиями. Конечно, генетика Вселенной должна предусматривать защитные меры, которые не позволят совершиться такому событию.

Если принять, что формула (4) определяет генетический код развития Вселенной, то формула (3) показывает нам, что каждый последующий этап развития Вселенной формируется как произведение значений α всех предыдущих этапов. И самое главное, формула (4) указывает на то, что генетический код Вселенной оцифрован, т. е. каждому моменту времени t соответствует единственное числовое значение n , дробное или целое.

Дробные значения n определяют связь текущего времени t с текущим значением n_t внутри каждой области, а целочисленные значения n определяют связь реперных точек на границах каждой области (монады).

При этом, как отмечено выше, наличие генетического кода Вселенной предполагает, с одной стороны, существование необходимых исполнительных механизмов, программ (законов, закономерностей различной физической природы), которыми он управляет, с другой стороны, это указывает на то, что во Вселенной все процессы развития на всех иерархических уровнях носят упорядоченный характер, они взаимосвязаны, синхронизированы и гармонизированы.

Рассмотрим, какому значению n_t соответствует наше современное космологическое время $t_k = 4,382 \cdot 10^{17}$ с. Для этого прологарифмируем формулу (6), приняв $n_t = n_k$ и $t = t_k$, получим

$$\lg t_k = n_k \cdot \lg \xi + \lg t_p,$$

где n_k – показатель ПТС для современного космологического времени.

Отсюда

$$n_k = \frac{\lg t_k - \lg t_p}{\lg \xi}.$$

Подставим сюда значения величин ξ и t_p , получим

$$n_k = \frac{17,64 + 43,27}{2,137} = 28,51.$$

Для оценки того, где мы находимся в космологическом реестре времени, т. е. в какой временной области Вселенной, в какой по номеру монаде, воспользуемся зависимостью (5) и опреде-

лим величину T_n для значений показателя $n = 27, n = 28, n = 29$ соответственно. Результаты расчётов сведены в табл. 1. В последней строке представлены данные для текущего космологического времени.

Таблица 1

Максимальные значения параметров Вселенной в функции показателя постоянной тонкой структуры « n » в реперных точках

n	Время T_n , с	Радиус R_n , м	Масса M_n , кг
28	$3,64 \cdot 10^{16}$	$1,09 \cdot 10^{25}$	$1,45 \cdot 10^{52}$
29	$5,0 \cdot 10^{18}$	$1,5 \cdot 10^{27}$	$2,0 \cdot 10^{54}$
30	$6,85 \cdot 10^{20}$	$2,06 \cdot 10^{29}$	$2,74 \cdot 10^{56}$
28,5	$4,38 \cdot 10^{17}$	$1,31 \cdot 10^{26}$	$1,77 \cdot 10^{53}$

Из табл. 1 видно, что космологическое время, в котором мы живём, находится между реперными точками $n = 28$ и $n = 29$, т. е. мы живём в эпоху, соответствующую монаде за $n = 29$, по космологическим меркам мы живём в 29-й монаде. Эта эпоха началась в момент времени $t = 3,64 \cdot 10^{16}$ с, что соответствовало возрасту Вселенной, равному ≈ 1 млрд лет и закончится в момент времени $t = 5,0 \cdot 10^{18}$ с, что будет соответствовать возрасту Вселенной, равному ≈ 159 млрд лет. То есть мы находимся в начале этой эпохи. Длительность нашей эпохи (монады) будет порядка 158 млрд лет.

Много это или мало? По нашим меркам, это очень много, по космическим меркам об этом можно судить хотя бы в сопоставлении со временем жизни электрона, протона и самого атома.

Последние данные, приведённые в Википедии, следующие: экспериментальная нижняя граница среднего времени жизни электрона – $6,6 \cdot 10^{28}$ лет; нижнее ограничение на время жизни протона $2,9 \cdot 10^{29}$ лет независимо от канала распада; в основном энергетическом состоянии атом может находиться неограниченно долго, стабильно больше 10^{34} лет. Все данные можно представить в секундах, для чего каждое число необходимо умножить на количество секунд в году равное $t_r = 3,16 \cdot 10^7$ с.

По космическим меркам в сравнении со временем жизни электрона, протона и атома это практически ничто.

В работе [10] получено значение планковского космологического числа N_p из формулы

$$N_p = \left(\frac{M^2 \cdot G}{\hbar \cdot c} \right)^{0,5} = 0,9178 \cdot 10^{62},$$

где M – масса Вселенной; G – гравитационная постоянная; \hbar – приведённая постоянная Планка; c – скорость света.

В рамках представляемой статьи это соответствует значению монады $n = 29$. В нашем рассматриваемом случае формула (5) позволяет выразить планковское космологическое число через обратную величину ПТС ξ в виде

$$N_{p(29)} = \xi^{29}. \quad (7)$$

В пределах точности расчётов эта величина равна

$$N_{p(29)} \cong N_p.$$

Таким образом, более правильно значение N_p должно определяться из зависимости (7) через обратную величину ПТС.



Определим, какое значение имеет N_p на сегодняшний космический период, определяемый временем $t_k = 4,38 \cdot 10^{17}$ с и соответствующим ему значением $n_k = 28,51$. Расчёт проведём по формуле (7), которая для нашего случая примет вид

$$N_{p(28,5)} = z^{28,5}.$$

Проведённые расчёты дают значение

$$N_{p(28,5)} \approx 2,45 \cdot 10^{61}.$$

Как долго величина $t_k = 4,38 \cdot 10^{17}$ с может сохранять своё значение, по крайней мере, до второго знака после запятой, а соответственно, и $N_{p(28,5)}$?

Простейшие расчёты показывают, что даже через сто миллионов лет (10^8 лет), что соответствует $t = 3,16 \cdot 10^7 \cdot 10^8 = 3,16 \cdot 10^{15}$ с, получим

$$\begin{aligned} T &= 4,38 \cdot 10^{17} \cdot \left(1 \pm \frac{3,16 \cdot 10^{15}}{4,37 \cdot 10^{17}} \right) = 4,38 \cdot 10^{17} \cdot (1 \pm 0,723 \cdot 10^{-2}) = \\ &= 4,38 \cdot 10^{17} \cdot (1 \pm 0,00723), \end{aligned}$$

т. е. с погрешностью, не превышающей 1 %, и тогда можно будет написать, что время жизни Вселенной составляет

$$t_k = 4,38 \cdot 10^{17} \text{ с.}$$

То есть второй знак после запятой практически никак не изменится.

А значит, и планковское космологическое число, подсчитанное для нашего времени, практически не изменит своего значения в достаточно большом обозримом будущем. Наше время бежит быстро, а космическое практически стоит на месте.

Итак, мы можем предполагать, что процессы, протекающие в нашей расширяющейся Вселенной, развиваются по определённому генетическому коду, представленному зависимостями (5) и (6).

Возникает вопрос: откуда появился этот код в нашей Вселенной?

Попытаемся ответить на этот вопрос, воспользовавшись результатами исследований, представленными в работе [10].

В работе [10] была предложена энергетическая модель расширяющейся Вселенной, представляющая собой единство ядра (сингулярная точка), в котором в первоначальный момент времени была сосредоточена вся энергия праматерии и оболочки, т. е. расширяющейся части Вселенной, в которую с момента начала Большого взрыва из ядра начинают излучаться элементарные частицы материи, унося потенциальную (внутреннюю) энергию и трансформируя её в кинетическую энергию движения материальных частиц.

В работе также отмечается, что именно в ядре, в объёме планковской Вселенной на квантовом уровне формируется генетический код Вселенной, далее он тиражируется во внешнюю оболочку в форме планковских «клеток», т. е. в нашу расширяющуюся Вселенную.

Покажем это, для чего воспользуемся зависимостью, представленной в работе [10] и устанавливающей связь максимального и минимального времени с планковским:

$$t_{\min} \cdot t_{\max} = t_p^2,$$

где t_{\min} – квантовое время в ядре; $t_{\max} = T_n$ – максимальное время в оболочке.

Представим полученное соотношение в форме

$$\frac{T_n}{t_p} = \frac{t_p}{t_{\min}}.$$

Из соотношения следует, что если $\frac{t_n}{t_p} = \xi^n$, то и $\frac{t_p}{t_{\min}} = \xi^n$. Тогда формулы (5) и (6) для планковского периода примут вид

$$\xi^n = \frac{t_p}{t_{\min}} \quad \text{и} \quad \xi^{n_t} = \frac{t}{t_{\min}},$$

где $t_{\min} < t \leq t_p$.

Таким образом, мы приходим к выводу, что, действительно, генетический код Вселенной создаётся в ядре и в планковской Вселенной он «выращивает» планковские живые «клетки», т. е. создаёт «кирпичики», которые уходят во внешнюю оболочку, формируя облик нашей Вселенной по законам, представленным формулами (5) и (6).

Установим связь между угловой скоростью ω вращения ядра и ПТС.

Воспользуемся соотношением, представленным в работе [10], устанавливающим взаимосвязь между процессами в ядре и оболочке:

$$\omega = \frac{t_{\max}}{t_p^2} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right),$$

где ω – угловая скорость вращения ядра Вселенной, при этом

$$\omega = 2\pi \cdot \nu,$$

здесь ν – частота колебаний ядра, его ритм, его пульс.

Выразим представленное соотношение через величину $\xi = \frac{1}{\alpha}$, для чего учтём формулы (3), (5), (6):

$$\omega = \frac{t_{\max}}{t_p^2} \cdot \left[1 - \frac{\xi^{n_t} \cdot t_p}{t_{\max}}\right] = \frac{t_{\max}}{t_p^2} \cdot \left[1 - \frac{\xi^{n_t}}{N_{p(n)}}\right] = \frac{N_{p(n)}}{t_p} \cdot \left[1 - \frac{\xi^{n_t}}{N_{p(n)}}\right] = \frac{(N_{p(n)} - \xi^{n_t})}{t_p} = \frac{(\xi^n - \xi^{n_t})}{t_p}.$$

Соответственно,

$$\nu = \frac{(\xi^n - \xi^{n_t})}{2\pi \cdot t_p} = \frac{\xi^n}{2\pi \cdot t_p} \cdot \left[1 - \xi^{(n_t - n)}\right] = \frac{\xi^n}{2\pi \cdot t_p} \cdot \left[1 - \frac{1}{\xi^{(n - n_t)}}\right]. \quad (8)$$

Здесь n_t в рамках нашей космологической эпохи ($n = 29$) изменяется в пределах $1 \leq n_t \leq 29$. Предполагается, что при $n = 29$ процесс расширения Вселенной прекращается, хотя это не факт.

Если провести аналогию с человеком, то ядро Вселенной – это её сердце, а частота его колебаний – это его пульс, который запускает и определяет процессы в оболочке в нашей Вселенной. Каждый пульс – это как бы сигнал камертона, это приказ на выполнение тех или иных процессов в рамках генетического кода Вселенной. Это указатель того, что Вселенная – это живой организм.

Формула (8) записана для случая, когда генетический код заканчивается монадой за $n = 29$. Но какой реальной длины код Вселенной, никто, кроме Всевышнего, не знает. Сами же формулы (5) и (6) таких ограничений на длину кода не накладывают. Показатель ПТС n может изменяться до бесконечности.

Остаётся открытым вопрос: почему ПТС имеет именно такое числовое значение, а не иное? Здесь приходится прислушаться к мнению известного американского учёного, лауреата Нобелевской премии по физике Ричарда Фейнмана: «Это одна из величайших проклятых тайн физики: магическое число, которое дано нам и которого человек совсем не понимает. Можно было бы сказать, что это число написала «рука Бога», и мы не знаем, что двигало его карандашом».

Сделаем попытку с точки зрения наших представлений и изложенных выше фактов понять смысл числового значения ПТС $\alpha = \frac{1}{137}$. Эта попытка строится не на строгих физических или математических доказательствах, она носит в большей степени интуитивный, поисковый характер, на уровне понятийных представлений.

Выводы, которые будут получены, также будут носить не строгий характер. Но, возможно, это поможет в конечном итоге другим исследователям найти правильный ответ.



Итак, обратимся к числовому значению z , определённом через ПТС α по формуле $z = \frac{1}{\alpha}$ и равному $z \approx 137$. Это число носит сакральный характер, т. к. через него формируется генетический код Вселенной и течение самого процесса её расширения, жизни. Сделаем предположение, что числовое значение z влияет на длину самой генетической цепочки и, соответственно, на длительность жизни Вселенной, как это имеет место у человека.

Как известно, генетический код человека обладает большим объёмом информационного содержания, в рамках которого записан процесс развития человека от рождения до самой смерти, т. е. окончания жизни.

Мы показали, что Вселенная также обладает своим генетическим кодом, соответственно, он должен содержать необходимый объём конечной, но достаточной информации, в рамках которой по предписанным законам расширяется и развивается Вселенная.

В работах [9] и [10] введено понятие космологического числа $N = 0,8424 \cdot 10^{124}$, которое, с одной стороны, определяется как отношение максимального времени расширения (жизни) Вселенной к минимальному (квантовому) времени, а с другой, оно определяет количество информации в битах $N = 0,8424 \cdot 10^{124}$ бит за тот же промежуток времени. Так как мы рассматриваем процессы, протекающие в оболочке Вселенной, то мы будем пользоваться планковским космологическим числом N_p , которое определяется как $N_p = N^{0,5} = 0,9178 \cdot 10^{62}$ бит информации. Этот объём информации соответствует монаде с $n = 29$.

Однако если считать, что в рамках этой монады $n = 29$ жизнь Вселенной, её расширение не заканчивается, т. е. генетическая цепочка не обрывается, информационный объём продолжает расти, то тогда возникает вопрос: а когда это расширение может закончиться?

Если предположить, что участие z является неизбежным в определении времени жизни Вселенной, то тогда это можно сделать следующим образом: определить конечную величину объёма информации, определяющую длительность жизни Вселенной.

В рамках гипотезы мы можем положить показатель степени при N равным не 124, а $z = 137$, как первое ближайшее значение к значению 124, которое может быть выражено через сакральное z . Тогда объём информации будет равен $N \approx 10^z = 10^{137}$ бит, и этот объём информации будем считать предельным объёмом информации, заложенным в генетический код расширения Вселенной. В этом случае $N \approx 10^{137}$ бит соответствует $N_{p(n)} = z^n \approx 10^{68,5}$ бит в силу того, что $N_p = N^{0,5}$.

Определим значение n монады, при котором жизнь Вселенной в нашем понимании прекращается. Воспользуемся формулой (5):

$$z^n = N_{p(n)} = \frac{T_n}{t_p}$$

Подставим сюда значение для $N_{p(n)} \approx 10^{68,5}$, получим

$$n = 32,0587 \approx 32.$$

Таким образом, в рамках наших предположений время жизни Вселенной определится по формуле

$$T_{\max} = T_{32} = z^{32} \cdot t_p. \quad (9)$$

Расчёты по формуле (9) дают время жизни Вселенной, равное

$$T_{32} = z^{32} \cdot t_p = 2,37 \cdot 10^{68} \cdot 5,39 \cdot 10^{-44} = 1,277 \cdot 10^{25} \text{ с,}$$

или

$$T_{32} = \frac{1,277 \cdot 10^{25}}{3,16 \cdot 10^7} = 4 \cdot 10^{17} = 4 \cdot 10^5 \cdot 10^{12} \text{ лет.}$$

Это соответствует приблизительно четырёмстам тысячам триллионов лет.

Приближённые расчёты, проведённые при значении монады $n = 32$ для других предельных космологических параметров Вселенной, дают следующие значения: масса Вселенной $M_n = 5,17 \cdot 10^{60}$ кг, радиус Вселенной $R_n = 3,83 \cdot 10^{33}$ м, $t_{\min} = 2,27 \cdot 10^{-112}$ с, $m_{\min} = 0,92 \cdot 10^{-76}$ кг.

Все предыдущие формулы сохраняют свой вид, только вместо $n = 29$ необходимо ставить $n = 32$.

В заключение словами Ричарда Фейнмана можно сказать, что число $z = \frac{1}{\alpha} = 137$ написала «рука Бога». Это число, олицетворяющее как жизнь Вселенной в целом, так и нашу жизнь на нашей Земле.

Формула для времени жизни Вселенной T будет иметь вид

$$T = \frac{t_p}{\alpha^{32}}.$$

Выводы:

1. Проведён анализ значимости ПТС α как фундаментальной постоянной, отмеченной во многих научных исследованиях в разных областях науки и техники.
2. Математически определена временная космологическая цепочка бесконечной протяжённости, названная генетическим кодом Вселенной.
3. Отмечается, что ПТС являются звеньями космологической цепочки, а сама цепочка устанавливает однозначное соответствие между каждым размерным значением времени и его числовым аналогом в виде целого или дробного показателя ПТС, т. е. сама цепочка оцифрована.
4. Показано, что время расширения Вселенной может быть представлено в виде этапов (монад), жёстко связанных с ПТС α .
5. Отмечается, что временные границы монад определяются целочисленными значениями показателя n в ПТС α .
6. Установлена взаимосвязь между процессами в ядре и процессами в оболочке расширяющейся Вселенной с ПТС α .
7. Введено предположение о том, что через числовое значение ПТС $\alpha = \frac{1}{137}$ определяются длина генетической цепочки и, соответственно, продолжительность жизни Вселенной, проведён расчёт длительности жизни нашей Вселенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постоянная тонкой структуры // Википедия, свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Постоянная_тонкой_структуры (дата обращения: 27.03.2026). – Текст: электронный.
2. От 1/137 до бесконечности: изучение загадочной постоянной тонкой структуры // Дзен, 17.11.2023. – URL: <https://dzen.ru/a/ZVcJ5xBCTCGlVDou> (дата обращения: 27.03.2026). – Текст: электронный.
3. 1/137: постоянная тонкой структуры и попытки залезть в настройки Вселенной структуры // Хабр, 06.04.2025. – URL: <https://habr.com/ru/articles/897960/> (дата обращения: 27.03.2026). – Текст: электронный.
4. Ефимов, С. П. Формула для постоянной тонкой структуры / С. П. Ефимов // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 7. – С. 15-18.
5. V. Odom, D. Hanneke, B. D'Urso, G. Gabrielse. New Measurement of the Electron Magnetic Moment Using a One-Electron Quantum Cyclotron // Physical Review Letters, 97, 030801 (2006).
6. G. Gabrielse, D. Hanneke, T. Kinoshita, M. Nio, B. Odom. New Determination of the Fine Structure Constant from the Electron g Value and QED // Physical Review Letters, 97, 030802 (2006).
7. Toichiro Kinoshita, Makiko Nio. Improved alpha4 term of the electron anomalous magnetic moment // Phys. Rev. D 73, 013003 (2006).
8. Философский энциклопедический словарь / [подготовили А. Л. Грекулова и др.]; редкол.: С. С. Аверинцев и др. – 2-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 814 с.
9. Колыхалов, Г. А. Предельные космологические параметры Вселенной / Г. А. Колыхалов, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № V (85). – С. 85-96.
10. Колыхалов, Г. А. Энергетическая модель расширения Вселенной и её архитектура в представлениях планковских чисел / Г. А. Колыхалов, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № VII (87). – С. 104-111.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ SCIENTIFIC LIFE

Памяти коллеги, доктора технических наук, профессора, Заслуженного деятеля науки РФ
Верхотурова Анатолия Демьяновича.



12 апреля 2026 г. исполнилось 90 лет со дня рождения крупного отечественного учёно-материаловеда, профессора Верхотурова Анатолия Демьяновича.

Он организатор двух академических институтов на Дальнем Востоке: Института материаловедения в Хабаровске и Института машиноведения и металлургии в Комсомольске-на-Амуре, Заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, Лауреат Премии им. Соболевского, Лауреат Премии Совета министров СССР, академик Академии инженерных наук, член-корреспондент Академии электротехнических наук, академик Академии минерального сырья, академик Российской академии естественных наук, действительный член международного научного общества материаловедов «TMS» (США), член Президиума ДВО

РАН, педагог, патриот своей страны, создатель научной школы в области электроискрового легирования (ЭИЛ) на Дальнем Востоке. Основоположник нового этапа в развитии науки о материалах – материаловедении.

Коллектив университета и редакция журнала присоединяются к словам памяти профессора Верхотурова А. Д. в годовщину его дня рождения, которые всегда будут светлыми и согревать наши сердца.

Content

Научное издание

ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. A. Lobanov

PROBLEM STATEMENT FOR THE STUDY OF THE INFLUENCE
OF SUPPLY VOLTAGE DEVIATION ON THE SERVICE LIFE
OF AN INDUCTION MOTOR 4

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

D. M. Grabar

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL REPRESENTATION
OF A DISTRIBUTED OPERATOR BEHAVIOR CONTROL SYSTEM
FOR AUTOMATING ASSEMBLY PROCESSES 13

V. V. Kuvshinov, S. P. Murovsky, A. A. Shevchuk, E. V. Guseva

ADAPTIVE CONTROL OF SURFACE VESSEL SPEED
TO OPTIMIZE TRAJECTORY 21

S. M. Kopytov, P. A. Timokhin

AUTOMATION OF THE PROCESS OF OBTAINING VOLT-AMPERE
CHARACTERISTICS OF MEDIUM- AND HIGH-POWER
TRANSISTORS BASED ON A DIGITAL POWER SUPPLY 33

A. V. Frolov, D. V. Kukin

RESEARCH OF A T-TYPE THREE-WAY ROTARY VALVE WITH
AN ELECTRIC DRIVE FOR USE IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS 41

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

D. S. Magola

ADAPTIVE CONTROL OF ANOMALY DETECTION AGENTS
IN A BIO-INSPIRED SENSOR SYSTEM BASED
ON REINFORCEMENT LEARNING 49

S. I. Noskov, S. V. Belyaev, N. V. Antipina

REFINEMENT OF THE ALGORITHM FOR CONSTRUCTING
A LINEAR REGRESSION BASED ON THE APPLICATION
OF THE MIXED PARAMETER ESTIMATION METHOD 57

A. N. Novikov, I. V. Zaichenko, V. S. Sokolova, A. S. Sizintseva

MATHEMATICAL MODELING OF FORECASTING PROCESSES
OF LOCOMOTIVE UNIT RESIDUAL RESOURCE
IN AN INTEGRATED ERP ENVIRONMENT 64

D. O. Frolov

APPROACH TO ASSESSING THE STRESS STATE
OF THICK-WALLED PIPES UNDER PRESSURE BASED
ON DEFORMATION FIELDS 71

MACHINERY

K. D. Kosachev, P. A. Sablin, A. G. Serebrennikova

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PROCESSING
MODE PARAMETERS ON SURFACE QUALITY WHEN TURNING
BLANKS OF VT3 TITANIUM PARTS 77

R. M. Dzhemalyadinov, D. U. Abdulgazis, D. V. Moiseev, T. I. Bashkova

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE PRODUCTIVITY
OF TOOL STEELS COMBINED GRINDING 82

MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGY

E. A. Startsev, P. V. Bakhmatov

STRUCTURE AND PROPERTIES OF AN IRON-CONTAINING MATERIAL BASED
ON METALLURGICAL SLAG OBTAINED UNDER AUTOVACUUM CONDITIONS 89

MATHEMATICS AND MECHANICS

G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

FINE STRUCTURE CONSTANT AS A FUNDAMENTAL BASIS
FOR FORMING THE GENETIC CODE OF THE UNIVERSE 96

SCIENTIFIC LIFE

IN MEMORY OF ANATOLY DEMYANOVICH VERKHOTUROV 106

Учёные записки КНАГТУ
2026 № III (91)
Науки о природе
и технике

Выпускающий редактор
Е. П. Иванкова

Подписано в печать 26.06.2026
Дата выхода в свет 30.06.2026

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 12,55.
Уч.-изд. л. 12,03.
Тираж 200. Заказ 31469

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

