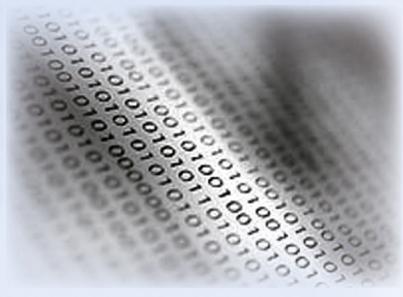
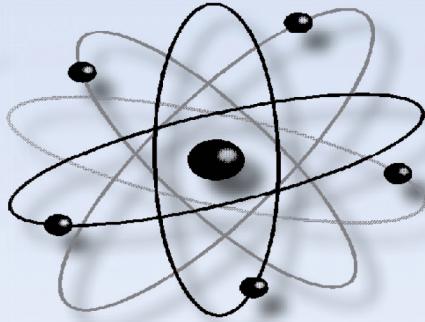


# Учёные записки

ISSN 2076-4359  
№ III (75)  
2024

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



---

Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.  
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Журнал основан в 2010 году

**Редакционная коллегия:**

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

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

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

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

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

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

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

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

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦҮЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

**ЭНЕРГЕТИКА**

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

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

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

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

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

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

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

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

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

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

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

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

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

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

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

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

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

**ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

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

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ**

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

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

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

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

**ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ**

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

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

**ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ**

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

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

**ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА**

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

**ИСТОРИЯ**

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

**ЭКОНОМИКА**

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

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

**Бобков А. В., Миташова Т. А.**  
**A. V. Bobkov, T. A. Mitashova**

**ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ САМОЛЁТНОГО ТИПА**

**EVALUATION OF DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF SMALL-SIZE UNMANNED  
AIRCRAFT OF AIRPLANE TYPE**

**Бобков Александр Викторович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bobkov@knastu.ru.

**Alexander V. Bobkov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bobkov@knastu.ru.

**Миташова Татьяна Александровна** – аспирант кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tanjamitashova@yandex.ru.

**Tatyana A. Mitashova** – Graduate Student, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: tanjamitashova@yandex.ru.

**Аннотация.** В статье анализируется потенциал роста аэродинамического качества малоразмерных беспилотных летательных аппаратов самолётного типа, обусловленного падением несущей способности крыла. В качестве перспективного направления совершенствования конструкции данных аппаратов рассматривается использование нетрадиционных аэродинамических схем. Предшествующий период развития авиации в большей степени был связан с использованием нормальной схемы: моноплан плюс фюзеляж с хвостовым горизонтальным и вертикальным оперением. Принцип балансировки летательного аппарата самолётного типа по такой схеме заключается в генерации горизонтальным оперением отрицательной подъёмной силы, что в условиях недостаточной несущей способности крыла можно рассматривать как нерациональные балансировочные потери энергии. Работа посвящена анализу нетрадиционных аэродинамических схем: «утка», «бесхвостка», tandem, X-образное крыло, в которых горизонтальное оперение создаёт положительную подъёмную силу или отсутствует.

**Summary.** The article analyzes the potential for increasing the reduced aerodynamic quality of small-sized aircraft-type unmanned aerial vehicles caused by a drop in the wing's load-bearing capacity. The use of non-traditional aerodynamic designs is considered as a promising direction for improving the design of these devices. The previous period of aviation development was largely associated with the use of a normal design: monoplane + fuselage with horizontal and vertical tail surfaces. The principle of balancing an aircraft type aircraft according to this scheme is the generation of a negative lift force by the horizontal tail, which, in conditions of insufficient load-bearing capacity of the wing, can be considered as irrational balancing energy losses. The study is devoted to the analysis of non-traditional aerodynamic designs: «canard», «tailless», tandem, X-shaped wing, in which the horizontal tail creates a positive lift force or is absent.

**Ключевые слова:** аэродинамическая схема, малоразмерный беспилотный летательный аппарат самолётного типа, число Рейнольдса.

**Key words:** aerodynamic design, small-sized aircraft-type unmanned aerial vehicle, Reynolds number.

*Работа выполнена при поддержке регионального гранта Хабаровского края, распоряжение Минобрнауки Хабаровского края № 1593 от 12 декабря 2023 г.*

УДК 629.7.016.82

Выявление перспективных направлений совершенствования конструкции летательного аппарата (ЛА) и оценка путей их реализации рассматриваются как важные задачи проектных решений. Это относится и к малоразмерным беспилотным летательным аппаратам самолётного

типа (МБЛА СТ) с взлётной массой до нескольких десятков кг. Интерес к ним обусловлен малыми размерами, позволяющими снизить затраты на выполнение полётного задания в сравнении с использованием полноразмерной авиации.

Из публикаций по данной тематике [1–7] можно отметить следующие основные аэродинамические и конструктивные особенности МБЛА СТ:

- падение несущей способности крыла;
- повышение геометрической жёсткости конструкции (снижение удлинения фюзеляжа и крыла до значений менее 10);
- обеспечение транспортабельности аппаратов за счёт складывания крыла и оперения в транспортное положение;
- частое отсутствие шасси (запуск с руки или пускового устройства, приземление на парашюте, в сетку и т. д.).

В условиях отрицательных аэродинамических последствий, сопровождающих уменьшение размеров аппаратов, ухудшаются лётно-технические характеристики МБЛА СТ. Например, снижается удельный вес массы целевой нагрузки, уменьшается дальность и время полёта.

Сочетание 2 факторов (малоразмерности конструкции и малых скоростей полёта) в совокупности приводит к существенному снижению числа Рейнольдса  $Re$ , характеризующего режим обтекания несущей поверхности. Значения  $Re = V \cdot b_a / \nu$  для МБЛА СТ оказываются в области  $Re < 4 \cdot 10^6$ , где  $V$  – скорость обтекания несущей поверхности, м/с;  $b_a$  – средняя аэродинамическая хорда крыла, м;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости рабочего тела,  $\text{м}^2/\text{с}$ . Ухудшение несущей способности крыла, оцениваемой коэффициентом подъёмной силы  $C_y$ , объясняется отрывом ламинарного пограничного слоя от поверхности крыла, называемым «ламинарный отрывной пузырь», и формированием ламинарно-турбулентного перехода [8].

Степень падения коэффициента  $C_y$ , по данным работы [9], иллюстрируют графики (см. рис. 1 и 2). В зоне  $10^6 < Re < 5 \cdot 10^6$  максимальный уровень  $C_{y\max}$  снижается до 60 %, что позволяет говорить о проблемах генерации подъёмной силы и необходимости её более рационального использования при формировании силового поля, обеспечивающего продольную балансировку МБЛА СТ.

Повлиять на силовое поле можно следующими способами:

1. повышением коэффициента подъёмной силы  $C_y$  путём организации безотрывного обтекания крыла;

2. использованием аэродинамических схем (АС), в которых к минимуму сведены или отсутствуют балансировочные потери энергии, генерируемые горизонтальным оперением [10, 11].

Первый способ – улучшение несущей способности крыла – требует проведения аэродинамических исследований по управлению пограничным слоем, совершенствованию профиля обтекаемой поверхности, решению проблем создания «ламинарного» крыла и его морфингу.

Рассмотрим возможности рационализации аэродинамической схемы, часто именуемой балансировочной схемой, как основного проектного фактора, влияющего на баланс сил в ЛА самолётного типа. От схемы зависят балансировочное аэродинамическое качество, возможность рациональной компоновки бортового оборудования и целевой нагрузки. Она должна обеспечивать необходимый запас продольной, путевой и поперечной статической устойчивости в совокупности с хорошими характеристиками управляемости [12–16].

Известны основные аэродинамические схемы ЛА самолётного типа: нормальная, «утка» и «бесхвостка», а также частные вариации и сочетания указанных схем, такие как биплан, летающее крыло, тандем, кольцеплан, кресто- и Н-образное крыло [17].

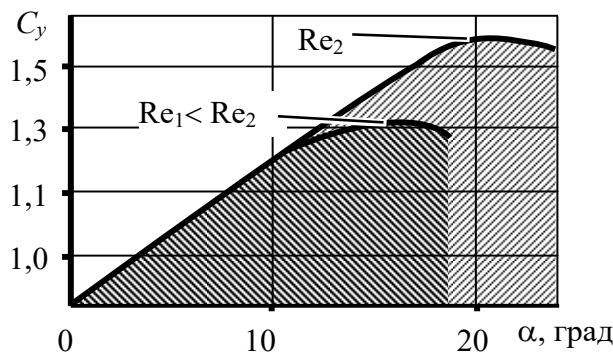


Рис. 1. Характер зависимости  $C_y$  от угла атаки  $\alpha$  при изменении числа Рейнольдса

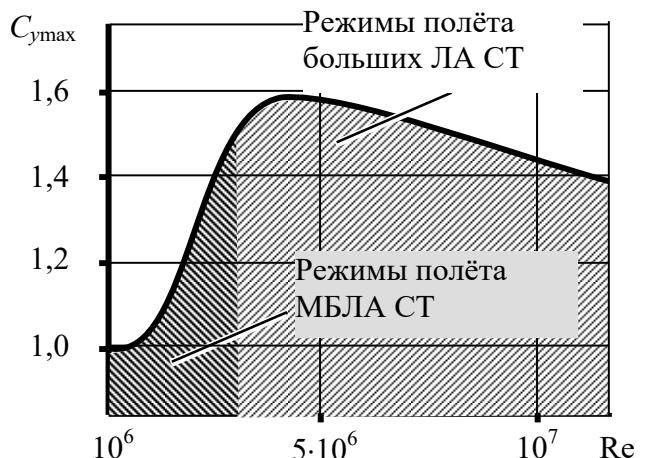


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $C_{y\max}$  от числа Рейнольдса

В практике проектирования конструкций полноразмерной авиации выбор АС принять выполнять по упрощённой методике, с использованием статистических и аналитических зависимостей, которые близки к оптимальным [18–23]. При проектировании МБЛА СТ такой подход оказывается малоприменимым из-за отсутствия достоверных статистических данных [1–3; 24].

Предшествующий период развития авиации в большей степени был связан с использованием нормальной АС: моноплан + фюзеляж с хвостовым горизонтальным и вертикальным оперением. В ней продольную статическую устойчивость ЛА обеспечивает горизонтальное оперение (ГО), эффективность действия которого пропорциональна создаваемому статическому моменту  $M_{го}$ , равному  $M_{го} = \bar{S}_{го} \cdot \bar{L}_{го}$ , где  $\bar{S}_{го} = S_{го}/S_{kp}$  – относительная площадь горизонтального оперения, здесь  $S_{го}$ ,  $S_{kp}$  – площадь горизонтального оперения и крыла соответственно;  $\bar{L}_{го} = L_{го}/L_{kp}$  – относительное плечо горизонтального оперения, здесь  $L_{го}$ ,  $L_{kp}$  – плечо горизонтального оперения и крыла соответственно.

Недостаток нормальной АС заключается в балансировочных потерях энергии, затрачиваемой на приведение к нулю суммы моментов сил, действующих на аппарат относительно поперечной оси. Балансировочные потери включают в себя 3 энергетических составляющих, снижающих аэродинамическое качество:

1. энергию, затрачиваемую горизонтальным оперением на генерацию отрицательной подъёмной силы;
2. энергию на генерацию дополнительной подъёмной силы крылом, компенсирующей отрицательную подъёмную силу оперения;
3. энергию, затрачиваемую на аэродинамические потери при обтекании горизонтального оперения.

При проектировании малоразмерных аппаратов классическое горизонтальное оперение, его размеры, расположение, да и само включение в конструкцию аппарата требуют дополнительного анализа вариантов АС, учитывающих специфику отрицательных последствий миниатюризации аппарата и необходимость снижения уровня балансировочных потерь.

Потенциал снижения данных потерь можно реализовать с помощью альтернативных АС, обеспечивающих достижение следующих целей:

- в рамках нормальной АС уменьшить затраты энергии на создание отрицательной подъёмной силы путём уменьшения площади ГО и увеличения плеча  $L_{го}$ ;
- изменить направление подъёмной силы, создаваемой горизонтальным оперением, с отрицательного на положительное;
- исключить горизонтальное оперение из аэродинамической схемы с передачей его функций отклоняемым аэродинамическим поверхностям крыла.

Классификация аэродинамических схем по признаку «наличие/отсутствие ГО» проиллюстрирована на рис. 3. Большинство схем относится к монопланам, т. к. такая схема обеспечивает достижение больших скоростей полёта.

Рассмотрим особенности нормальной и альтернативных ей аэродинамических схем.

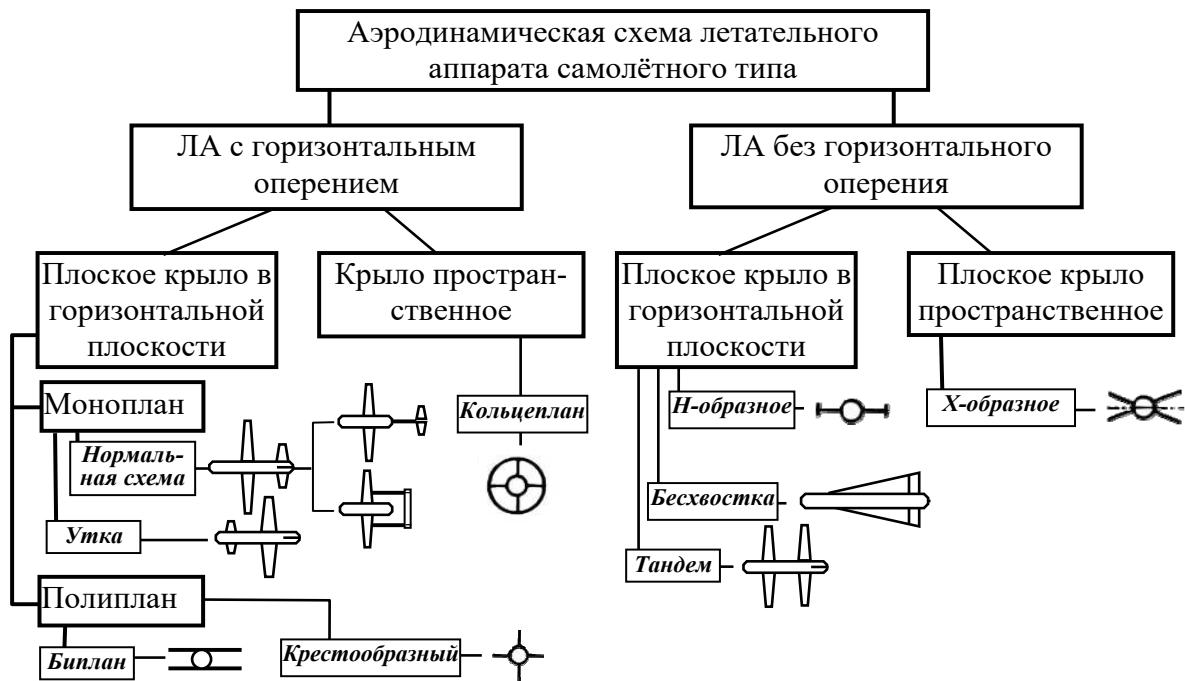


Рис. 3. Классификация аэродинамических схем

**Нормальная схема.** Уменьшение площади горизонтального оперения  $S_{го}$  и, соответственно, величины отрицательной подъёмной силы с условием сохранения неизменным продольного момента  $M_{го}$  обеспечивается увеличением плеча  $L_{го}$ . ГО закрепляется на одной или двух балках, выдвигаемых из хвостовой части фюзеляжа или крыла (см. рис. 3, моноплан – нормальная схема – балочные варианты). Кроме того, балочное крепление ГО позволяет уменьшить осевые габариты и массу фюзеляжа, перестающего выполнять функцию несущего элемента конструкции.

**Схема «утка».** В этой схеме ГО располагается впереди крыла и центра тяжести самолёта. Горизонтальное оперение начинает выполнять функцию несущей поверхности, генерирующей дополнительную положительную подъёмную силу и, соответственно, уменьшающей балансировочные потери. Для обеспечения приемлемого диапазона центровок передняя несущая поверхность должна иметь максимальный коэффициент подъёмной силы, больший по величине, чем у крыла. При сохранении неизменной подъёмной силы площадь крыла уменьшается.

**Схема «бесхвостка».** В данной схеме ГО отсутствует. В качестве рулевых поверхностей используются элевоны или флапероны.

Главный недостаток «бесхвостки» заключается в малом плече органов продольного управления, расположенных на крыле. Вследствие этого для продольного управления необходимо прикладывать вертикальную силу в 1,5-2 раза большую, чем при нормальной схеме.

**Схема «тандем».** «Тандем» представляет собой сочетание двух крыльев, расположенных последовательно друг за другом. Общая несущая площадь разбивается на два приблизительно равных крыла, линейные размеры которых меньше аналогичного крыла самолёта нормальной схемы.

По способу балансировки тандем рассматривается как частный случай «утки». По расположению органов продольного управления схема аналогична либо «утке» (отклоняемые



аэродинамические поверхности на переднем крыле), либо нормальной схеме (отклоняемые аэродинамические поверхности на заднем крыле).

Данная аэродинамическая схема обеспечивает снижение аэродинамического сопротивления по сравнению с нормальной схемой.

**Двойные X-образные несущие поверхности.** Благодаря X-ориентации консоли поверхностей создают аэродинамическую силу, генерирующую вертикальную и горизонтальную составляющие. Такая АС традиционно используется при проектировании крылатых ракет, что позволило охарактеризовать БЛА подобной схемы как «ракетизированный» аппарат. Появление горизонтальной составляющей приводит к частичному снижению подъёмной силы несущих поверхностей; 2-кратное увеличение числа консолей компенсирует это снижение, одновременно повышая манёвренность и устойчивость аппарата в полёте.

Рулевые поверхности в данной аэродинамической схеме могут иметь 2 варианта исполнения:

1. Оба крыла неподвижны. На всех или только на консолях заднего крыла закреплены рулевые поверхности.

2. Переднее крыло неподвижно. Заднее крыло цельноповоротное с симметричным профилем, выполняющим функции несущей и рулевой поверхности. Синхронное или асинхронное отклонение рулевых поверхностей позволяет компенсировать горизонтальную или вертикальную составляющие аэродинамической силы, обеспечивая момент управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булат, П. В. О современном подходе к проектированию беспилотных летательных аппаратов самолётного типа с коротким взлётом и посадкой / П. В. Булат, О. П. Минин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Том 17. – № 6. – С. 961-996.
2. Лукьянов, О. Е. Методологическое обеспечение подготовки проектантов и операторов беспилотных летательных аппаратов / О. Е. Лукьянов, Д. В. Золотов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Т. 20. – № 1. – С. 14-28.
3. Крянев, А. В. Методический подход к определению показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов / А. В. Крянев, С. С. Семенов, А. Э. Калдаева // Надёжность. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 50-60.
4. Биш, В. Н. Методика приближённого расчёта аэродинамических и лётных характеристик малоразмерного беспилотного летательного аппарата. Расчёт взлётной массы, положения центра масс, фокуса и оценка запаса продольной статической устойчивости по перегрузке / В. Н. Биш, Р. Я. Синдаров, В. И. Сяхович // Инженер-механик. – 2012. – № 4. – С. 27-32.
5. Беспилотные летательные аппараты: методики приближённых расчётов основных параметров и характеристик / В. М. Ильюшко, М. М. Митрахович, А. В. Самков и др.; под общ. ред. В. И. Силкова. – Киев: Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники Вооружённых Сил Украины, 2009. – 302 с.
6. Мастько, О. М. Методика формування обсмної компоновки БПЛА контейнерного старту класу «міні»/ О. М. Мастько // Механіка гіроскопічних систем. – 2016. – № 32. – С. 75-83.
7. Брусов, В. С. Аэродинамика и динамика полёта малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / В. С. Брусов, В. П. Петручик, Н. И. Морозов. – М.: МАИ-Принт, 2010. – 338 с.
8. Пархаев, Е. С. Разработка методики аэродинамической оптимизации крыльев беспилотных летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.01 / Пархаев Егор Сергеевич. – М., 2020. – 158 с.
9. Павловский, К. М. Практическая аэродинамика и динамика полёта летательных аппаратов: учеб. пособие / К. М. Павловский. – М.: ВПА, 1969. – 308 с.
10. Рохин, В. В. Условные максимумы балансировочного аэродинамического качества неманевренного самолёта / В. В. Рохин, В. К. Святодух, В. Б. Слуцкий // Учёные записки ЦАГИ. – 1987. – Том XVIII. – № 3. – С. 79-90.
11. Баринов, В. А. Определение балансировочного аэродинамического сопротивления самолёта / В. А. Баринов, А. Г. Обрубов // Учёные записки ЦАГИ. – 1981. – Том XII. – № 1. – С. 78-84.
12. Вислов, И. П. Эскизное проектирование лёгких самолётов: учеб. пособие / И. П. Вислов. – Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2006. – 82 с.
13. Бадягин, А. А. Проектирование самолётов / А. А. Бадягин. – М.: Машиностроение, 1972. – 516 с.

**Бобков А. В., Миташова Т. А.**

ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ САМОЛЁТНОГО ТИПА

14. Кюхеман, Д. Аэродинамическое проектирование самолётов / Д. Кюхеман. – М.: Машиностроение, 1983. – 656 с.
15. Полищук, М. А. Динамика и управление беспилотного планирующего крылатого летательного аппарата крестообразной схемы / М. А. Полищук, М. В. Полищук // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2018. – № 3. – С. 55-60.
16. Торенбик, Э. Проектирование дозвуковых самолётов / Э. Торенбик. – М.: Машиностроение, 1983. – 648 с.
17. Лебедев, А. А. Динамика полёта беспилотных летательных аппаратов / А. А. Лебедев, Л. С. Чернобровкин. – М.: Машиностроение, 1973. – 616 с.
18. Егер, С. М. Проектирование самолётов / С. М. Егер, В. Ф. Мишин, Н. К. Лисейцев. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.
19. Житомирский, Г. И. Конструкция самолётов: учебник для студентов авиационных специальностей вузов / Г. И. Житомирский. – М.: Машиностроение, 1991. – 400 с.
20. Концептуальное проектирование самолёта: учеб. пособие / В. А. Комаров и др. – Самара: Изд-во СГАУ, 2013. – 120 с.
21. Бураго, С. Г. Выбор аэродинамической компоновки дозвуковых и сверхзвуковых летательных аппаратов: учеб. пособие / С. Г. Бураго. – М.: Изд-во МАИ, 1989. – 72 с.
22. Вислов, И. П. Проектирование самолёта и агрегатов: учеб. пособие / И. П. Вислов. – Самара: СГАУ, 1996. – 76 с.
23. Припадчев, А. Д. Концептуальные основы проектирования облика летательного аппарата / А. Д. Припадчев, Л. В. Межуева, Н. З. Султанов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6. – С. 561-564.
24. Вертебный, В. В. Методика выбора рациональной аэродинамической компоновки и основных характеристик беспилотного летательного аппарата одноразового применения / В. В. Вертебный // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2020. – № 4. – С. 161-174.

# ЭНЕРГЕТИКА

# ENERGETICS

**Знаенок В. Н., Мельниченко О. В., Портной А. Ю.**  
**V. N. Znaenok, O. V. Melnichenko, A. Yu. Portnoy**

## **РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА К ПЛЕЧУ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ**

## **DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CURRENT SUPPLY TO THE ARM RECTIFIER-INVERTER CONVERTER OF ELECTRIC LOCOMOTIVE BASED ON IGBT-TRANSISTORS**

**Знаенок Вячеслав Николаевич** – аспирант кафедры «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15. E-mail: znaenock@yandex.ru.

**Vyacheslav N. Znaenok** – Postgraduate Student, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State University of Transport (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15. E-mail: znaenock@yandex.ru.

**Мельниченко Олег Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15. E-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Oleg V. Melnichenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electric Rolling Stock Department, Irkutsk State University of Transport (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15. E-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Портной Александр Юрьевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15. E-mail: portnoy\_alexander@mail.ru.

**Alexander Yu. Portnoy** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Physics, Mechanics and Instrumentation Department, Irkutsk State University of Transport (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15. E-mail: portnoy\_alexander@mail.ru.

**Аннотация.** В условиях постоянного увеличивающегося грузооборота и соответствующего роста нагрузки на железнодорожные инфраструктуру и подвижной состав актуальной является разработка энергоэффективного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) для электровозов переменного тока на базе IGBT-транзисторов. В сравнении с тиристорным ВИП он позволяет более рационально использовать электроэнергию из контактной сети и увеличить пропускную способность тяговых участков. В статье рассматривается вопрос построения плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с параллельным соединением ветвей. Выполнено аналитическое исследование распределения токов по параллельным ветвям с учётом индуктивности силовых шин. На основе полученных уравнений разработан способ подвода тока к плечу ВИП с 4 параллельными ветвями. В условиях лаборатории выполнено физическое моделирование протекания тока по параллельным ветвям для моделей плеча ВИП с односторонним и с предложенным способом подвода тока к плечу. Полученные диаграммы позволяют наглядно оценить влияние шинного монтажа при построении плеча преобразователя на распределение токов по параллельным ветвям.

**Summary.** In conditions of constantly increasing freight turnover and a corresponding increase in the load on railway infrastructure and rolling stock, the development of an energy-efficient rectifier-inverter converter for AC electric locomotives based on IGBT is relevant. In comparison with a thyristor rectifier-inverter converter, it allows for more efficient use of electricity from the contact network and increases the throughput of traction sections. The article discusses the issue of constructing the arm of an IGBT-based rectifier-inverter converter with parallel connection of branches. An analytical study of the distribution of currents along parallel branches was carried out, taking into account the inductance of power buses. Based on the obtained equations, the design of the arm of a rectifier-inverter converter with 4 parallel branches has been developed. In laboratory conditions, physical modeling of current flow through parallel branches was performed for models of the arm of a rectifier-inverter converter with a one-way current supply and with the proposed arm design. The resulting diagrams make it possible to clearly eval-

**Знаенок В. Н., Мельниченко О. В., Портной А. Ю.**

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА К ПЛЕЧУ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ

uate the influence of busbar installation when constructing a converter arm on the distribution of currents along parallel branches.

**Ключевые слова:** электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзистор, параллельное соединение, индуктивность, распределение токов.

**Key words:** AC electric locomotive, rectifier-inverter converter, IGBT, parallel connection, inductance, current distribution.

УДК 629.423.1

**Введение.** В настоящее время электровозы переменного тока задействованы в непрерывном увеличении грузооборота. По железнодорожным магистралям Восточного полигона в 2021 году его величина составляла 144 млн т [1], уже в 2022 году он находился на отметке 158 млн т [2], и, согласно долгосрочной программе развития ОАО «РЖД», уже в 2025 году грузооборот должен достигнуть показателя 180 млн т [3]. Для повышения провозных способностей выполняются различные мероприятия, например: наращивают тяжеловесное движение, повышая массу поездов до 6300 и 7100 т [4]; увеличивают пропускные способности, организовывая движение соединённых поездов, соединяя автосцепки поездов физически либо по технологии «Виртуальная сцепка» [5]. Однако наряду с комплексом проводимых мероприятий для увеличения грузооборота остаётся актуальной проблема Восточного полигона – ограниченная пропускная способность железнодорожной инфраструктуры [6].

Рост объёмов перевозок приводит к повышению нагрузки на подвижной состав, систему электроснабжения и тяговые подстанции, мощность которых ограничена и лимитирует количество пар поездов на участке. При этом контактный провод значительно загружен реактивной мощностью – не затрачиваемой на тягу поездов энергией, которую генерирует в контактную сеть электроподвижной состав. Другими словами, можно сказать, что низкая энергоэффективность современных отечественных электровозов переменного тока – это фактор, ограничивающий сегодня пропускную способность тяговых участков. Такое положение дел не позволяет полноценно использовать разработанные новые технологии вождения поездов.

Низкие энергетические показатели электровозов напрямую связаны с устаревшей силовой тиристорной базой выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), что подтверждается рядом исследований [7–8]. Повышение энергетических показателей возможно путём замены на полностью управляемые силовые полупроводники. Такое решение разработано учёными Иркутского государственного университета путей сообщения – предложен ВИП на базе современных полупроводников – IGBT-транзисторов. Коэффициент мощности в режимах тяги и рекуперации предлагаемого преобразователя значительно превосходит тиристорный преобразователь (см. рис. 1), алгоритмы работы преобразователя позволяют втрое снизить потери напряжения и значительно уменьшить нагрузку реактивным током на контактную сеть, что в перспективе даст возможность пропуска дополнительных пар поездов на тяговых участках и сократить межпоездной интервал [9].

В настоящее время разработчики ведут дальнейшие исследования в повышении эффективности работы ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов. Это усовершенствование заключается в построении силовых плеч, содержащих несколько параллельно включённых ветвей, управляемых от одного драйвера.

Цели работы: исследование процессов распределения токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов, а также разработка технического решения, обеспечивающего оптимальное распределение токов в плече.

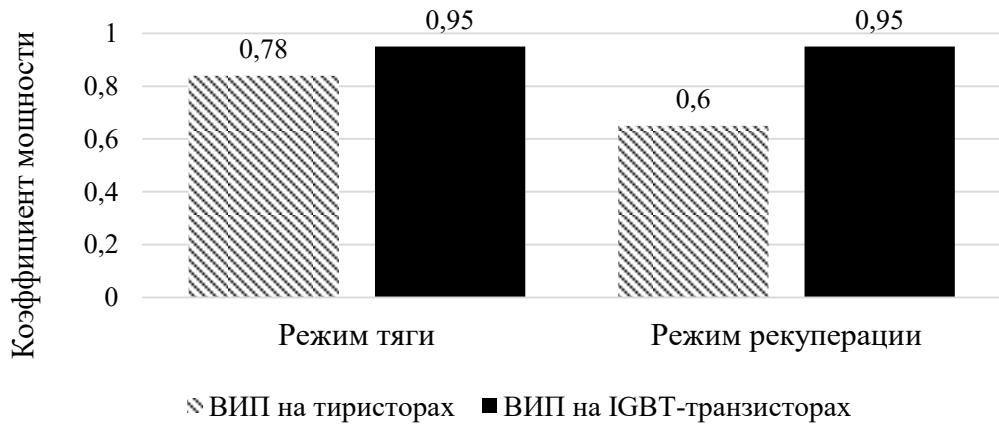


Рис. 1. Сравнение коэффициентов мощности электровозов с ВИП на базе тиристоров и IGBT-транзисторов

Силовой блок ВИП на базе IGBT-транзисторов состоит из девяти плеч для осуществления плавного зонно-фазового регулирования напряжения на тяговых электродвигателях (ТЭД). Исходя из максимально возможных в эксплуатации токов ТЭД, в плечах ВИП применяют параллельное соединение ветвей силовых полупроводниковых приборов (СПП), их количество определяется формулой

$$m = \frac{I}{I_n k_I};$$

где  $I$  – ток плеча преобразователя;  $I_n$  – предельный ток IGBT-транзистора;  $k_I$  – коэффициент использования IGBT-транзисторов по току.

В условиях воздушного охлаждения, значительных размеров радиаторов и ограниченных габаритов внутри электровоза неизбежно возникает асимметрия соединений силовых шин, имеется в виду различие геометрических форм параллельных ветвей и неодинаковое расположение их в пространстве, приводящее к отличию электромагнитных параметров параллельных ветвей: их индуктивностей и взаимоиндуктивностей. Последствие разброса параметров – это неравномерное распределение токов по параллельным ветвям, которое приводит к аварийным процессам в силовой цепи и выходу из строя IGBT-транзисторов.

Рассмотрим упрощённую схему плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с  $n$  последовательно и  $m$  параллельно соединёнными IGBT-транзисторами (см. рис. 2). Общепринято при анализе процессов в электрических схемах с СПП использовать кусочно-линейную аппроксимацию прямой ветви вольтамперной характеристики, которая приведена на рис. 3 [10]. Аппроксимация такого вида позволяет вместо сложной функциональной зависимости при определении среднего значения падения напряжения на СПП использовать следующее достаточно простое выражение:

$$U = \frac{\pi + \gamma}{2\pi} u_0 + I_B R_d - \Delta U,$$

где  $\gamma$  – угол коммутации;  $u_0$  – пороговое падение напряжения;  $R_d$  – динамическое сопротивление;  $\Delta U$  – поправка;  $I_B$  – средний ток ветви,

$$I_B = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi+\gamma} i_B d\omega t,$$

здесь  $i_B$  – мгновенное значение тока в ветви плеча ВИП.

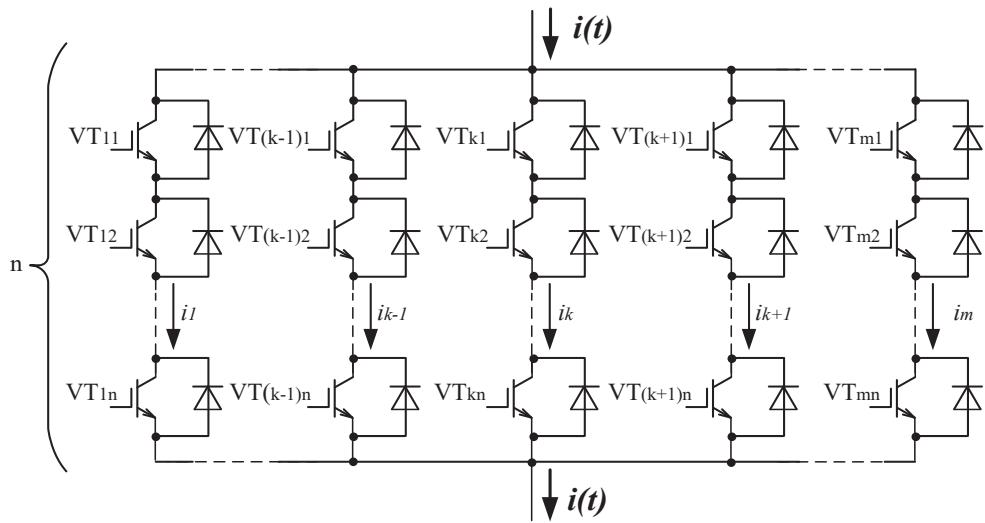


Рис. 2. Расчёчная схема плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов

При  $\gamma = 0$  и однополупериодном выпрямленном синусоидальном токе, среднее значение которого равно номинальному, среднее значение падения напряжения на IGBT-транзисторе может быть представлено в виде

$$U = 0,5u_0 + I_B R_d - \Delta U.$$

Рис. 3. Истинная и спрямлённая вольтамперные характеристики IGBT-транзистора  
(при напряжении управления на затворе  $V_{GE} = 15$  В)

На электровозах переменного тока поправка, допускаемая при измерении прямого падения напряжения, не превышает 1...2 % от  $U$ , по этой причине при расчётах поправка не учитывается. С учётом кусочно-линейной аппроксимации процесс деления тока по  $m$  параллельным ветвям плеча (см. рис. 2) преобразовательной установки, имеющей  $n$  последовательно включённых СПП, описывается с помощью системы из  $(m+1)$  линейных уравнений с  $(m+1)$  неизвестными:



$$\left. \begin{array}{l} u_{01}^* + i_1 R_{d1}^* = u \\ u_{02}^* + i_2 R_{d2}^* = u \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ u_{0m}^* + i_m R_{dm}^* = u \\ i_1 + \dots + i_m = i(t) \end{array} \right\}$$

В такой системе неизвестными являются мгновенные значения токов в параллельных ветвях  $i_1 \dots i_m$  и падение напряжения  $u$  на плече преобразователя, а коэффициентами – нагрузка плеча  $i(t)$  и величины  $u_{0j}^*$  и  $R_{dj}^*$ , где  $j = 1, \dots, m$ , при этом

$$\left. \begin{array}{l} u_{0j}^* = \sum_{i=1}^n u_{0j}^i \\ R_{dj}^* = \sum_{i=1}^n R_{dj}^i \end{array} \right\}$$

где  $u_{0j}^*$  – сумма пороговых падений напряжений IGBT-транзисторов;  $R_{dj}^*$  – сумма динамических сопротивлений IGBT-транзисторов.

Для решения системы уравнений целесообразно воспользоваться её матричной записью:

$$\left| \begin{array}{ccccc} R_{d1}^* & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & R_{d2}^* & \dots & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_{dm}^* & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{c} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_m \\ u \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} -u_{01}^* \\ -u_{02}^* \\ \vdots \\ -u_{0m}^* \\ i(t) \end{array} \right|$$

Обозначим матрицу коэффициентов, стоящую перед столбцом неизвестных, буквой А. Симметричное относительно главной диагонали расположение коэффициентов матрицы А позволяет определить обратную к ней матрицу  $A^{-1}$  с помощью метода «разбиения на клетки». Тогда решение системы может быть получено в явном виде:

$$\left| \begin{array}{c} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_m \\ u \end{array} \right| = A^{-1} \left| \begin{array}{c} -u_{01}^* \\ -u_{02}^* \\ \vdots \\ -u_{0m}^* \\ i(t) \end{array} \right|$$

После перемножения матриц можно выписать явные выражения для токов параллельных ветвей плача ВИП:

$$i_l = \frac{\left[ \sum_{j=1}^m \frac{-u_{0j}^* - u_{0l}^*}{R_{dj}^*} + i(t) \right]}{\left( R_{dj}^* \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{dj}^*} \right)},$$

где  $l = 1, \dots, m$ .

Средние токи параллельных ветвей могут быть получены интегрированием выражения на интервале изменения тока в плече  $(\pi + \gamma)$  и усреднением по периоду изменения нагрузки плача  $2\pi$ :

$$I_l = \frac{\left[ (\pi + \gamma) \sum_{j=1}^m \frac{u_{0j}^* - u_{0l}^*}{R_{dj}^*} + 2\pi I_B \right]}{\left( 2\pi R_{dj}^* \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{dj}^*} \right)}$$

где  $l = 1, \dots, m$ .

Значения средних токов параллельных ветвей плеча определяются вольтамперными характеристиками СПП, схемой преобразователя и параметрами силовой цепи.

При анализе распределения токов по параллельным ветвям плеча ВИП необходимо учитывать падение напряжения на участках силовых шин между точками подключения параллельных цепей, возникающих по причине индуктивности силовых шин со стороны коллекторов ( $L_C$ ) и эмиттеров ( $L_E$ ).

Опытные измерения участков медных силовых шин, соединяющих параллельные ветви в плече, на базе сервисного локомотивного депо «Иркутское» с помощью измерителя иммитанса МНИПИ Е7-21 показали индуктивность равную 0,3 мГн. Обладая даже незначительной величиной, индуктивность оказывает существенное влияние на распределение токов в плече ВИП и требует учёта в расчётной схеме. Тогда расчётная схема плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с учётом индуктивностей силовых шин будет соответствовать рис. 4.

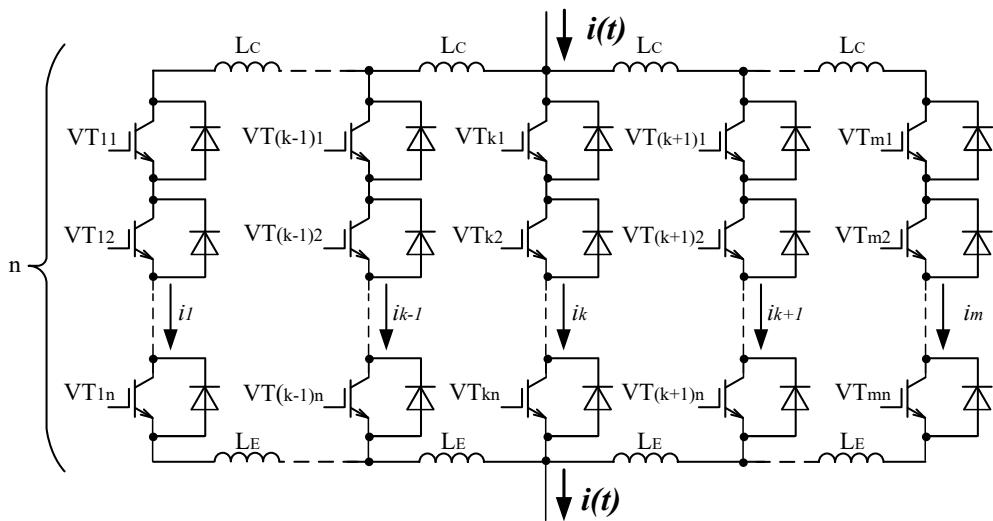


Рис. 4. Расчётная схема плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с учётом индуктивностей силовых шин

Для ВИП электровозов переменного тока характерно расположение силовых шин с коллекторной и эмиттерной сторон параллельно друг другу, чем обуславливается влияние взаимоиндукции ( $M_C$  и  $M_E$ ) силовых шин (см. рис. 5).

При расчёте принимаем, что индуктивность и взаимоиндуктивность с коллекторной и эмиттерных сторон равны:  $L_C = L_M$ ;  $M_C = M_E$ . С учётом индуктивности и взаимоиндуктивности силовых шин процесс деления тока по  $m$  параллельным ветвям плеча описывается с помощью системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_1}{dt} + i_1 R_{\Delta 1}^* + u_{01}^* - M \frac{di_1}{dt} &= u \\ \vdots & \\ L \frac{di_m}{dt} + i_m R_{\Delta m}^* + u_{0m}^* - M \frac{di_m}{dt} &= u \\ L \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + \cdots + L \frac{di_m}{dt} - M \frac{di_m}{dt} &= 0 \\ i_1 + \cdots + i_m &= i(t) \end{aligned} \right\}$$

Из выражений очевидно, что для равномерного распределения токов по параллельным ветвям, если принять допущение, что ВАХ всех параллельных СПП идентичны, необходимо равное

значение индуктивности и взаимоиндуктивности по всем токовым путям относительно точки подключения силовых шин со стороны коллекторов и эмиттеров.

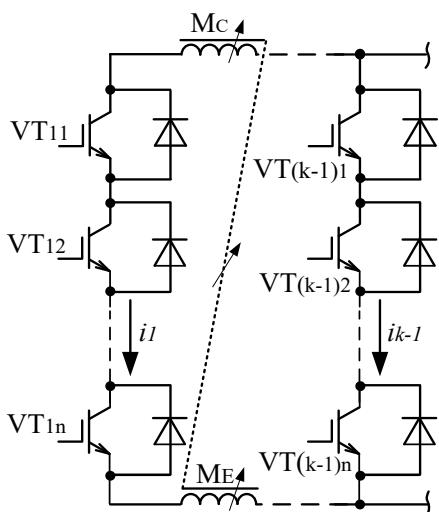


Рис. 5. Взаимоиндукция силовых шин в плече ВИП на базе IGBT-транзисторов

габаритные размеры приняты подобно плечам ВИП электровозов переменного тока. Испытание выполняется путём кратковременного пропуска тока короткого замыкания через модель плеча. Изменение тока в ветвях отслеживается с помощью катушек Роговского LEM ART-D22 D125 ( $T_1-T_4$ , см. рис. 6 и 7) с последующим интегрированием сигнала и выводом диаграмм цифровым осциллографом Tektronix TDS 2024C.

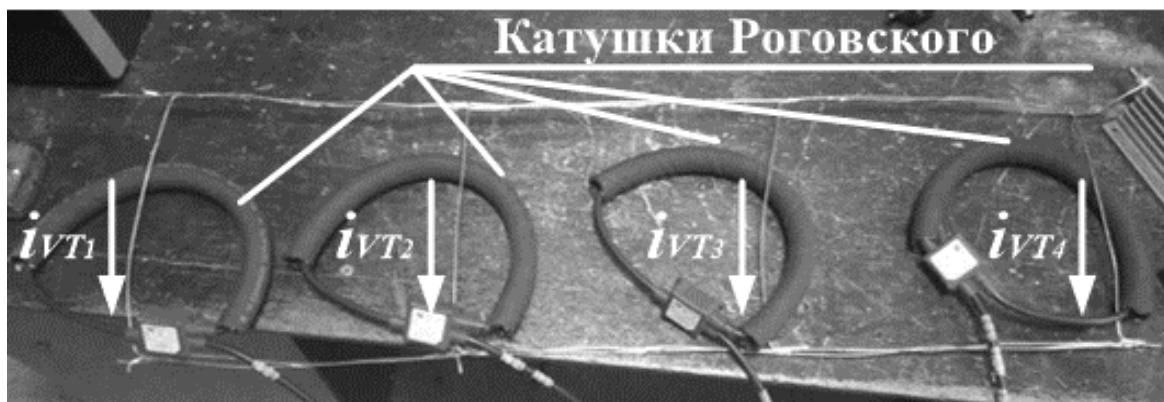


Рис. 6. Физическое моделирование протекания тока в параллельных ветвях при одностороннем подводе тока к плечу ВИП

На рис. 8 представлен результат моделирования протекания тока в параллельных ветвях при одностороннем способе подвода тока (см. рис. 8, б), когда шины переменного и постоянного токов подключаются к коллектору и эмиттеру крайней ветви плеча (см. рис. 8, а).

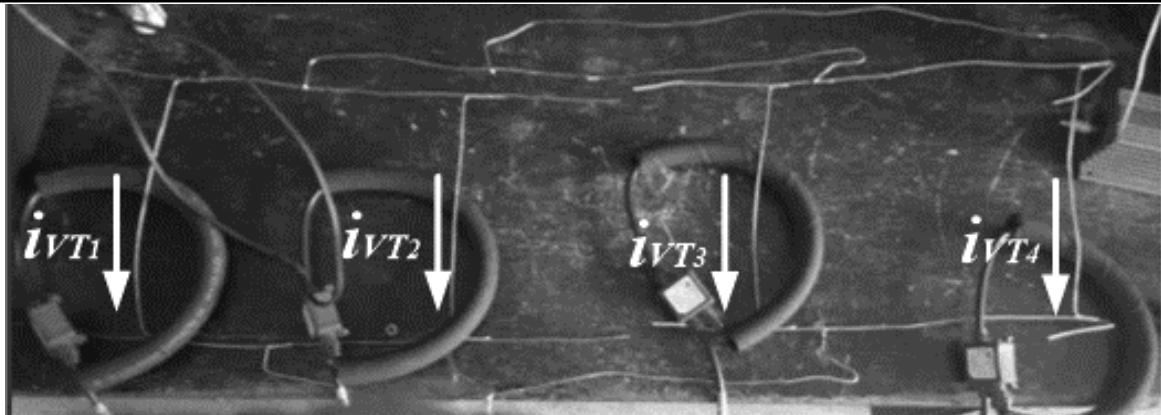


Рис. 7. Физическое моделирование протекания тока в параллельных ветвях с предложенным способом подвода тока

По диаграммам распределения токов (см. рис. 8, б) видно, что ток по четвёртой ветви ( $i_{VT4}$ ) практически в три раза превышает ток по всем остальным ветвям в сумме. Это результат подтверждает, что соединение группы параллельно соединённых IGBT-транзисторов является сложной задачей. При неравномерном распределении токов по параллельным ветвям неизбежна перегрузка ветвей с последующим возможным пробоем плеча и отказом оборудования электровоза. Стандартные известные способы соединения силовых шин в плече не обеспечивают нормальной работоспособности плеча ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов.

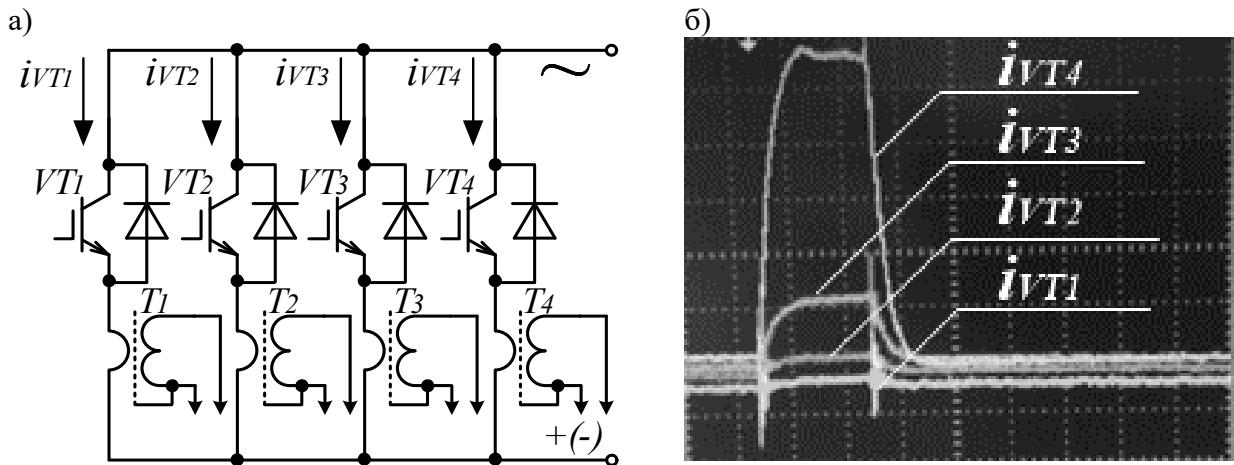


Рис. 8. Физическое моделирование протекания тока в параллельных ветвях плеча ВИП при одностороннем способе подвода тока:  
а – упрощённая принципиальная схема; б – диаграмма распределения токов

Известно, что в тиристорных ВИП для выравнивания токов по ветвям применяются индуктивные делители [12–15]. Однако при управлении IGBT-транзисторами дополнительная индуктивность крайне нежелательна, т. к. не только усложняет конструкцию, но и приводит к увеличению перенапряжений при коммутации [16].

Упрощённая принципиальная схема плеча ВИП с предлагаемым способом подвода тока к параллельным ветвям на базе IGBT-транзисторов представлена на рис. 9, а. Результат физического моделирования протекания тока в параллельных ветвях с предложенным способом подводом тока представлен на рис. 9, б.

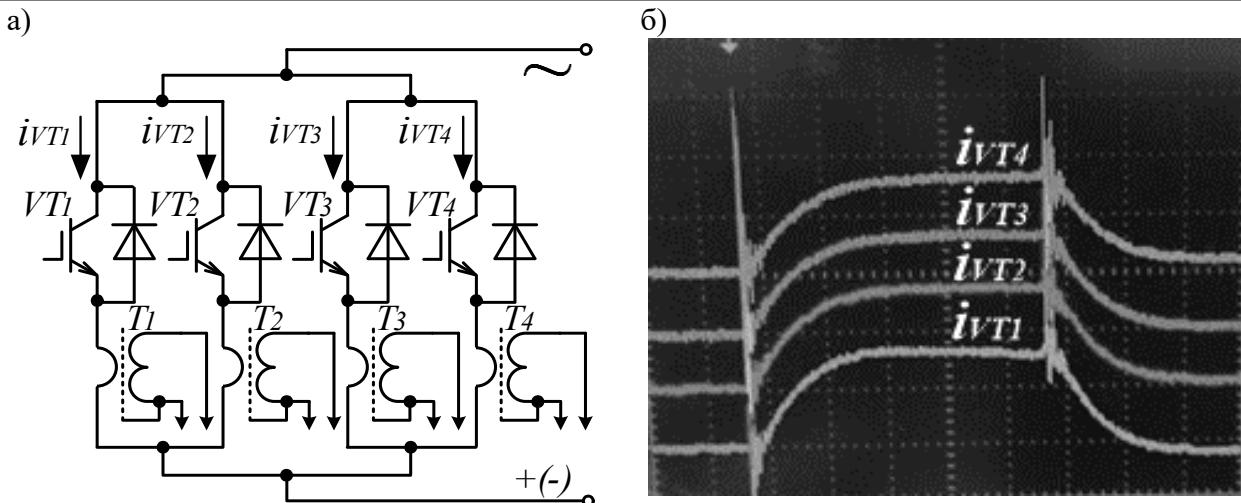


Рис. 9. Физическое моделирование протекания тока в параллельных ветвях с предложенным способом подвода тока к параллельным ветвям плача ВИП:  
а – упрощённая принципиальная схема; б – диаграмма распределения токов

Результат опыта показывает оптимальное распределение токов по параллельным ветвям плача ВИП с предложенным способом подвода тока (см. рис. 9, б). Мгновенные значения токов по ветвям в течение всего периода проводящего состояния и в моменты коммутации равны по величине.

**Заключение.** Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Паразитные параметры силовой цепи плача ВИП вкупе с топологией соединения силовых шин влияют на симметрию токов параллельно включённых IGBT-транзисторов. Ток по одной ветви может в три раза превышать суммарных ток остальных ветвей.

2. Один из аспектов достижения равенства токов по параллельным ветвям плача – выравнивание импеданса каждой ветви относительно точки подключения плача к силовым шинам переменного и постоянного токов.

3. Предложенный способ подвода тока к параллельным ветвям плача ВИП на базе IGBT-транзисторов позволяет получить равномерное распределение токов по параллельным ветвям плача, что подтверждается результатами физического моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Якушева, А. Рационализировать перевозки / А. Якушева // Гудок: [сайт]. – 2022. – № 168. – 17 сент. – URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1614134> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.
2. Восточный полигон – Транссиб и БАМ. Итоги развития в 2013-2022 гг. // ОАО «РЖД»: официальный сайт, 2023. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19721> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.
3. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги»: Утв. Указом Президента Российской Федерации № 466р от 07 мая 2018 г. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст: непосредственный.
4. Якушева, А. Вектор развития / А. Якушева. // Гудок: [сайт]. – 2022. – № 238. – 22 дек. – URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1622858> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.
5. Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власьевский [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 17-25.
6. Габов, М. Ю. Проблемы транспортной системы Хабаровского края / М. Ю. Габов, Т. А. Яковлева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-2 (34). – С. 101-104.

7. Иванов, В. С. Диодно-транзисторная база моторвагонного подвижного состава переменного тока / В. С. Иванов, И. А. Баринов // Молодая наука Сибири. – 2018. – № 1. – С. 49-57.
8. Знаенок, В. Н. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока в тяжеловесном движении / В. Н. Знаенок, А. О. Линьков // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 2 (12). – С. 1-7.
9. Макашева, С. И. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристоров и IGBT-транзисторов / С. И. Макашева, П. С. Пинчуков, О. В. Мельниченко // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 112-125.
10. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока / Э. М. Аптер, Г. Г. Жемиров, И. И. Левитан, А. Г. Элькин. – Москва: Энергия, 1975. – 208 с.
11. МикроЭМ – группа компаний: [сайт]. – Москва. – URL: <https://microem.ru/> (дата обращения: 08.08.2023). – Текст: электронный.
12. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. – Новочеркасск: ВЭлНИИ, 2005. – 125 с.
13. Капустин, Л. Д. Надёжность и эффективность электровозов ВЛ80р в эксплуатации / Л. Д. Капустин, А. С. Копанев, А. Л. Лозановский. – Москва: Транспорт, 1986. – 240 с.
14. Электровоз ВЛ-85. Руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкирев, Л. А. Позднякова и др. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
15. Электровоз ЭП1: Руководство по эксплуатации. Том 1 / Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения. – Москва: Транспорт, 2006. – 554 с.
16. О частичной компенсации паразитных трансформаторных связей паразитными индуктивностями при параллельном включении IGBT-транзисторов / А. Портной, О. Мельниченко, В. Знаенок, В. Лобанов, И. Осипчук // Силовая электроника. – 2022. – № 5. – С. 18-22.



**Фролов А. В., Ботманов А. В.**  
A. V. Frolov, A. V. Botmanov

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С АКТИВНО-ЁМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

### STUDY OF BRIDGE RECTIFIER OPERATION PECULIARITIES WITH ACTIVE-CAPACITIVE LOAD

**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 Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

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

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

**Аннотация.** Приводятся результаты теоретических расчётов и компьютерного моделирования работы мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром и активной нагрузкой. Предложены эмпирические зависимости среднего значения и коэффициента пульсаций напряжения нагрузки от ёмкости фильтра и сопротивления нагрузки с точностью аппроксимации не менее 0,99. Указанные зависимости могут использоваться для расчёта оптимального значения ёмкости сглаживающего фильтра под заданный ток нагрузки.

**Summary.** The results of theoretical calculations and computer modeling of bridge rectifier with capacitive filter and active load are given. Empirical dependences of average value and load voltage ripple factor on filter capacitance and load resistance with approximation accuracy not less than 0,99 are proposed. These dependences can be used to calculate the optimal value of the smoothing filter capacitance for a given load current.

**Ключевые слова:** мостовой, выпрямитель, расчёт, моделирование, SimInTech, ёмкостный фильтр, среднее напряжение, коэффициент пульсаций.

**Key words:** bridge, rectifier, calculation, simulation, SimInTech, capacitive filter, medium voltage, ripple factor.

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

УДК 621.314.6

**Введение.** Мостовые выпрямители являются наиболее распространёнными типами выпрямителей переменного тока и используются практически во всех современных источниках вторичного электропитания. В большинстве случаев относительно низкого тока нагрузки и низкой частоты пульсаций (менее 1 кГц) для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения технически и экономически выгодно применение ёмкостных фильтров.

Существующие методики расчёта работы выпрямителя с фильтром, как правило, раздельно анализируют работу выпрямителя (как правило, на холостом ходу или при работе на активную нагрузку) и работу сглаживающего фильтра. При этом считается, что фильтр сглаживает пульсации выпрямленного напряжения, но не изменяет его среднего значения, т. к. применяемые фильтры являются пассивными элементами. То есть фактически схема выпрямителя представляется источником ЭДС заданной формы. Но выпрямитель содержит диоды, в результате чего заряд кон-

денсаторов фильтра выполняется от выпрямителя, а разряд – через нагрузку, а не через внутреннее сопротивление выпрямителя, вопреки описанной модели с источником ЭДС. В результате этого режим работы реальной схемы выпрямителя с фильтром значительно отличается от расчётного и совпадает с ним только в случае больших токов нагрузки. Эти отличия касаются как величины среднего значения выходного напряжения, так и коэффициента его пульсаций.

Осциллограмма выходного напряжения выпрямителя с ёмкостным фильтром определяется постоянной времени цепи, т. е. ёмкостью конденсатора фильтра и сопротивлением нагрузки (см. рис. 1) [8; 10; 12; 23]. В зависимости от тока нагрузки напряжение нагрузки может принимать значения  $U_H = \left(\frac{2}{\pi} \dots 1\right) \sqrt{2} U_{bx}$ , коэффициент пульсаций – значение  $K_p = \frac{2}{3} \dots 0$ . Представленные на рис. 1 диаграммы получены для ёмкости конденсатора фильтра 500 мкФ и сопротивления нагрузки 2 Ом; 20 Ом; 200 Ом; 1 кОм. При этом форма выходного напряжения становится сопоставимой с классически анализируемой лишь при достаточно низких сопротивлениях нагрузки – порядка 2 Ом.

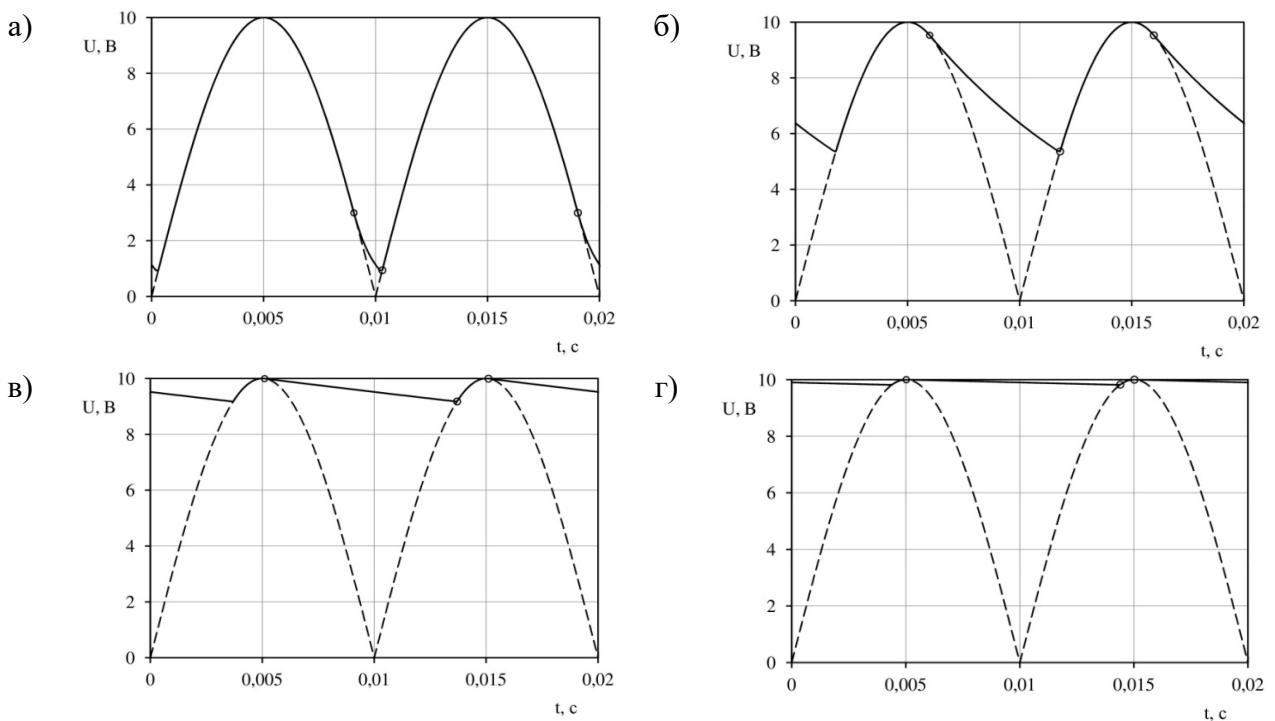


Рис. 1. Осциллограммы напряжения нагрузки мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром 500 мкФ и сопротивлением нагрузки: а – 2 Ом; б – 20 Ом; в – 200 Ом; г – 1 кОм

Большинство методик расчёта режима работы мостового выпрямителя применяется при активной нагрузке. Также существуют методики расчёта выпрямителя на индуктивную нагрузку. Реже встречаются методики расчёта работы выпрямителя на чисто ёмкостную нагрузку. При этом выражения для среднего значения напряжения нагрузки и коэффициента пульсаций [3; 8; 10–12; 14; 15; 18; 20] достаточно приближённые. Часто они рассчитываются по сложным алгоритмам с помощью номограмм и только для ограниченных режимов работы [16], в частности

$$\frac{4}{(m\omega CR_H)^2} > \frac{R_{bh}}{R_H} \geq \frac{10}{(m\omega CR_H)^2} [23].$$

Литературный поиск показывает [2; 4; 6–8; 10; 12; 16–21], что при «классическом» расчёте выпрямителя обычно используются выражения

$$U_H \approx 0,9U_{bx}, \quad (1)$$

$$K_p \approx 0,67,$$

где  $U_h$  – напряжение нагрузки (среднее), В;  $U_{bx}$  – напряжение на входе выпрямителя (действующее значение), В;  $K_p$  – коэффициент пульсаций напряжения нагрузки выпрямителя.

В литературе встречается следующая зависимость напряжения нагрузки от ёмкости фильтра и сопротивления нагрузки:

$$\begin{cases} U_h = \sqrt{2}U_{bx} \left( 1 - \frac{1}{2fCR_h} \right) \\ CR_h > \frac{100}{f} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $C$  – ёмкость конденсатора фильтра, Ф;  $R_h$  – сопротивление нагрузки, Ом.

Формул расчёта ёмкостного фильтра для схемы двухполупериодного выпрямителя в современной литературе встречается несколько [2; 3; 7; 12; 17; 19; 20; 23], и они противоречивы. В большинстве работ приводится формула

$$K_p = \frac{1}{2\pi f_p CR_h}. \quad (3)$$

Но встречаются и другие выражения:

$$K_{cp} = \sqrt{(2\pi f_p CR_h)^2 + 1}; \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_{p,h} = \frac{1}{\sqrt{3}(4f_p CR_h - 1)} \\ CR_h \gg \frac{1}{2\pi f_p} \end{cases}; \quad (5)$$

$$K_p = \frac{3}{CR_h}; \quad (6)$$

$$K_{cp} = \frac{k}{k^2 - 1} 2\pi f_c CR_h = \frac{4}{3} \pi f_c CR_h; \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_{cp} = 2\pi f_p CR_h \\ CR_h > 10 \end{cases}; \quad (8)$$

$$K_{cp} = \frac{K_{p,bx}}{K_p},$$

где  $K_{cp}$  – коэффициент сглаживания пульсаций фильтра;  $K_{p,bx}$ ,  $K_p$  – соответственно коэффициенты пульсаций напряжения на входе фильтра и в нагрузке соответственно;  $f_p$  – частота пульсаций, Гц.

В связи с недостаточной изученностью зависимости режима работы мостового выпрямителя с С-фильтром от ёмкости фильтра и сопротивления нагрузки в статье приведены результаты теоретических исследований и математического моделирования работы выпрямителя с активно-ёмкостной нагрузкой.

**Методика исследований.** Теоретические исследования заключались в расчёте идеализированной электрической цепи мостового выпрямителя с активно-ёмкостной нагрузкой (см. рис. 2) с использованием законов электротехники. При расчётах принимались следующие допущения [23]: нагрузка – чисто активная; выпрямитель идеальный (отсутствуют падение напряжения, обратный ток и сопротивление).

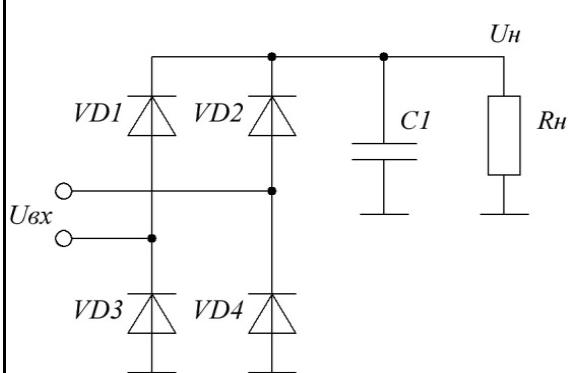


Рис. 2. Исследуемая схема

напряжения, обратный ток и сопротивление).

Среднее значение напряжения нагрузки

$$U_{\text{h.cp}} = \frac{2}{T} \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{3}{4}T} U_{\text{h}}(t) dt,$$

где  $U_{\text{h.cp}}$  – среднее напряжение нагрузки, В;  $T$  – период напряжения, с;  $U_{\text{h}}(t)$  – мгновенное напряжение нагрузки, В.

Для исключения зависимости результатов расчётов и моделирования от входного напряжения схемы в работе использовалось не абсолютное значение напряжения нагрузки, а относительное ( $U_{\text{h}}$ ):

$$U_{\text{h}} = \frac{U_{\text{h.cp}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Расчёт коэффициента пульсаций напряжения  $k_p$  выполнялся по формуле

$$k_p = \frac{U_{1.m}}{U_{\text{h.cp}}},$$

где  $U_{1.m}$  – амплитуда первой гармоники, В.

Расчёт амплитуды первой гармоники выполняется с помощью преобразования Фурье:

$$U_{1.m} = \sqrt{A1^2 + B1^2};$$

$$A1 = \frac{4}{T} \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{3}{4}T} \left( U_{\text{h}}(t) \cos \left( \frac{4\pi t}{T} \right) \right) dt;$$

$$B1 = \frac{4}{T} \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{3}{4}T} \left( U_{\text{h}}(t) \sin \left( \frac{4\pi t}{T} \right) \right) dt.$$

Для проверки результатов теоретических расчётов полученные зависимости проверялись с помощью математического имитационного моделирования [1; 5; 13; 22] в программе SimInTech (см. рис. 3).

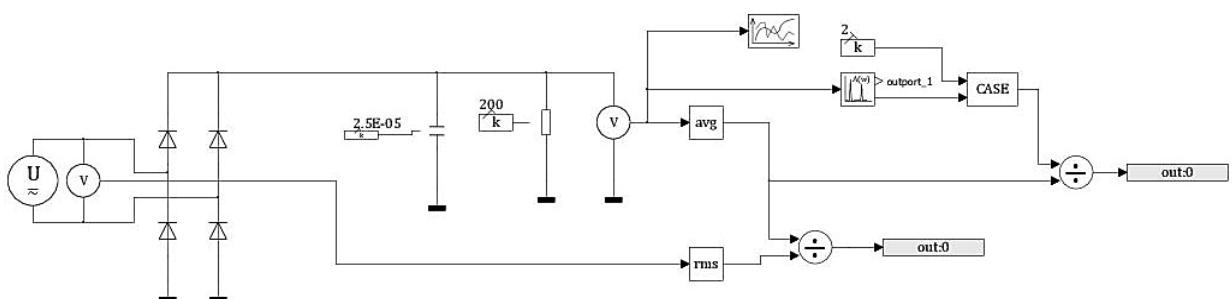


Рис. 3. Модель схемы в программе SimInTech

Параметры элементов модели:

- входное напряжение ( $U$ ) – амплитуда – 100 В; частота – 10 Гц; фаза – 0;
- диод – вид BAX – экспоненциальная;  $RL = 10$  МОм;  $RS = 42,9$  мОм;  $IS = 31,98$  нА;  $N = 2$ ;  $TT = 8,87$  мкс;  $CJO = 46,77$  пФ;  $VJ = 0,4$  В;  $M = 0,469$ ;  $FC = 0,5$ ;  $EG = 0,784$  эВ;  $TEG1 = 0,000473$ ;  $TEG2 = 636$ ;  $XTI = 0,504$ ;  $TRS = 0$ ;  $BV = 440$  В;  $IBV = 0,1$  мА;  $TBV = 0$ ;  $T_{nom} = 27$  °C;  $T = 27$  °C;
- сопротивление нагрузки  $R = 200$  Ом;

– ёмкость фильтра  $C = 10 \text{ мкФ} \dots 0,1$ .

Параметры расчёта:  $h_{\min} = 5 \cdot 10^{-6}$ ;  $h_{\max} = 10^{-4}$ ;  $startstep = 0$ ;  $intmet = RK45$ ;  $starttime = 0$ ;  $endtime = 10^9$ ;  $relerr = 10^{-4}$ ;  $abserr = 10^{-6}$ ;  $tim_{relerror} = 10^{-12}$ ;  $synstep = 10^{-4}$ .

**Результаты исследований.** Выходное напряжение исследуемой схемы разбивается на участки (см. рис. 4) [23]:

- заряд конденсатора через выпрямитель (интервалы «B-A»), «B'-A»);
- разряд конденсатора в нагрузку (интервал «A-B»).

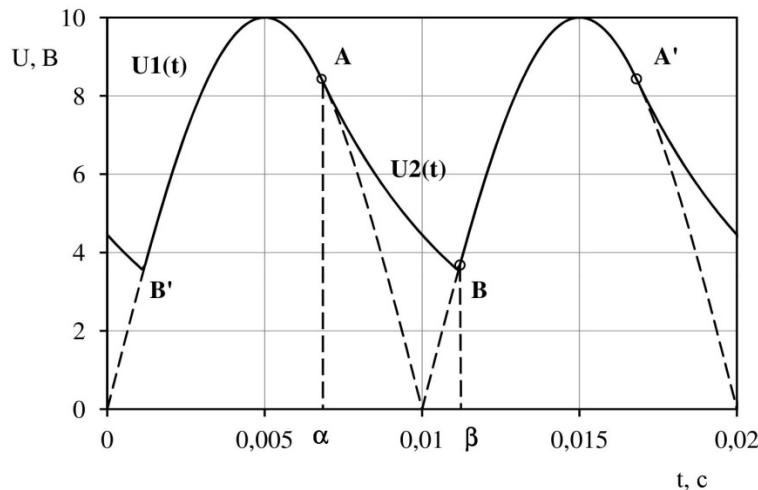


Рис. 4. Осциллограмма напряжения нагрузки исследуемой схемы

Заряд конденсатора описывается формулой

$$U_1(t) = |U_m \sin(2\pi f t)|,$$

где  $U_1(t)$  – выходное напряжение выпрямителя, В.

Конденсатор фильтра разряжается через сопротивление нагрузки следующим образом:

$$U_2(t) = U_1(\alpha) e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}} = U_m \sin(2\pi f \alpha) e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}};$$

$$\tau = CR_h,$$

где  $U_2(t)$  – напряжение конденсатора, В;  $\alpha$  – момент переключения питания нагрузки с выпрямителя на конденсатор (аналог угла выключения диода, но во временной области), с;  $\tau$  – постоянная времени цепи, с;  $C$  – ёмкость конденсатора, Ф;  $R_h$  – сопротивление нагрузки, Ом.

Разряд конденсатора происходит при закрытом диоде выпрямителя, т. е. в случае  $U_2(t) > U_1(t)$ .

Рассчитаем угол коммутации исходя из следующих заключений. На интервале времени  $\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{2}$  функция  $U_1(t)$  монотонно убывает при повышении скорости убывания:

$$-\frac{dU_1(t)}{dt} = -U_m 2\pi f \cos(2\pi f t).$$

Функция  $U_2(t)$  на указанном интервале времени монотонно убывает, но со снижением скорости:

$$-\frac{dU_2(t)}{dt} = \frac{U_m}{\tau} \sin(2\pi f \alpha) e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}}.$$

Точка коммутации «А» соответствует моменту времени ( $\alpha$ ), в котором равны как указанные функции, так и их производные:

$$\begin{cases} U_1(\alpha) = U_2(\alpha) \\ \frac{dU_1(\alpha)}{dt} = \frac{dU_2(\alpha)}{dt} ; \\ \frac{T}{4} \leq \alpha \leq \frac{T}{2} \\ U_m \omega \cos(\omega\alpha) = -\frac{U_m}{\tau} \sin(\omega\alpha) e^{-\frac{\alpha-\alpha}{\tau}} ; \\ \alpha = \frac{\operatorname{atg}(-\omega\tau) + \pi}{\omega} ; \\ \omega = 2\pi f . \end{cases}$$

Точка коммутации «В» соответствует моменту равенства выражений  $U_1(t) = U_2(t)$  на интервале времени  $\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} + \frac{T}{4}$  (см. рис. 4). Точка коммутации находится из решения следующего уравнения:

$$\begin{cases} U_1(\beta) = U_2(\beta) \\ \frac{T}{2} \leq \beta \leq \frac{5T}{4} ; \\ U_m \sin(\omega\beta) = U_m \sin(\omega\alpha) e^{-\frac{\beta-\alpha}{\tau}} ; \\ \frac{\beta-\alpha}{\tau} = -\ln \frac{\sin(\omega\beta)}{\sin(\omega\alpha)} . \end{cases}$$

Полученное уравнение аналитически неразрешимо, поэтому будем искать его решение в каждом случае численными методами.

С учётом вышеизложенного напряжение нагрузки (см. рис. 5) рассчитывается следующим образом:

$$U_H(t) = \begin{cases} U_1(t), \text{ при } U_1(t) \geq U_2(t) ; \\ U_2(t), \text{ при } U_1(t) < U_2(t) ; \\ \alpha \leq t < \alpha + \frac{T}{2} ; \end{cases}$$

$$U_H(t) = \begin{cases} |U_m \sin(\omega t)|, \text{ при } \beta - \frac{T}{2} \leq t < \alpha ; \\ U_m \sin(\omega\alpha) e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}}, \text{ при } \alpha \leq t < \beta \\ \alpha = \frac{\operatorname{atg}(-\omega\tau) + \pi}{\omega} . \end{cases}$$

Рис. 5 показывает, что известная в литературе формула (1) справедлива лишь для  $\tau < 0,02T$ . Формула (2) справедлива для  $\tau > 100T$ . А для диапазона  $0,02T \leq \tau \leq 100T$  аналитических зависимостей в литературе найти не удалось, а между тем именно в этом интервале работает большое количество схем.

В работе авторами выведена эмпирическая зависимость вида

$$y(x) = a \left( 1 - \frac{b-1}{\sqrt[n]{(c \cdot x)^n + b^n}} \right),$$

график которой имеет вид S-образной кривой. При значении  $x \rightarrow 0$   $y(x) \rightarrow \frac{a}{b}$ ; при значении  $x \rightarrow \infty$   $y(x) \rightarrow a$ . Для исследуемой кривой справедливо следующее:

$$U_H(0) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi};$$

$$U_H(\infty) = \sqrt{2},$$

поэтому для выбранной аппроксимирующей функции  $a = \sqrt{2}$ ;  $b = \frac{a}{U_H(0)} = \frac{\pi}{2}$ . В результате получим следующую эмпирическую зависимость:

$$U_H\left(\frac{\tau}{T}\right) = \sqrt{2} \left( 1 - \frac{\frac{\pi}{2} - 1}{\sqrt[n]{\left(c \frac{\tau}{T}\right)^n + \left(\frac{\pi}{2}\right)^n}} \right).$$

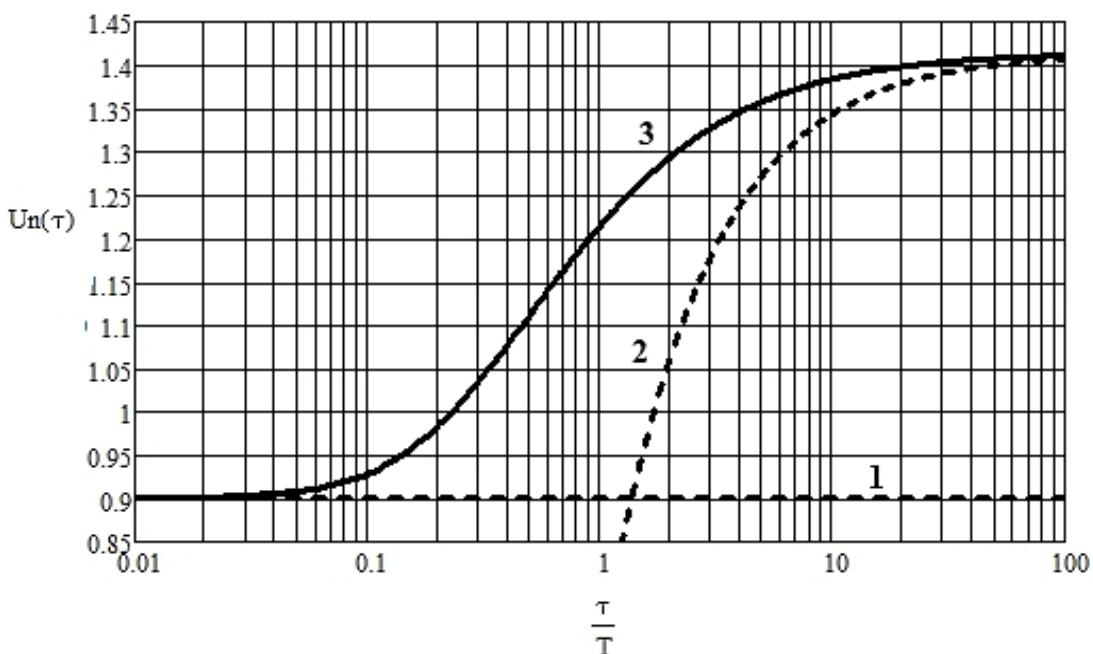


Рис. 5. Влияние постоянной времени RC-цепи нагрузки выпрямителя с С-фильтром на относительное напряжение нагрузки, рассчитанное по формулам:  
1 – по формуле (1); 2 – по формуле (2); 3 – по формуле (3)

Коэффициенты «*n*» и «*c*» подберём методом последовательного приближения таким образом, чтобы максимизировать точность аппроксимации (коэффициент детерминации). В результате получена следующая зависимость (см. рис. 6) с точностью аппроксимации  $R^2 = 0,99$ :

$$U_H\left(\frac{\tau}{T}\right) = \sqrt{2} \left( 1 - \frac{\frac{\pi}{2} - 1}{\sqrt[1,1]{\left(\sqrt{2} \frac{\tau}{T}\right)^{1,1} + \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1,1}}} \right). \quad (9)$$

Влияние постоянной времени нагрузки на коэффициент пульсаций продемонстрировано на рис. 7. Из рисунка видно, что формула (6) практически не может использоваться для расчёта коэффициента пульсаций; формулы (3), (5), (7), (8) могут применяться при  $\tau > 10T$ ; формула (4) может использоваться во всём диапазоне  $\tau$ , но её точность достаточно низкая –  $R^2 = 0,62$ .

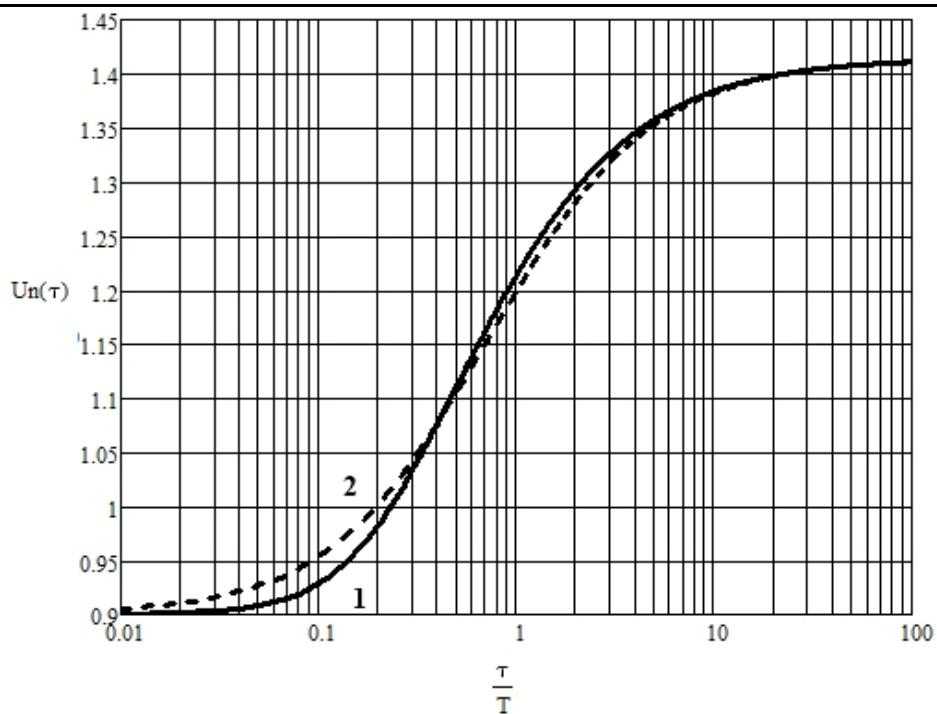


Рис. 6. Расчётная (1) и эмпирическая (2) зависимости напряжения нагрузки от постоянной времени RC-цепи

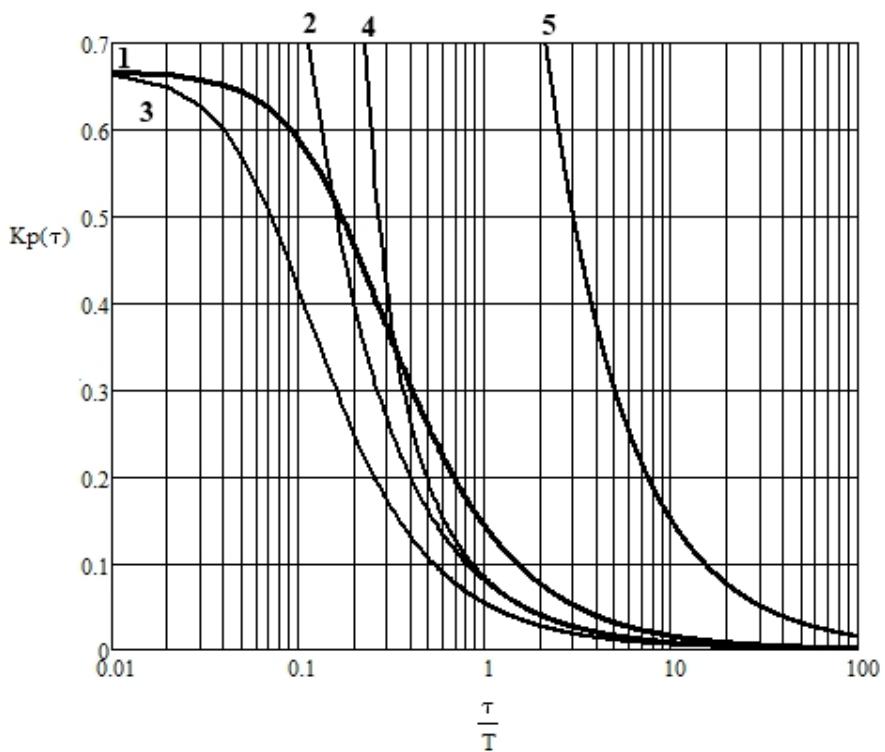


Рис. 7. Влияние постоянной времени цепи нагрузки на коэффициент пульсаций:  
 1 – теоретический расчёт; 2 – по формулам (3), (7) и (8); 3 – по формуле (4);  
 4 – по формуле (5); 5 – по формуле (6)

Для аппроксимации зависимости коэффициента пульсаций от параметров нагрузки была использована зависимость вида (4) с учётом следующего:

$$K_{\pi}(0) = \frac{2}{3};$$

$$K_{\pi}(\infty) = 0,$$

поэтому зависимость (4) модифицируется до следующего вида:

$$K_{\pi}\left(\frac{\tau}{T}\right) = \frac{\frac{2}{3}}{\sqrt[n]{\left(c \frac{\tau}{T}\right)^n + 1}}.$$

Коэффициенты «*n*» и «*c*» подберём методом последовательного приближения таким образом, чтобы максимизировать точность аппроксимации (коэффициент детерминации). В результате получена следующая зависимость (см. рис. 8) с точностью аппроксимации  $R^2 = 0,999$ :

$$K_{\pi}\left(\frac{\tau}{T}\right) = \frac{2}{3 \sqrt[1,85]{\left(4,6 \frac{\tau}{T}\right)^{1,85} + 1}}. \quad (10)$$

Проверка результатов расчётов выполнялась в программе SimInTech. Результаты моделирования представлены на рис. 9-11. Из рисунков следует, что расчётные диаграммы, среднее напряжение и коэффициент пульсаций напряжения нагрузки соответствуют результатам моделирования, за исключением меньшего значения напряжения нагрузки на величину падения напряжения на диодах.

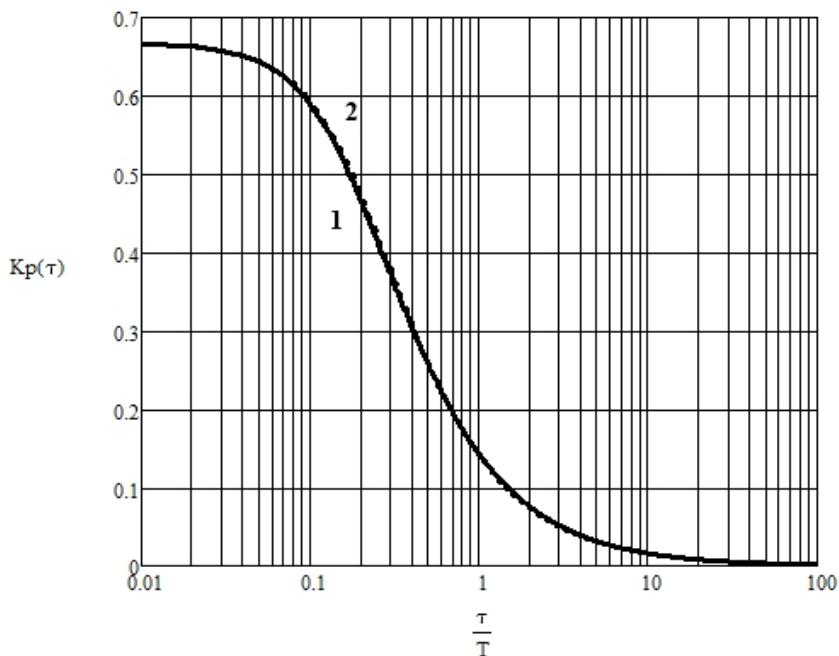


Рис. 8. Теоретически рассчитанная (1) и эмпирическая (2) зависимости коэффициента пульсаций от постоянной времени цепи мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром

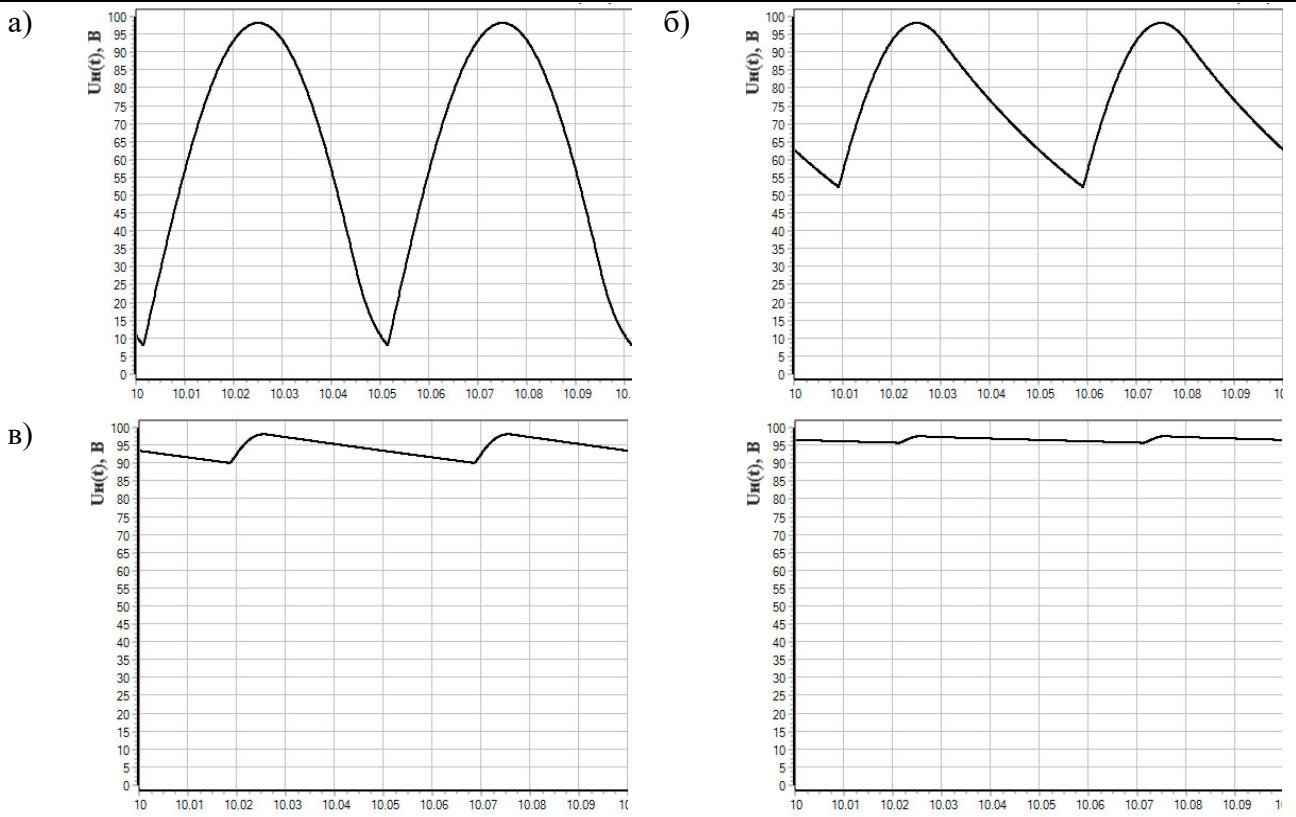


Рис. 9. Осциллограммы напряжений нагрузки при различных значениях постоянных времени цепи нагрузки: а –  $\tau = 0,05T$ ; б –  $\tau = 0,5T$ ; в –  $\tau = 5T$ ; г –  $\tau = 25T$

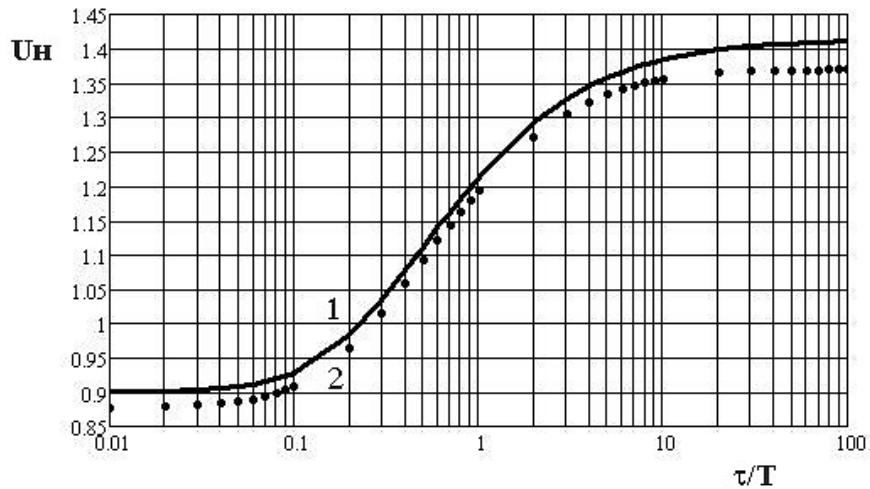


Рис. 10. Зависимость напряжения нагрузки от постоянной времени цепи мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром: 1 – полученная расчёты путём; 2 – полученная путём моделирования

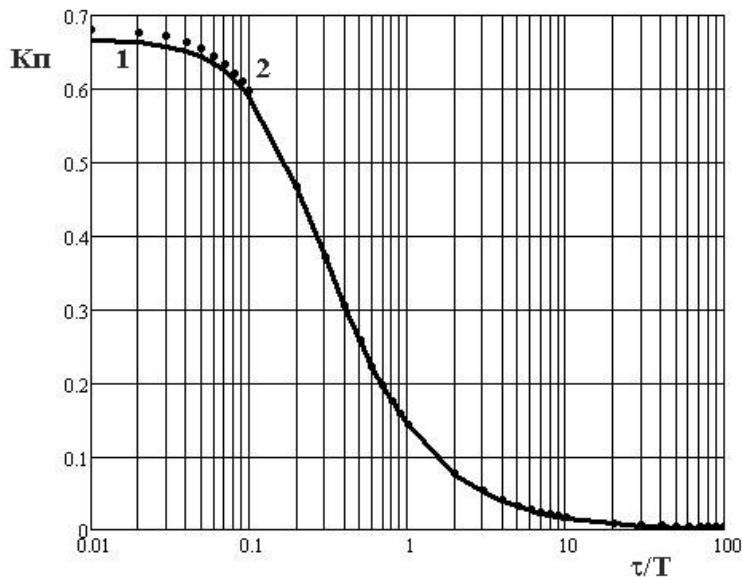


Рис. 11. Зависимость коэффициента пульсаций от постоянной времени цепи мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром: 1 – полученная расчётным путём; 2 – полученная путём моделирования

### Выводы:

1. Среднее напряжение нагрузки и коэффициент пульсаций напряжения нагрузки значительно зависят от ёмкости С-фильтра и сопротивления нагрузки мостового выпрямителя. Наибольшие изменения указанных показателей происходят в диапазоне  $0,01T < \tau < 10T$ .

2. Аналитический расчёт зависимостей среднего значения напряжения нагрузки и коэффициента пульсаций от ёмкости фильтра представляется сложной задачей. Приводимые в литературе эмпирические формулы указанных зависимостей имеют очень низкую точность аппроксимации и применимы лишь для условий работы схемы, близких либо к холостому ходу, либо к короткому замыканию. Это обуславливает непригодность существующих формул для расчёта значительного количества реальных выпрямителей с ёмкостным фильтром.

3. Получены эмпирические зависимости среднего напряжения нагрузки (9) и коэффициента пульсаций напряжения нагрузки (10) мостового выпрямителя от постоянной времени цепи с точностью аппроксимации не менее 0,99 при любых значениях постоянной времени цепи.

4. Использование в полученных формулах вместо постоянной времени цепи ( $\tau$ ) относительного значения этого параметра ( $\frac{\tau}{T}$ ) позволяет применять формулы (9) и (10) для расчёта цепей с разной частотой сети.

### ЛИТЕРАТУРА

- Использование среды динамического моделирования технических систем SimInTech в задачах полунаучного моделирования / С. А. Ахрамович [и др.] // Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов, Евпатория, 30 июня – 07 июля 2019 г. – Евпатория: Изд-во МАИ-Принт, 2019. – С. 71-73.
- Белоусова, С. А. Исследование зависимости напряжения нагрузки выпрямителя от ёмкости сглаживающего фильтра в симуляторе SimInTech / С. А. Белоусова, А. В. Фролов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных. В 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 г. / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 143-147.
- Бладыко, Ю. В. Сглаживающие фильтры / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2010. – № 2. – С. 36-40.
- Богданович, Б. Краткий радиотехнический справочник / Б. Богданович, Э. Ваксер. – Минск: Беларусь, 1968. – 560 с.

5. Болдырев, В. В. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения / В. В. Болдырев, М. А. Горьковый // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 9-18.
6. Борисов, П. А. Расчёт и моделирование выпрямителей: учеб. пособие / П. А. Борисов, В. С. Томасов. – СПб.: НИУ ИТМО, 2009. – 169 с.
7. Боцманов, А. В. Исследование в программе SimInTech влияния постоянной времени цепи нагрузки выпрямителя на минимальное значение выпрямленного напряжения / А. В. Боцманов, А. В. Фролов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных. В 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 05-11 декабря 2022 г. / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 161-164.
8. Бурков, А. Т. Электроника и преобразовательная техника. Т. 2: Электронная преобразовательная техника: учеб. / А. Т. Бурков. – М.: УМЦ ЖДТ, 2015. – 307 с.
9. Воронцов, И. Н. Моделирование в SimInTech устройств силовой электроники / И. Н. Воронцов, И. С. Ситников // Материалы 76-й студенческой научной конференции, Брянск, 25 марта 2021 г. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2021. – С. 597-598.
10. Гейтенко, Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчёт / Е. Н. Гейтенко. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2016. – 448 с.
11. Егоров, В. А. Микроконтроллерная система управления автономным инвертором с упрощённой пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией / В. А. Егоров, Ю. Г. Егорова, Е. В. Плотников // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 36-42.
12. Ефимов, И. П. Источники питания РЭА: учеб. пособие / И. П. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 136 с.
13. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.
14. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещённых энергетических устройствах / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 37-44.
15. Клишаш, В. С. Разработка конденсаторных установок и способа регулирования реактивной мощности в системах промышленного электроснабжения / В. С. Клишаш, Б. Д. Табаров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 7-14.
16. Коновалов, Б. И. Основы преобразовательной техники: учебно-методическое пособие / Б. И. Коновалов, В. С. Мишурин, В. Д. Семенов. – М.: ТУСУР, 2006. – 97 с.
17. Ллойд, П. Справочник по полупроводниковой электронике / П. Ллойд. – М.: Машиностроение, 1975. – 508 с.
18. Петров, А. Трансформаторы, выпрямители, фильтры / А. Петров // RadioRadar, 2024. – URL: [https://www.radioradar.net/hand\\_book/documentation/tran.html#5](https://www.radioradar.net/hand_book/documentation/tran.html#5) (дата обращения: 22.02.2024). – Текст: электронный. – Режим доступа: свободный.
19. Рогатова, Е. А. Зависимость коэффициента пульсаций напряжения выпрямителя от характера нагрузки / Е. А. Рогатова, А. В. Фролов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных. В 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 05-11 декабря 2022 г. / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 242-245.
20. Романов, В. П. Электропитание средств вычислительной техники: учебно-методический комплекс / В. П. Романов. – Новокузнецк: ФГОУ СПО «Кузнецкий индустриальный техникум», 2008. – 94 с.
21. Сажнев, А. М. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Сборник примеров и задач: учебное пособие / А. М. Сажнев, Л. Г. Рогулина. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2012. – 267 с.
22. Сочелев, А. Ф. Математическая модель регулятора переменного напряжения с вольтодобавочным каналом / А. Ф. Сочелев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 27-37.
23. Фролов, А. В. Исследование особенностей работы однополупериодного выпрямителя на ёмкостную нагрузку / А. В. Фролов, Н. Ю. Грунина // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 134-139.

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

**Андианов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.**  
**I. K. Andrianov, K. A. Palkov, E. K. Chepurnova**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТУРБИННОЙ ЛОПАТКИ  
С ДЕФЕКТОМ**

**BRITTLE FRACTURE MODELING OF A TURBINE BLADE WITH A DEFECT**

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

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

**Палков Константин Алексеевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: pka.knastu@gmail.com.

**Palkov Konstantin Alekseevich** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: pka.knastu@gmail.com.

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

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

**Аннотация.** Проведено конечно-элементное моделирование хрупкого разрушения турбинной лопатки с дефектом на кромке при действии центробежных сил в программном комплексе ANSYS. Сопоставлено изменение коэффициента интенсивности напряжений от приращения относительной длины трещины на основании метода податливости и инженерного подхода к оценке разрушения лопатки. По результатам расчёта на примере тестовой модели турбинной лопатки с дефектом сделаны выводы о критической длине трещины в проекции на хорду лопатки, соответствующей её предельному состоянию.

**Summary.** Finite element modeling of brittle fracture of a turbine blade with a defect on the edge under the action of centrifugal forces in the ANSYS software package has been carried out. The change in the stress intensity coefficient from the increment of the relative crack length is compared on the basis of the compliance method and the engineering approach to assessing the fracture of the blade. Based on the calculation results on the example of a test model of a turbine blade with a defect, conclusions are drawn about the critical length of the crack in the projection on the chord of the blade corresponding to its limiting state.

**Ключевые слова:** турбинная лопатка, центробежные силы, хрупкое разрушение, вязкость разрушения.

**Key words:** turbine blade, centrifugal forces, brittle fracture, crack resistance.

*Научное исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10114 «Разработка системы диагностирования повреждений турбинных лопаток и способа оптимизации теплоотвода в условиях термической усталости» (<https://rscf.ru/project/22-79-10114/>).*

УДК 539.42:620.19

**Введение.** Проблема раннего диагностирования повреждений лопаток турбин требует широкого исследования вопросов зарождения и распространения трещин, выбора критерия разрушения и методов оценки предельного состояния в зависимости от условий нагружения. В работах [1–4] авторами предложен и рассмотрен подход для обнаружения трещин в лопатках газовых тур-

бин с помощью системы капсул, содержащих активное вещество. Однако открытым при разработке данной системы является вопрос расчёта критической длины трещины, при которой происходит отрыв части лопатки в процессе эксплуатации. Сегодня существуют различные критерии разрушения: силовые, энергетические – которые позволяют оценить достижение телом с трещиной предельного состояния. С учётом вычислительных возможностей современных программных комплексов, основанных на использовании метода конечных элементов, одним из подходов является метод податливости, который строится на анализе изменения потенциальной энергии деформации в процессе «выкрашивания» трещины [5]. Метод податливости, согласно [5], обладает преимуществом в сравнении с другими методами, поскольку не требует использования мелкой сетки и позволяет проводить вычисления для широкого диапазона длин трещин.

Таким образом, в качестве объекта исследования будем рассматривать турбинную лопатку с дефектом в виде трещины отрыва, находящуюся под действием центробежных сил вследствие вращения. Цель исследования заключалась в оценке возможности применения метода податливости для анализа хрупкого разрушения турбинной лопатки с дефектом. Актуальность исследования обусловлена возможностью применения результатов для расчёта критической длины трещины в теле турбинной лопатки сложной геометрии и разработки оптимальной системы раннего обнаружения трещин.

**Методика исследования.** Исследование будем проводить при следующих допущениях: разрушение турбинной лопатки предполагается хрупким, т. е. без образования пластических деформаций в процессе нагружения; траектория роста трещины считается известной и проходит в плоскости поперечного сечения пера лопатки; на турбинную лопатку действуют только центробежные растягивающие силы; влияние действия изгибающих сил и температурного воздействия на лопатку не учитывается. На рис. 1 показана схема поперечного сечения турбинной лопатки, где  $b$  – хорда лопатки,  $l$  – длина трещины в проекции на хорду,  $R_{\text{сп}}$  – радиус кривизны «спинки» лопатки,  $R_{\text{кор}}$  – радиус кривизны «корытца» лопатки. Штриховкой на рис. 1 обозначена область, свободная от дефекта.

В качестве критерия разрушения турбинной лопатки будем использовать силовой критерий разрушения Дж. Р. Ирвина [6], согласно которому трещина начинает расти при достижении коэффициентом интенсивности напряжений  $K$  предельного значения:

$$K = K_c, \quad (1)$$

где  $K_c$  – вязкость разрушения.

В инженерных расчётах для оценки коэффициента интенсивности напряжений в турбинной лопатке с трещиной на кромке применяется формула [5–7]

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} Y, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $Y$  –  $K$ -тарировка, которая для рабочей лопатки турбины принимает значение

$$Y = \frac{1.11 + 5(l/b)^4}{1 - l/b}. \quad (3)$$

Напряжённое состояние в турбинной лопатке постоянного поперечного сечения при действии только центробежных растягивающих сил определяется соотношением [8]

$$\sigma = \frac{\rho \omega^2}{2} (R^2 - z^2), \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала лопатки;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $z$  – расстояние от оси вращения до рассматриваемого сечения лопатки;  $R$  – расстояние от оси вращения до периферийного сечения лопатки.

Формула (4) для определения напряжённого состояния в сечении турбинной лопатки не учитывает наличие трещины и её влияние на перераспределение напряжений. Соответственно, соотношения (2) – (4) применимы для приближённой оценки коэффициента интенсивности напря-

жений, когда в турбинной лопатке распространяется трещина отрыва, в других случаях требуется искать иной подход для оценки состояния трещины в турбинной лопатке. Одним из таких подходов является метод податливостей. Согласно методу, требуется оценить изменение потенциальной энергии упругого деформирования. Поток энергии в вершину трещины определяется соотношением [5, 6]

$$G = \frac{\Delta\Pi}{\Delta S}, \quad (5)$$

где  $\Delta\Pi$  – приращение потенциальной энергии упругого деформирования;  $\Delta S$  – площадь поверхности трещины по обоим берегам.

Коэффициент интенсивности напряжений будем определять на основании формулы для плоского напряжённого состояния, согласно [5, 6]:

$$K = \sqrt{GE}, \quad (6)$$

где  $E$  – модуль Юнга.

Поскольку турбинная лопатка представляет собой тело сложной геометрии, соответственно, расчёт коэффициента интенсивности напряжений согласно формулам (5) и (6) будем проводить с помощью метода конечных элементов, где одной из важных задач является построение равномерной конечно-элементной сетки. На рис. 2 представлена дискретизация геометрии турбинной лопатки на конечное множество элементов в программном комплексе ANSYS. При этом ввиду того, что оценка изменения потенциальной энергии упругого деформирования проводится в окрестности берегов и фронта трещины, требовалось сгущение конечно-элементной сетки вблизи трещины. На рис. 3 представлена конечно-элементная сетка в окрестностях трещин различной длины, моделируемых в теле лопатки. По мере удаления от области трещины размер конечного-элементной сетки увеличивается.

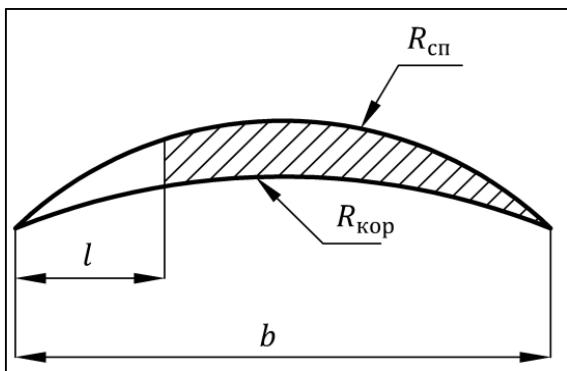


Рис.1. Схема поперечного сечения турбинной лопатки с дефектом

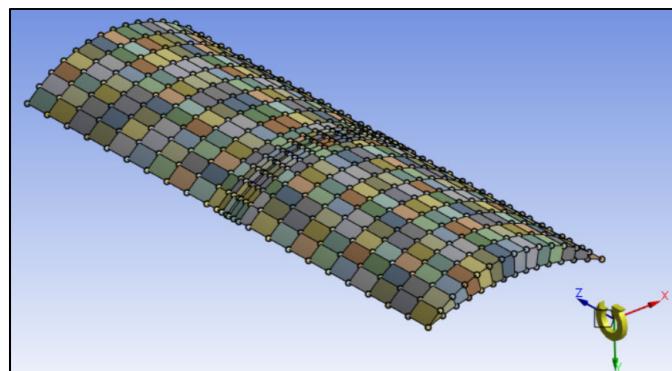


Рис.2. Конечно-элементная сетка турбинной лопатки в ANSYS

Расчёт коэффициента интенсивности напряжений проводился согласно следующей схеме [5, 6]: при заданной длине трещины  $l$  методом конечных элементов рассчитывалась потенциальная энергия упругого деформирования в окрестности трещины согласно рис. 3. Затем задавалось приращение длины трещины на длину конечного элемента ( $l + \Delta l$ ), пересчитывалась потенциальная энергия упругого деформирования в той же окрестности трещины и оценивалась разность суммарных потенциальных энергий на двух этапах расчёта. На основании формул (5) и (6) определялись интенсивность освобождения упругой энергии и коэффициент интенсивности напряжений.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Согласно постановке задачи в программном комплексе ANSYS, корневое сечение лопатки жёстко закреплялось, ко всему объёму тела прикладывалась нагрузка в виде постоянной угловой скорости относительно оси  $0x$ , отстоящей от

плоскости корневого сечения лопатки на расстоянии  $R - h$ , где  $h$  – высота пера лопатки (см. рис. 2).

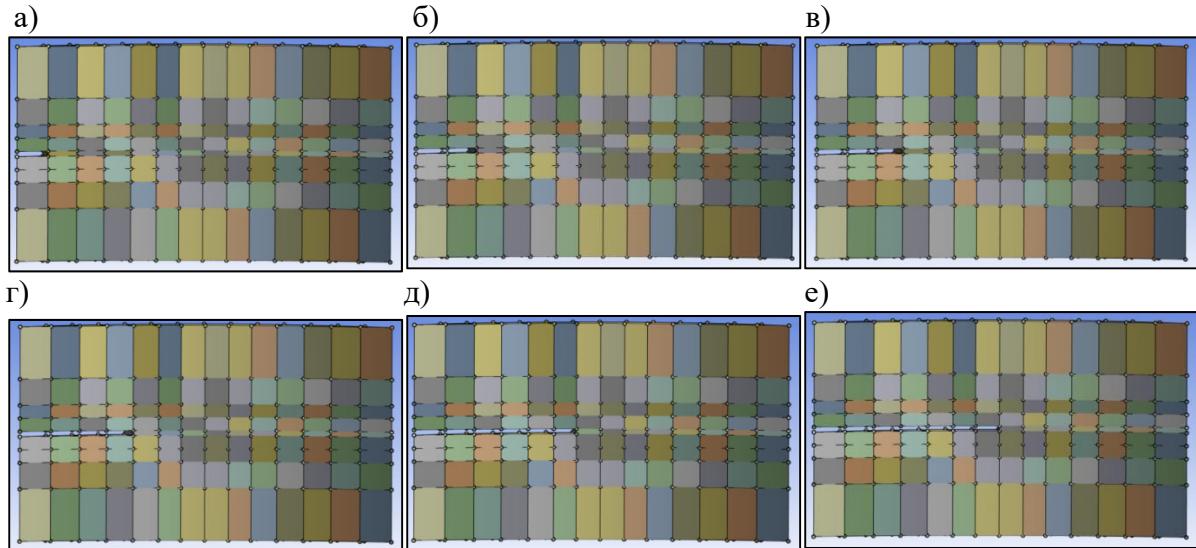


Рис. 3. Конечно-элементная сетка в области берегов трещины различной длины в процессе «вырашивания»: а –  $l/b = 0.07$ , б –  $l/b = 0.14$ , в –  $l/b = 0.21$ , г –  $l/b = 0.28$ , д –  $l/b = 0.42$ , е –  $l/b = 0.5$

При моделировании задавались следующие геометрические характеристики турбинной лопатки:  $R_{\text{сп}} = 50$  мм,  $R_{\text{кор}} = 93$  мм,  $R = 300$  мм,  $b = 70$  мм,  $h = 200$  мм. Характеристики материала 45Х2НМ лопатки:  $K_c = 90 \dots 98$  МПа · м<sup>1/2</sup> [9],  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 2.1 \cdot 10^5$  МПа. Частота вращения турбинной лопатки: 10 000 об/мин. Серия численных расчётов коэффициента интенсивности напряжений проводилась для относительных длин трещин в кромке лопатки:  $l/b = 0.07$ ,  $l/b = 0.14$ ,  $l/b = 0.21$ ,  $l/b = 0.28$ ,  $l/b = 0.42$ ,  $l/b = 0.5$ , а затем по данным о расчётных значениях коэффициентов интенсивностей напряжений для разных относительных длин трещин проводилась экстраполяция по экспоненциальному закону.

В качестве тестового расчёта на начальном этапе было проведено сравнение напряжённого состояния в срединной части пера лопатки без дефекта от действия центробежных сил по формуле (4) и с помощью метода конечных элементов в программе ANSYS при действии угловой скорости  $\omega = \text{const}$  относительно оси  $0x$ . Результаты распределения эквивалентных напряжений по Мизесу представлены на рис. 4. Напряжения в срединном сечении при  $z = R - h/2$  согласно формуле (4) составили 214 МПа, а при расчёте методом конечных элементов – 216 МПа. Расхождения в результатах оценки напряжений составили менее 1 %.

При моделировании в ANSYS напряжённо-деформированного состояния турбинных лопаток с трещинами различной длины в качестве выходных данных использовался результат «Strain Energy», представляющий собой потенциальную энергию упругого деформирования. Согласно результатам, при увеличении длины трещины потенциальная энергия упругого деформирования увеличивалась. Результаты расчёта коэффициента интенсивности напряжений методом податливости с помощью конечно-элементного моделирования в ANSYS и его экстраполяция представлена на рис. 5. С целью сравнительного анализа на рис. 5 пунктирной линией изображена зависимость коэффициента интенсивности напряжений с использованием формул (2), (3).

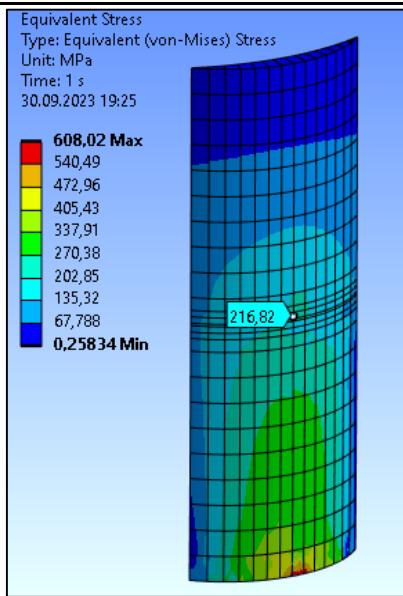


Рис. 4. Напряженное состояние турбинной лопатки без трещины

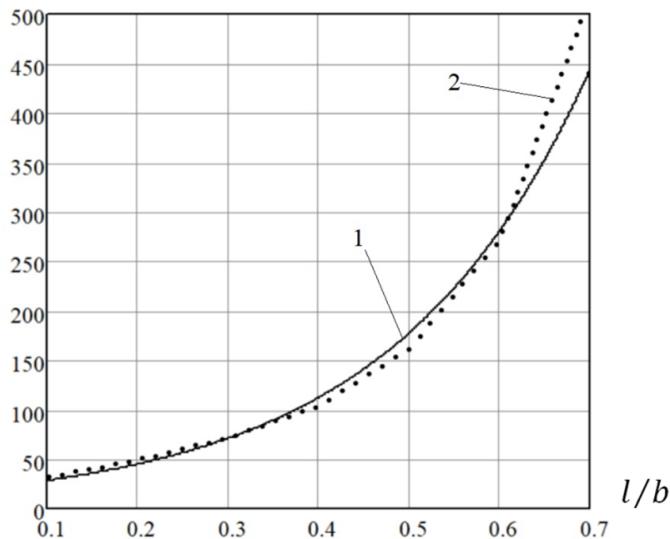
 $K, \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ 


Рис. 5. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от относительной длины трещины турбинной лопатки при расчёте: 1 – методом податливостей согласно (6), 2 – по формуле (2)

Таким образом, при данных условиях нагружения, геометрии и материале турбинной лопатки разрушение согласно (1) при использовании метода податливости происходит при достижении длиной трещины  $l$  значений: 35...37 % хорды лопатки. При расчёте коэффициента интенсивности напряжений согласно формуле (2) предельное состояние наступает при достижении длиной трещины  $l$  значений 36...38 % хорды лопатки. Следует отметить, что расхождения в результатах оценки коэффициента интенсивности напряжений при  $l/b \leq 0.6$  согласно двум подходам не превышают 10 %, а при  $l/b > 0.6$  расхождения в результатах начинают увеличиваться, однако эта область малоинтересна, поскольку турбинная лопатка с дефектом уже перейдёт в предельное состояние.

**Заключение.** Применение метода податливости при моделировании хрупкого разрушения турбинной лопатки с дефектом показало хорошую сходимость с инженерным подходом для оценки её предельного состояния. В заключение следует отметить, что более точная оценка коэффициента интенсивности напряжений турбинной лопатки с дефектом требует учёта изменения потенциальной энергии упругого деформирования во всём теле турбинной лопатки при «выращивании» трещины. Кроме того, программный комплекс ANSYS имеет встроенную функцию расчёта коэффициентов интенсивности напряжений трещин I, II, III типов, однако данный подход требует существенного сгущения конечно-элементной сетки в окрестности дефекта и в рамках текущего исследования данный аспект не рассматривался.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гринкруг, М. С. Система повышения безопасности авиационных газотурбинных двигателей во время эксплуатации / М. С. Гринкруг, К. Б. Мохамад, Н. А. Новгородов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 14-18 ноября 2022 года / Редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 197-199.
- Мохамад, К. Б. Технологическое исследование характеристик системы раннего обнаружения микротрещин в лопатке турбины двигателя / К. Б. Мохамад, М. С. Гринкруг // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре,

06-11 декабря 2021 года / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 290-293.

3. Andrianov, Ivan & Balli, M. & Grinkrug, Miron & Novgorodov, Nikita. (2023). Finite Element Calculation of the Limiting Pressure for Rupture of Capsules with an Active Substance in the Crack Detection System of Gas Turbine Blades // Lecture Notes in Networks and Systems. № 722. p.757-768. DOI: 10.1007/978-3-031-35311-6\_72.

4. Andrianov, Ivan & Chepurnova, Elena. (2023). Optimization Model of the Shell Capsules Geometry for a System for Diagnosing Damage to Gas Turbine Blades in Non-stationary. International Journal of Mechanics. 17. 38-44. 10.46300/9104.2023.17.6.

5. Карзов, Г. П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Швецова. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.

6. Пестриков, В. М. Механика разрушения / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2012. – 552 с.

7. Шерышев, А. Е. Возможный подход к расчётно-аналитической оценке коэффициента интенсивности напряжений лопатки газотурбинных двигателей / А. Е. Шерышев, Д. В. Тельнов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2014. – № 208. – С. 72-75.

8. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.

9. Металловедение и термическая обработка стали: справ. В 3 т. Т. 1. Методы испытаний и исследования / Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Раухстадта. – М.: Металлургия, 1991. – 462 с.



Просолович А. А.  
A. A. Prosolovich

## ПРИМЕНЕНИЕ WEBGL ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КАМПУСА УНИВЕРСИТЕТА

### THE USE OF WEBGL IN THE DEVELOPMENT OF UNIVERSITY CAMPUS GEOINFORMATION SYSTEM

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

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

**Аннотация.** Современный университет как объект управления представляет собой сложную территориально распределённую систему. Деятельность высшего учебного заведения многопрофильная, а управление им – комплексная задача, требующая решения организационных и технологических вопросов с учётом экономической целесообразности. Построение информационной среды управления вузом с использованием современных геоинформационных технологий позволяет объединить в единое целое распределённую информацию, обеспечить возможность пространственного анализа для выявления нагрузок, проблемных участков, обеспечения мероприятий, ведущих к повышению качества образования.

**Summary.** A modern university, as an object of management, is a complex geographically distributed system. The activity of a higher educational institution is multidisciplinary, and its management is a complex task that requires solving organizational and technological issues, taking into account economic feasibility. Building an information environment for university management using modern geoinformation technologies allows combining distributed information into a single whole, providing the possibility of spatial analysis to identify loads, problem areas, and providing measures leading to improving the quality of education.

**Ключевые слова:** геоинформационные системы, WebGL, ГИС университета.

**Key words:** geoinformation systems, WebGL, GIS of the university.

УДК 004.4:378.4

Современный университет как объект управления представляет собой сложную территориально распределённую систему. Деятельность высшего учебного заведения многопрофильная, а управление им – комплексная задача, требующая решения организационных и технологических вопросов с учётом экономической целесообразности. Для обеспечения интеграции учебных и управленческих процессов, а также для реализации универсальных способов доступа к информации необходимо создание единой информационной среды, представляющей собой комплекс математических моделей, описывающий процессы, базу результатов контроля, базу нормативных характеристик, алгоритмы оценки качества.

Построение информационной среды управления вузом с использованием современных геоинформационных технологий позволяет объединить в единое целое распределённую информацию, обеспечить возможность пространственного анализа для выявления нагрузок, проблемных участков, обеспечения мероприятий, ведущих к повышению качества образования.

Геоинформационная система (ГИС) – это автоматизированная информационная система, предназначенная для обработки пространственно-временных данных, основой интеграции которых служит географическая информация [1].

ГИС как научная концепция и её воплощение с использованием программного обеспечения основана на географическом подходе к описанию и пониманию нашего мира и объединяет множе-

ство типов данных. Она анализирует информацию на основе местоположения и организует её в тематические слои, обеспечивает её визуализацию с использованием карт и трёхмерных сцен. Благодаря этой уникальной возможности ГИС позволяет получить глубокое понимание свойств данных, выявить их пространственные закономерности, взаимоотношения, помогает лучше понять ситуацию и принимать более взвешенные решения [3].

Сотни тысяч организаций практически во всех областях используют ГИС для создания интеллектуальных карт, которые обеспечивают наглядное представление данных, выполнение продвинутого анализа, облегчают обмен информацией и помогают решать сложные проблемы.

Существуют примеры разработки вузами ГИС университета [4–6]. Чаще всего в качестве платформы выбирается коробочное решение и реализуются наполнение и настройка системы. В таком случае функционал определяется выбранной платформой и возможностью её доработки.

Типовые этапы разработки обобщённой ГИС [2] (см. рис. 1):

1. формирование основных требований к системе на словесном (вербальном) уровне без какой-либо формализации: определение источников входной информации, определение требований к формам выходных данных, составление перечня задач, которые должна решать разрабатываемая система, определение разумных ограничений;

2. определение концепции решения проблемы или задачи: выбор необходимых методов решения задач, подбор алгоритмов, выбор ГИС-оболочки;

3. детализация общей задачи создания системы, определение описаний для перехода от словесных формулировок к схемному и логически связанному описанию, разбиение целостной системы на основные составляющие части. В результате выполнения третьего этапа определяется структура ГИС;

4. алгоритмизация методов и решений задач, стоящих перед исследователями, выбор модели, технологических и математических решений, определение перечня слоёв для создания выходной электронной карты, формирование логической структуры данных;

5. оптимизация структуры на основе дополнительных исследований предметной области и специфики решаемых задач;

6. реализация системы: программирование необходимых задач, которые планируется решать в среде проектируемой ГИС (в терминах проектирования происходит переход на физический уровень);

7. модернизация созданной ГИС: учёт возможных ситуаций функционирования, возможности дальнейшего развития.

В соответствии с первым этапом разработки обобщённой ГИС сформулируем основные требования к разрабатываемой ГИС кампуса университета:

- реализация ГИС в варианте веб-ГИС;
- использование разномасштабных локаций: кампус, здание (сооружение), этаж, аудитория;
- использование трёхмерных систем координат для позиционирования и задания геометрии объектов;
- представление объектов в виде 3D-моделей с достаточной полнотой и точностью;
- представление разнородной и разноцелевой атрибутивной информации об объектах;
- реализация ролевой модели доступа;
- обеспечение возможности функционального расширения за счёт реализации базовых функций ГИС в виде движка и служебных функций в виде модулей.



Рис. 1. Этапы разработки обобщённой ГИС

Также в первом приближении перечислим желаемые сервисы:

- поиск и визуализация объектов с учётом их расположения;
- ведение учёта материально-технического оснащения;
- учёт инженерных коммуникаций;
- виртуальные экскурсии по вузу;
- размерный анализ – расчёт геометрических характеристик: длин, площадей, объёмов и т. п.;
- роутинг: построение маршрутов для различных целей (навигации, путей эвакуации и т. п.);
- прочие задачи, для решения которых необходима автоматизированная обработка как атрибутивной, так и размерной и позиционной информации.

Выше были приведены и кратко охарактеризованы лишь некоторые из сфер применения ГИС в хозяйственной деятельности вузов. Но и они наглядно свидетельствуют о том, что формирование геоинформационной среды оценки обеспечивает поддержку принятия управляющих решений, направленных на нормализацию протекания учебного процесса, обеспечение качества условий работы и общего повышения эффективности деятельности вуза.

Анализ требований показал, что проектируемая ГИС будет классифицироваться [1] по следующим критериям:

1. функциональным возможностям – полнофункциональная общего назначения;
2. архитектурному принципу построения – открытая;
3. территориальному (пространственному) охвату – локальная;
4. проблемной ориентации – инженерная, инвентаризационная;
5. способу организации пространственных данных – векторная (2D и 3D);
6. масштабу – крупномасштабная с использованием разномасштабных локаций.

В качестве исходных данных выступают план землеустройства, поэтажные планы зданий, схемы и планы коммуникаций.

В соответствии со вторым этапом разработки обобщённой ГИС дадим описание концепции решения проблемы: выбор необходимых методов решения задач, подбор алгоритмов, выбор ГИС-оболочки.

Анализ требований и выполнение классификации приводит к выбору следующих архитектурных решений и инструментария для разработки ГИС.

Одной из особенностей разрабатываемой ГИС является представление объектов в виде 3D-моделей с достаточной полнотой и точностью, использование трёхмерных систем координат для позиционирования и задания геометрии объектов. Поэтому было принято решение отказаться от использования готовых ГИС-оболочек и реализовать систему самостоятельно.

При анализе требований особое внимание было уделено реализации 3D-графики в веб-приложении. Одним из самых популярных решений в данной области является WebGL [10]. Однако прямое использование данной низкоуровневой библиотеки является неоптимальным. После изучения высокуюровневых графических библиотек, построенных над WebGL, выбор был сделан в пользу Three.js [9].

Three.js – кроссбраузерная библиотека JavaScript, используемая для создания и отображения анимированной компьютерной 3D-графики при разработке веб-приложений. Three.js работает во всех браузерах, которые поддерживают технологию WebGL.

Для реализации ГИС выбран вариант веб-приложения с трёхуровневой архитектурой. Стек программных технологий (full-stack на JavaScript): Nuxt, NestJS, TypeORM. Инфраструктурный стек (open source): PostgreSQL, Nginx, Docker.

Чтобы использовать разномасштабные локации: кампус, здание (сооружение), этаж, аудитория – выделяем масштабные уровни (см. рис. 2). Все масштабные уровни имеют как общие параметры, так и свои особенности, например, в вопросах отображения, навигации, доступа.

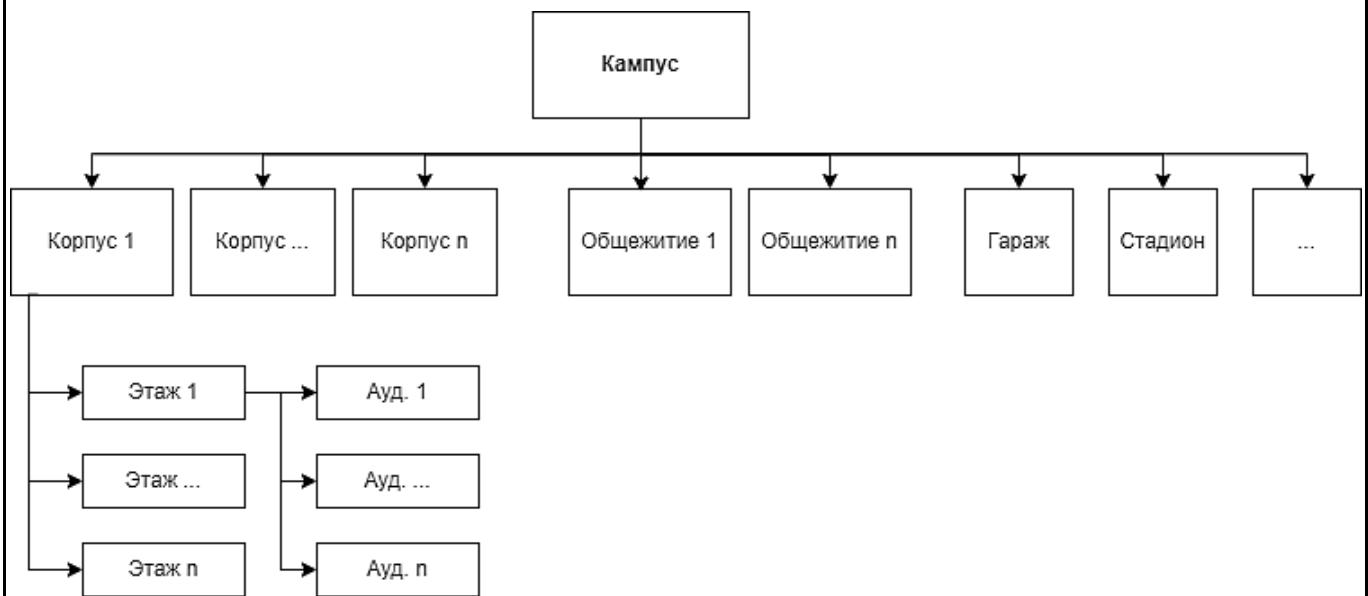


Рис. 2. Масштабные уровни ГИС

При наполнении ГИС возникает задача конвертации плоских моделей (план землеустройства, поэтажные планы зданий, схемы и планы коммуникаций), представленных в различных форматах, в трёхмерные геометрические модели ГИС с последующим формированием описательной (атрибутивной) информации. В качестве системы геометрического моделирования для подготовки моделей объектов был выбран Blender [7].



Blender – профессиональное свободное открытое программное обеспечение для создания трёхмерной компьютерной графики. В настоящее время пользуется большой популярностью в связи с его быстрым стабильным развитием и технической поддержкой.

Последовательность подготовки геометрических моделей с помощью Blender:

1. импорт исходного материала (схемы и планы);
2. настройка масштаба, положения и поворота;
3. моделирование на основе импортированных референсов;
4. подготовка текстур и материалов;
5. настройка освещения;
6. оптимизация для Three.js:
  - уменьшение количества полигонов, слияние объектов;
  - уменьшение размеров (разрешения) текстур;
  - оптимизация карт;
  - запекание текстур;
7. экспорт в формат glTF со сжатием (draco).

Выбор формата glTF обусловлен тем, что он оптимизирован для web и мобильных приложений, а авторами являются разработчики WebGL и Three.js.

Таким образом, на текущий момент в рамках проекта разработки ГИС кампуса университета были выполнены первые два этапа проектирования (анализ требований, выбор инструментария и определение общих принципов построения архитектуры системы).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кащенко, Н. А. Геоинформационные системы: учеб. пособие для вузов / Н. А. Кащенко, Е. В. Попов, А. В. Чечин; Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2012. – 130 с.
2. Королев, Ю. К. Общая геоинформатика. Вып. 1 / Ю. К. Королев. – М.: СП Дата+, 1998. – 71 с.
3. Цветков, В. Я. Геоинформационные системы и технологии / В. Я. Цветков. – М.: ФиС, 1998. – 368 с.
4. Гузаиров, М. Б. ГИС для управления хозяйственной и учебной деятельностью вуза / М. Б. Гузаиров, С. В. Павлов, О. И. Христодуло // ArcReview: сайт. – URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2005/05/13/economic-and-educational-activities-of-university> (дата обращения: 25.04.2024). – Текст: электронный.
5. ГИС в вопросах хозяйственного учёта и управления вузом // Н. И. Куракина, О. А. Иващенко, Н. В. Гавричкина, А. А. Кондрашова // ArcReview: сайт. – URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2008/10/09/gis-for-campus-administration> (дата обращения: 25.04.2024). – Текст: электронный.
6. Построение университета будущего в г. Калгари // ArcReview: сайт. – URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2015/10/03/building-a-university-of-the-future/> (дата обращения: 25.04.2024). – Текст: электронный.
7. Blender: сайт. – URL: <https://www.blender.org> (дата обращения: 25.04.2024). – Текст: электронный.
8. ESRI: сайт. – URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/home> (дата обращения: 25.04.2024). – Текст: электронный.
9. Three.js: сайт. – URL: <https://threejs.org> (дата обращения: 25.04.2024). – Текст: электронный.
10. WebGL: сайт. – URL: <https://www.khronos.org/webgl> (дата обращения: 25.04.2024). – Текст: электронный.

Петрова А. Н., Фролов Д. О.

A. N. Petrova, D. O. Frolov

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

### DEVELOPMENT OF A MODEL FOR OBJECT RANKING IN BIG DATA SYSTEMS

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

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

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

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

**Аннотация.** В данной статье предлагается новый подход к обучению векторных представлений текста с использованием многозадачной модели глубоких нейронных сетей. В отличие от существующих методов, которые часто ограничены в использовании контролируемых данных из одной задачи, подход к обучению векторных представлений текста с использованием многозадачной модели глубоких нейронных сетей позволяет использовать контролируемые данные из различных задач. Основной акцент ставится на задачи семантической классификации и поиска информации по смыслу, демонстрируя успешное интегрирование этих задач в единую модель. В статье представлены подробности архитектуры многозадачной модели и обсуждаются её преимущества в контексте улучшения производительности по сравнению с базовыми моделями. Оценка модели проводится на крупномасштабных реальных наборах данных, где для классификации запросов используется площадь под кривой ROC, а для веб-поиска – нормализованный дисконтируемый совокупный выигрыш. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и его превосходство над существующими методами в различных задачах обработки естественного языка.

**Summary.** This paper proposes a new approach for learning vector representations of text using a multi-task deep neural network model. Unlike existing methods, which are often limited in using supervised data from a single task, our approach allows the use of supervised data from different tasks. The main emphasis is placed on the tasks of semantic classification and information retrieval by meaning, demonstrating the successful integration of these tasks into a single model. The paper presents details of the multitasking model architecture and discusses its benefits in terms of performance improvements over baseline models. The model is evaluated on large-scale real-world datasets where the area under the ROC curve is used for query classification and normalized discounted cumulative gain is used for web search. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach and its superiority over existing methods in various natural language processing tasks.

**Ключевые слова:** концепция нейронных сетей для ранжирования документов, использование функции потерь по спискам, оптимизация обучающих данных на основе запросов.

**Key words:** concept of neural networks for ranking documents, using the list loss function, optimizing training data based on queries.

УДК 517.95

**Введение.** Последние прорывы в области глубоких нейронных сетей подчеркнули значимость изучения векторных представлений текста, включая слова и предложения, для различных задач обработки естественного языка. Однако существующие методы обучения таким представле-



ниям всё ещё далеки от оптимальных. Большинство предшествующих подходов базируется на неконтролируемых задачах, таких как предсказание слов в процессе обучения. Другие методы прибегают к контролируемым целям обучения для решения одной задачи, что ограничивает их доступ к объёму обучающих данных. В данной статье предлагается многозадачный подход глубоких нейронных сетей для обучения векторным представлениям с помощью контролируемых данных из различных задач. Помимо получения преимуществ от использования большего объёма обучающих данных, многозадачность также способствует регуляризации, что снижает переоснащение модели под конкретную задачу и делает изученные представления универсальными для различных задач.

Предлагается применение многозадачной глубокой нейронной сети для формирования представлений с упором на задачи семантической классификации и поиска информации по смыслу. Созданная модель обучается преобразовывать произвольные текстовые запросы и документы в семантические векторные представления в низкоуровневом скрытом пространстве. Данная модель успешно интегрирует разнообразные задачи, такие как классификация и ранжирование, в едином фреймворке. Кроме того, разработанная модель является компактной и гибкой в возможности внедрения в новые области благодаря способности изученных представлений к адаптации предметной области с использованием гораздо меньшего количества меток.

**Обучение многозадачному представлению.** Многозадачная модель сочетает в себе задачи классификации и ранжирования. Для уточнения: классификация запросов выполняется в роли задачи классификации, а веб-поиск – в качестве задачи ранжирования.

Классификация запросов представляет собой процесс, при котором модель оценивает, принадлежит ли поисковый запрос  $Q$  к определённой категории или домену. Например, если запрос  $Q$  содержит фразу «стопорное кольцо установки», классификатор должен определить отнесение к категории «Буровые установки». Точная классификация запросов важна для создания персонализированного пользовательского опыта, т. к. поисковая система может адаптировать интерфейс и результаты под конкретные интересы пользователя. Однако это представляет определённые трудности, поскольку запросы обычно короткие. Поверхностные признаки слов, которые могут быть полезны в традиционных задачах классификации документов, зачастую недостаточно информативны для классификации запросов. В этой статье запросы классифицируются по четырём интересующим областям: «Буровые установки», «Нефтедобывающие установки», «Перерабатывающие установки» и «Промышленные установки». Один запрос может относиться к нескольким категориям, поэтому для выполнения классификации создаётся набор двоичных классификаторов, по одному для каждого домена. Проблема формулируется как 4 задачи двоичной классификации. Таким образом, для области  $C_t$  целью является бинарная классификация на основе  $P(C_t | Q)$  ( $C_t = \{0,1\}$ ). Для каждого домена  $t$  предполагаются контролируемые данные ( $Q, y_t = \{0,1\}$ ) с  $y_t$  в качестве двоичных меток.

Веб-поиск: учитывая поисковый запрос  $Q$  и список документов  $L$ , модель ранжирует документы в порядке релевантности. Например, если запрос  $Q$  – «прибор для промывки золота», модель возвращает список документов, удовлетворяющих такую информационную потребность. Формально оценивается  $P(D_1|Q), P(D_2|Q), \dots$  для каждого документа  $D_n$  и ранжируется в соответствии с этими вероятностями. Предполагается, что контролируемые данные существуют, т. е. для каждого запроса  $Q$  существует хотя бы один релевантный документ  $D_n$ .

**Многозадачная модель глубоких нейронных сетей.** Предлагаемая нами модель преобразует любые произвольные запросы  $Q$  или документы  $D$  в набор фиксированных векторных представлений малой размерности с помощью глубоких нейронных сетей. Эти векторы затем могут быть использованы для классификации запросов или веб-поиска. В отличие от существующих методов обучения представлений, которые либо используют неконтролируемые цели, либо ориентированы на одну задачу, модель изучает эти представления, используя многозадачные цели.

Архитектура многозадачной модели глубоких нейронных сетей показана на рис. 1. Нижние уровни применяются к разным задачам, в то время как верхние уровни генерируют выходные данные для конкретных задач. Важно отметить, что входные данные  $X$  (запрос или документ), изна-

чально представленные как набор слов, сопоставляются с вектором ( $l_2$ ) размером 300. Это общее семантическое представление, которое обучается с помощью многозадачных целей.

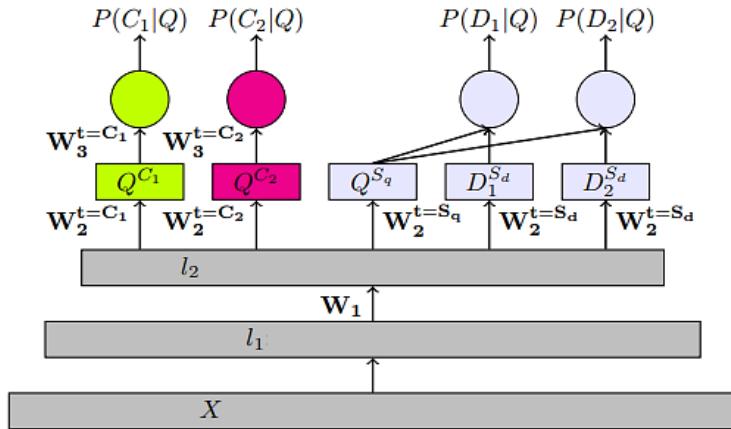


Рис. 1. Архитектура многозадачной модели глубоких нейронных сетей

**Подробный разбор модели.** В традиционном подходе каждое слово представляется вектором одного горячего слова, где размерность вектора соответствует размеру словаря. Однако из-за обширного словарного запаса в реальных задачах обучение таких моделей требует значительных временных затрат. Для решения этой проблемы применяется метод хеширования слов, который отображает вектор одного горячего слова с высокой размерностью в ограниченное буквенно-триграммное пространство. Например, слово «*SAP*» хешируется как набор букв триграмм {#-*A*-*P*, *S*-*A*-*P*, *A*-*P*-#}, где # – граничный символ. Хеширование слов дополняет простое векторное представление в двух аспектах:

1. слова, отсутствующие в словаре, могут быть представлены буквенно-триграммными векторами;
2. различные варианты написания одного и того же слова могут быть сопоставлены с близкими друг к другу точками в буквенно-триграммном пространстве.

Уровень семантического представления ( $l_2$ ). Это общее представление, полученное при выполнении различных задач. Этот слой отображает входные буквы-триграммы в 300-мерный вектор с помощью

$$l_2 = f(W_1 * l_1),$$

где  $f(*)$  – нелинейная активация  $f(z) = \frac{1-e^{-2z}}{1+e^{-2z}}$ . Эта матрица  $W_1$  размером 50 кБ на 300 отвечает за генерацию семантического представления перекрёстных задач для произвольных текстовых входных данных (например,  $Q$  или  $D$ ).

Представление для конкретной задачи ( $l_3$ ). Для задачи нелинейное преобразование отображает семантическое представление измерения  $l_2$  в представление измерения для конкретной задачи с помощью

$$l_3 = f(W_2^t * l_2),$$

где  $t$  обозначает различные задачи (классификация запросов или веб-поиск).

**Наборы данных и метрики оценки.** Используются крупномасштабные реальные наборы данных для оценки. Статистические данные представлены в табл. 1. В тестовых данных для веб-поиска содержится 11 000 запросов на русском языке. Каждая пара запрос-документ имеет метку релевантности, которая была вручную аннотирована по пятиуровневой шкале: плохая, удовлетворительная, хорошая, отличная и идеальная. Оценочным показателем для классификации запросов



является площадь под кривой ROC. Для веб-поиска используется нормализованный дисконтированный совокупный выигрыш.

Таблица 1

#### Статистические данные

Задача	Классификация запросов				Веб-поиск
	Буровые установки	Нефтедобывающие установки	Перерабатывающие установки	Промышленные установки	
Обучение	1.601K	2.201K	2.004K	1.315K	4500 тыс. запросов и переходов по кликам documents
Тест	3.102	6.421	6.240	325	13 051 запрос / 925 600 документов

**Результаты точности.** Сначала проводится оценка модели на существенное улучшение производительности, которое измеряется точностью при решении нескольких задач.

В табл. 2 приведены совокупные оценки для классификации запросов при сравнении различных классификаторов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемая многозадачная глубокая нейронная сеть превосходит другие системы.

Таблица 2

#### Результаты AUC классификации запросов

Система	Классификация запросов			
	Буровые установки	Нефтедобывающие установки	Перерабатывающие установки	Промышленные установки
Модель SVM с функциями слова в форме униграмммы, биграммы и триграмммы	91.87	81.25	81.15	92.45
Модель SVM с функциями буквенной триграмммы	91.54	70.04	85.24	87.53
Однозадачная глубокая нейронная сеть	96.53	76.81	92.24	93.57
Многозадачная глубокая нейронная сеть	<b>98.25</b>	<b>87.53</b>	<b>97.14</b>	<b>97.15</b>

**Заключение.** В заключение можно подчеркнуть значимость предложенного многозадачного подхода глубоких нейронных сетей для обучения векторным представлениям текста. Этот подход демонстрирует превосходство по сравнению с существующими методами, основанными либо на неконтролируемых задачах, либо на однозадачном контролируемом обучении. Основные преимущества многозадачного подхода заключаются в улучшении производительности модели, её способности адаптироваться к различным задачам и регуляризации для снижения переоснащения.

Многозадачная модель, представленная в статье, успешно интегрирует задачи семантической классификации и поиска информации по смыслу, обеспечивая компактность и гибкость в возможности внедрения в новые области. Результаты оценки модели подтверждают её превосходство над другими системами в задаче классификации запросов, а также показывают её высокую производительность при выполнении различных задач.

Таким образом, многозадачный подход глубоких нейронных сетей представляет собой перспективное направление для дальнейших исследований в области обработки естественного языка, обеспечивая эффективное решение сложных задач информационного поиска и классификации текста.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. (2008). Introduction to Information Retrieval. Cambridge University Press.
2. Burges, C., Shaked, T., Renshaw, E., Lazier, A., Deeds, M., Hamilton, N., & Hullender, G. (2005). Learning to rank using gradient descent. In Proceedings of the 22nd International Conference on Machine Learning (ICML) (p. 89-96).
3. Joachims, T. (2002). Optimizing search engines using clickthrough data. In Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (p. 133-142).
4. Li, H., & Lin, J. (2010). A short introduction to learning to rank. IEICE Transactions on Information and Systems, 94(10), 1854-1862.
5. Zhai, C., & Massung, S. (2016). Text Data Management and Analysis: A Practical Introduction to Information Retrieval and Text Mining. Association for Computing Machinery (ACM) Books.
6. Liu, T. Y. (2009). Learning to rank for information retrieval. Foundations and Trends® in Information Retrieval, 3(3), 225-331.
7. Craswell, N., Szummer, M., & Zoeter, O. (2008). An experimental comparison of click position-bias models. In Proceedings of the 17th ACM Conference on Information and Knowledge Management (p. 87-94).
8. Burges, C., Ragno, R., & Le, Q.V. (2007). Learning to rank with nonsmooth cost functions. In Advances in Neural Information Processing Systems (p. 193-200).
9. Zhang, Y., Tay, Y., & Rong, J. (2014). Learning to rank for question retrieval over large-scale Question and Answer archives. In Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Conference on Information and Knowledge Management (p. 1419-1428).
10. Chapelle, O., Metlzer, D., Zhang, Y., & Grinspan, P. (2009). Expected reciprocal rank for graded relevance. In Proceedings of the 18th ACM Conference on Information and Knowledge Management (p. 621-630).



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

## РАЗРАБОТКА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СКВОЗНОГО ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ

### DEVELOPMENT OF NEURAL NETWORKS FOR END-TO-END TRAINING OF INFORMATION RETRIEVAL MODELS

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

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

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

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

**Аннотация.** Нейронные сети для сквозного обучения моделей поиска информации довольно часто применяются в крупных компаниях. Эти сети отличаются различными аспектами, включая архитектуру, данные обучения, представления данных и функции потерь. Однако при обучении сквозных моделей нейронного ранжирования без функций, созданных человеком, используются только точечные и парные функции потерь. Эти функции потерь не учитывают ранги документов при оценке потерь обучающих данных. В результате традиционные модели обучения ранжированию, использующие функции точечных или парных потерь, обычно показывают более низкую производительность по сравнению с моделями, использующими функции списочных потерь. Исходя из этого наблюдения предлагается использовать функции потерь по спискам для обучения моделей нейронного ранжирования. Разработано несколько нейронных сетей для сквозного обучения моделей поиска информации. В результате выполнения работы было доказано, что списочный нейронный ранжировщик превосходит модель парного нейронного ранжирования. Кроме того, были достигнуты улучшения производительности списочных моделей нейронного ранжирования за счёт выборки обучающих данных на основе запросов.

**Summary.** Neural networks for end-to-end learning of information retrieval models are quite common in large companies. These networks differ in various aspects including architecture, training data, data representations, and loss functions. However, when training end-to-end neural ranking models without human-generated features, only point and pairwise loss functions are used. These loss functions do not consider document ranks when estimating the loss of training data. As a result, traditional ranking learning models using point or pairwise loss functions usually show poorer performance compared to models using list loss functions. Based on this observation, it is proposed to use list loss functions to train neural ranking models. Several neural networks have been developed for end-to-end training of information retrieval models. Because of the work, it was proved that the list-based neural ranker outperforms the pairwise neural ranking model. In addition, performance improvements of list-based neural ranking models were achieved by query-based training data sampling.

**Ключевые слова:** концепция нейронных сетей для ранжирования документов, использование функции потерь по спискам, оптимизация обучающих данных на основе запросов.

**Key words:** concept of neural networks for ranking documents, using the list loss function, optimizing training data based on queries.

УДК 517.95

**Введение.** Модели нейронных сетей широко применяются в различных областях, включая поиск информации, благодаря их способности автоматически обучать функции на разных уровнях абстракции. Отличительной особенностью глубоких нейронных сетей является возможность со-

здания собственных функций или представлений данных без необходимости вручную определять их, как это делается в традиционных моделях ранжирования. Одной из основных концепций при использовании нейронных сетей является представление запросов и документов на основе различных признаков, а затем обучение алгоритмов на этих представлениях, например с помощью методов градиентного спуска и списочного перехода. В отличие от традиционных моделей обучения ранжированию, которые работают с необработанными данными, такими как текст, нейронные модели ранжирования используют созданные представления текста для обучения. Например, алгоритм списочного подхода может использовать нейронную сеть для обучения функции ранжирования, но при этом считается традиционным алгоритмом ранжирования из-за использования предварительно созданных представлений запросов и документов.

Параметры моделей обучения ранжированию настраиваются в соответствии с выбранной функцией потерь. Далее эти модели обычно классифицируются как точечные, парные и списочные подходы в зависимости от применяемых функций потерь. В то время как модели точечного и парного обучения рассматривают проблему ранжирования как задачу классификации, списочный подход к обучению ранжированию анализирует модель ранжирования более естественным образом. В результате традиционные алгоритмы обучения ранжированию, использующие списочные функции потерь, продемонстрировали более высокую эффективность по сравнению с точечными и парными алгоритмами на большинстве наборов данных, особенно на документах с высоким рейтингом. Это обусловлено в основном тем, что функции потерь точечных и парных алгоритмов не учитывают порядок документов в окончательных ранжированных списках и, следовательно, не соответствуют типичным метрикам оценки информационного поиска.

Хотя традиционные модели обучения ранжированию с использованием списочных функций потерь показали многообещающие результаты, ни одна из существующих нейронных моделей ранжирования, обучаемых полностью на входных данных без использования предварительно разработанных функций, не использует списочную функцию потерь для обучения. Поэтому в ходе данной работы исследуется потенциал использования списочных функций потерь для обучения дискриминационных моделей нейронного ранжирования. Конкретно рассматривается модель сопоставления с глубокой релевантностью, которая использует комбинацию попарной шарнирной потери и списочной функции потерь для определения возможных различий между изученными моделями ранжирования.

Несмотря на то что списочные функции потерь соответствуют сущности проблемы ранжирования, обучение нейронных моделей ранжирования с использованием таких функций является более сложным процессом. При наличии набора размеченных данных алгоритмы точечного или парного обучения могут иметь больше обучающих примеров по сравнению с алгоритмами, использующими списочные функции. Однако нейронные сети требуют обучения на достаточно больших объемах данных. Для решения этой проблемы предлагается случайная выборка документов, связанных с каждым запросом, перед каждой эпохой обучения. Оценка показывает, что перетасовка и выборка улучшают производительность списочного нейронного ранжирования по двум причинам: во-первых, создаётся немного изменённый набор обучающих примеров для каждой эпохи обучения, что помогает сети избежать запоминания обучающих данных; во-вторых, обеспечивается более плоский минимум функции потерь, что способствует лучшему обобщению обученной модели на тестовых данных.

**Нейронная модель ранжирования. Сетевая архитектура.** Использовалась модель глубокого соответствия релевантности (DRMM) для специфического поиска документов, направленного на оценку их релевантности. Эта модель работает путём создания гистограмм точного и семантического соответствия между запросом и документом фиксированного размера, которые затем подаются на вход нейронной сети. Далее используется предсказание для нелинейного сопоставления между терминами запроса и документа. В завершение для оценки каждого документа применяется сеть-шлюз, которая определяет важность каждого термина запроса. Обучение сети проводится с использованием функции попарных потерь:



$$L(q, d^+, d^-; \theta) = \max(0, 1 - s(q, d^+) + s(q, d^-)),$$

где  $d^+$  и  $d^-$  являются документами, релевантными и нерелевантными запросу  $q$  соответственно, а  $\theta$  указывает параметры модели.

**Функция потерь по спискам.** Была использована функция потерь в рамках метода списочного подхода для обучения модели нейронного ранжирования. Эта функция потерь опирается на вероятностное распределение для списка оценённых документов, что указывает на вероятность различных позиций документов в рейтинге. Распределение вероятностей может быть оценено с помощью перестановок:

$$p(d_j) = \frac{\exp(s(q, d_j))}{\sum_{k=1}^n \exp(s(q, d_k))},$$

где из-за вычислительной сложности перестановочных вероятностей мы используем вероятности топ-1, следуя первоначальной модели и её последующему применению.

Истинное распределение вероятностей  $y^{(i)}$  оценивается с использованием человеческих суждений о релевантности. Затем перекрёстная энтропия используется для измерения расстояния между двумя распределениями вероятностей, которое оценивается на основе прогнозируемых оценок для документов ( $z^{(i)}$ ) и на основе суждений о релевантности как

$$L(y^{(i)}, z^{(i)}; \theta) = - \sum_{j=1}^n p_{y^{(i)}}(d_j) \log p_{z^{(i)}}(d_j).$$

**Образцы обучения.** При равном объёме размеченных данных алгоритмы обучения ранжированию с точечными или парными функциями потерь имеют больше обучающих примеров, чем алгоритмы с использованием списочных функций потерь. Это обусловлено тем, что каждый документ или каждая пара документов могут быть использованы как обучающий пример в первом случае, в то время как во втором каждый запрос является единственным обучающим примером. Однако для успешного обучения нейронных сетей требуется большой объём данных. Для компенсации ограниченного объёма обучающих данных для моделей списочного нейронного ранжирования мы предлагаем случайную выборку документов для каждого запроса перед каждой новой эпохой обучения. Этот подход не увеличивает количество обучающих примеров, но обновляет сеть новыми данными, что помогает избежать запоминания данных. Использование различных данных способствует более эффективному обучению модели ранжирования, предотвращая переобучение. Глубокие нейронные сети могут быстро запоминать обучающие данные, поэтому избегание этого помогает улучшить качество обученной модели.

**Эксперимент.** Для проведения экспериментов используются два набора данных:

1. набор данных Robust04, содержащий более 600 тысяч информационных материалов, использованных в TREC Robust Track 2004, и включающий 400 тем;
2. набор данных ClueWeb09 Category B, который включает более 60 миллионов информационных страниц и применялся в TRECWeb.

Используются названия тем в качестве запросов. Для каждого запроса извлекаются первые 1950 документов в качестве обучающих данных или документов-кандидатов, которые будут повторно ранжированы обученными моделями во время вывода. В экспериментах применяется модель правдоподобия запроса с параметрами по умолчанию для получения исходных документов. Слова формируются с использованием стеммера. Доступные помеченные данные разделяются на обучающие, проверочные и тестовые наборы случайным образом на 40, 30 и 30 % соответственно. Результаты тестовых наборов затем оцениваются с помощью средней точности среднего значения MAP, точности верхних  $k$  документов P@k и нормализованного дисконтируемого совокупного выигрыша, рассчитанного для первых  $k$  документов nDCG@k, где  $k$  равно 1, 3, 5 и 10. Статистически значимые тесты выполняются с использованием двустороннего парного t-критерия на уровне значимости 0,05.

Экспериментальная настройка проводится с использованием публичной реализации модели DRMM. Входные данные для сети формируются с использованием предварительно обученных вложений слов размером 300 из глобального векторного представления слов. В экспериментах параметры модели оптимизируются с помощью оптимизатора AdaDelta и алгоритма обратного распространения ошибки для вычисления градиентов. Все гиперпараметры модели подбираются в наборе проверки. Для каждой модели количество скрытых слоёв и их размеры выбираются из диапазонов {2,3} и {50,100,150,200} соответственно. Начальная скорость обучения выбирается из множества {0.2,0.4,0.6,0.8,1}.

Для использования функции потерь по списку мы проводим перетасовку запросов и связанных с ними документов в обучающих данных перед каждой эпохой обучения. Затем случайным образом выбирается  $x$  из 2000 доступных документов для каждого запроса, где  $x$  выбирается из {500, 1000, 1500}, чтобы получить обучающие данные. Для тестовых запросов все 1950 документов используются для ранжирования, поэтому выборка во время вывода не выполняется.

Сравниваются три модели нейронного ранжирования:

1. DRMMpl – это исходная модель DRMM, которая использует функцию парных потерь;
2. DRMM11 – это модель DRMM, обученная с использованием функции списочных потерь в уравнении;
3. DRMM11-WS – это модель DRMM, обученная с использованием функции списочных потерь, но без случайной выборки документов.

Поскольку цель не заключается в достижении максимальной производительности с использованием списочных функций потерь, обучение модели DRMM с использованием функций потерь традиционных алгоритмов LambdaMart или LambdaRank остаётся без изменений, как показано на рис. 1.

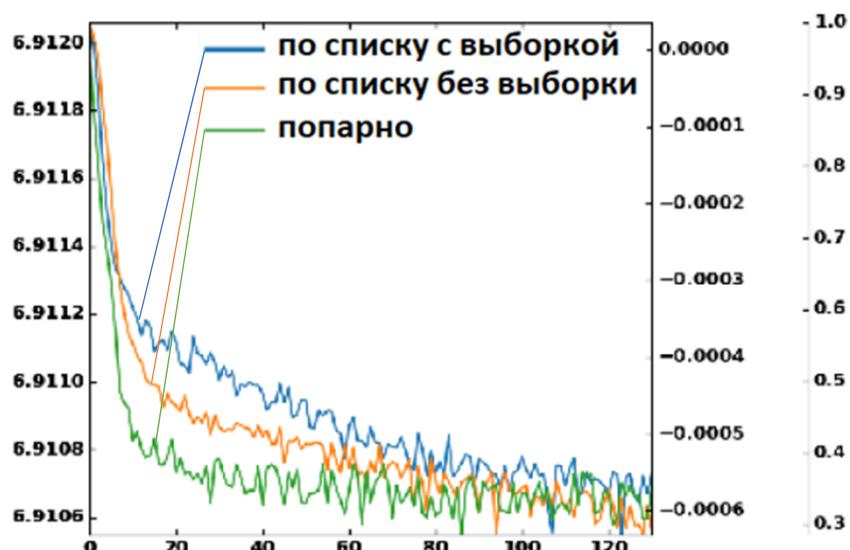


Рис. 1. Обучение модели DRMM

**Заключение.** Продемонстрировано, как использование функций списочных потерь способствует улучшению производительности поиска в моделях нейронного ранжирования. Более подробно было исследовано, как обучение модели сопоставления с глубокой релевантностью, представляющей собой парную модель с использованием списочной функции потерь, влияет на производительность поиска. Было выявлено, что перетасовка и случайная выборка документов, связанных с каждым запросом, перед каждой эпохой обучения приводят к улучшению производительности поиска. В дальнейшем исследований могут быть рассмотрены различные подходы к выборке, т. к. было показано, что эта стратегия способствует повышению эффективности поиска. Важным



направлением для будущей работы является изучение влияния других функций списочных потерь на производительность моделей нейронного ранжирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nazarov, S. V. Architecture and design of software systems: monograph / S. V. Nazarov. – 2nd ed., revised. – M.: INFRA-M, 2018. – 374 p. // ZNANIUM.COM: electronic library system. – Access mode: <http://znanium.eom/catalog.php#>, restricted. – Zagl. from the screen.
2. Huang, P. S., He, X., Gao, J., Deng, L., Acero, A., & Heck, L. (2013). Learning deep structured semantic models for web search using clickthrough data. In Proceedings of the 22nd ACM international conference on Conference on information & knowledge management (p. 2333-2338).
3. Shen, Y., He, X., Gao, J., Deng, L., & Mesnil, G. (2014). Learning semantic representations using convolutional neural networks for web search. In Proceedings of the 23rd International Conference on World Wide Web (p. 373-374).
4. Grbovic, M., Djuric, N., Radosavljevic, V., Silvestri, F., & Bhamidipati, N. (2018). Context-aware event recommendation in event-based social networks. In Proceedings of the 41st International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval (p. 235-244).
5. Luong, M. T., Pham, H., & Manning, C. D. (2015). Effective approaches to attention-based neural machine translation. In Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (p. 1412-1421).
6. Dai, Z., Yang, Z., Yang, F., Cohen, W. W., Carbonell, J., Le, Q. V., & Salakhutdinov, R. (2019). Transformer-XL: Attentive language models beyond a fixed-length context. arXiv preprint arXiv:1901.02860.
7. Guo, J., Fan, Y., Ai, Q., Croft, W. B., & Yates, A. (2016). A deep relevance matching model for ad-hoc retrieval. In Proceedings of the 25th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (p. 55-64).
8. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. In Advances in neural information processing systems (p. 5998-6008).
9. Guo, J., Fan, Y., Ji, X., & Croft, W. B. (2017). A deep relevance ranking approach for ad-hoc retrieval. In Proceedings of the 26th International Conference on World Wide Web (p. 551-560).

**Фролов А. В., Савин А. Е., Нестерова Н. С., Жданова С. М.**

УПРАВЛЕНИЕ ДРАЙВЕРОМ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ДЕЛИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ  
С ПЕРЕМЕННЫМ ДРОБНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДЕЛЕНИЯ

**Фролов А. В., Савин А. Е., Нестерова Н. С., Жданова С. М.**  
**A. V. Frolov, A. E. Savin, N. S. Nesterova, S. M. Zhdanova**

## **УПРАВЛЕНИЕ ДРАЙВЕРОМ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ДЕЛИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ПЕРЕМЕННЫМ ДРОБНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДЕЛЕНИЯ**

### **STEPPER MOTOR DRIVER CONTROL USING A DIGITAL FREQUENCY DIVIDER WITH VARIABLE FRACTIONAL DIVISION RATIO**

**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 Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

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

**Artur E. Savin** – Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: peit@knastu.ru.

**Нестерова Наталья Станиславовна** – доктор технических наук, доцент кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).

**Natalia S. Nesterova** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Surveying and Design of Railways and Highways Department, Far Eastern State University of Railway Transport (Russia, Khabarovsk).

**Жданова Светлана Мирзахановна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).

**Svetlana M. Zhdanova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Construction Department, Far Eastern State University of Railway Engineering (Russia, Khabarovsk).

**Аннотация.** Предложено использование алгоритма сигма-дельта модулятора для реализации делителя частоты с переменным дробным коэффициентом деления. Проведён анализ зависимости характеристик выходных сигналов от коэффициента деления сигма-дельта модулятора. Предложено использование полученных результатов для управления драйверами шаговых электродвигателей с переменной частотой вращения с помощью промышленных логических контроллеров с большим временем программного цикла.

**Summary.** The use of sigma-delta modulator algorithm for realization of frequency divider with variable fractional division factor is proposed. The dependence of the output signal characteristics on the division factor of the sigma-delta modulator is analyzed. The use of the obtained results for control of stepper motor drivers with variable speed by means of industrial logic controllers with a long program cycle time is proposed.

**Ключевые слова:** делитель частоты, дробный коэффициент деления, переменный коэффициент деления, сигма-дельта модулятор, алгоритм, шаговый электродвигатель, программируемый логический контроллер.

**Key words:** frequency divider, fractional division ratio, variable division ratio, sigma-delta modulator, algorithm, stepper motor, programmable logic controller.

*Исследования проводились в рамках гранта № ВН001/2023 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки в защитных газах».*

УДК 621.3.076.7

**Введение.** В настоящее время шаговые электродвигатели (ШД) значительно вытеснили сервоприводы постоянного и переменного тока в исполнительных устройствах автоматики малой и средней мощности. Управление ШД осуществляется с помощью драйвера ШД от дискретных систем управления. Для получения заданной частоты вращения вала шагового электродвигателя необходимо на драйвер ШД подавать импульсы с заданной частотой. Так как частота вращения вала ШД должна изменяться с заданной, как правило, малой дискретностью, то необходимо также менять частоту импульсов управления с малой дискретностью [13; 15].

Современные синтезаторы частот обычно используют принцип деления частоты опорного генератора на заданный коэффициент. Поэтому задача получения импульсной последовательности с заданной частотой сводится к задаче разработки цифрового регулируемого делителя частоты. Для деления частоты на целое число традиционно применяются счётчики с заданным коэффициентом счёта [7; 11]. Для получения синтезатора частот с регулируемой частотой применяются делители частоты с переменным коэффициентом деления. Традиционные делители частоты [1–3] используют счётчики с регулируемым коэффициентом счёта. Но коэффициент счёта счётчика – это целое положительное число. Поэтому на выходе такого делителя можно получить набор дискретных частот из следующего ряда:  $f_{out} = \frac{f_t}{N}$ ,  $f' = \frac{f_{out}}{f_t} = \frac{1}{N}$ , где  $f_{out}$  – выходная частота делителя, Гц;  $f_t$  – тактовая частота опорного генератора, Гц;  $f'$  – относительная выходная частота генератора, Гц;  $N$  – коэффициент деления, при этом  $N$  – натуральное число (см. рис. 1).

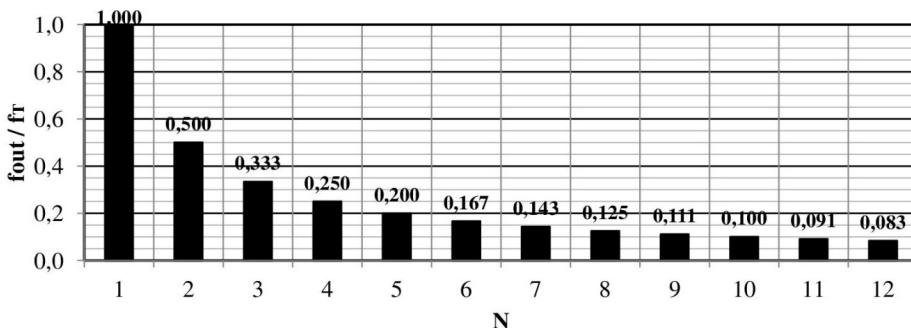


Рис. 1. Зависимость частоты выходных сигналов делителя частот от коэффициента деления

Видно, что применение такого подхода возможно лишь при больших коэффициентах, иначе дискретность выходных частот получается слишком большой. Установить, например,  $f_t > f_{out} > 0,5f_t$  в принципе не представляется возможным. Более того, дискретность выходных частот будет описываться формулой вида  $\Delta f_{out} = f_t \left( \frac{1}{N} - \frac{1}{N+1} \right)$ ,  $\Delta f' = \frac{\Delta f_{out}}{f_t} = \left( \frac{1}{N(N+1)} \right)$ . Относительная дискретность выходных частот  $\delta = \frac{\Delta f'}{f'} = \frac{1}{N+1}$ . Из приведённых формул видно, что шаг сетки частот синтезатора в принципе не может быть равномерным. Более того, для получения хоть сколько-нибудь приемлемого шага частот частота тактовых импульсов должна быть значительно выше максимальной частоты выходных сигналов. Например, для получения шага частот синтезатора, равного  $\delta = 1\%$  от максимальной выходной частоты, необходимо применять делители с коэффициентом деления не менее  $N = \frac{1}{\delta} - 1 = 99$ . А это означает, что частота опорного генератора должна быть минимум в 99 раз выше максимальной частоты выходных сигналов.

Применительно к задаче управления шаговым двигателем от промышленного логического контроллера (ПЛК) описанный подход практически неприменим, т. к. длительность цикла ПЛК составляет порядка 1 мс [10; 18]. Это означает, что ПЛК может менять состояние своих выходов не более чем 1000 раз в секунду, что соответствует максимальной частоте сигналов 500 Гц. Если

частота опорного генератора, определяемая длительностью цикла, равна 500 Гц, то для реализации программного делителя частоты с шагом изменения частоты 1 % максимальная частота выходных сигналов будет составлять порядка 5 Гц. Учитывая, что дискретность вращения большинства ШД составляет 200 имп./об, то максимальная скорость вращения вала ШД будет составлять порядка 1,5 об/мин, что на практике применяется крайне редко.

Для повышения частоты выходных сигналов синтезатора частот можно применить цифровой делитель частоты с дробным коэффициентом деления. Существующие решения данной задачи, как правило, аппаратные [5; 6]. Эти решения подразумевают применение дополнительных функциональных устройств – ждущего мультивибратора с регулируемой длительностью импульса, схемы с фазовой автоподстройкой частоты и т. д. Но эти решения также неприменимы для систем с использованием ПЛК, т. к. требуют применения дополнительных функциональных блоков с аналоговыми элементами и сложности цифрового управления коэффициентом деления.

Представляет интерес алгоритм деления частоты на 1,5 и 2,5 [12], который использует как передний, так и задний фронты входного сигнала для формирования выходных сигналов. При этом получаются импульсы с неизменной скважностью (равной 3 и 2,5) и неизменной длительностью (равной 1 и 2 длительностям входного сигнала). Но данный алгоритм не позволяет реализовать произвольный коэффициент деления, кроме того, длительности выходных сигналов зависят от выбранного коэффициента деления.

Заслуживают внимания схемы делителей частоты с дробным коэффициентом деления [7; 17; 22], использующие следующий алгоритм. Частота входного сигнала сначала делится на заданный целый коэффициент деления  $N$  в течение некоторого периода деления, после чего частота входного сигнала делится на коэффициент деления  $N+1$  в течение остального времени. Но данный алгоритм приводит к «скачку» частоты при переключении коэффициента деления и, как следствие, к присутствию в спектре выходного сигнала минимум двух гармоник с большой амплитудой. Также во время переключения делителей может возникнуть эффект потери импульса (при наложении импульса одного делителя на импульс второго делителя). Кроме того, схема дробного делителя частоты достаточно сложна – она содержит два делителя с переменными коэффициентами деления и схему выбора этих коэффициентов деления и переключения между ними.

Для улучшения характеристик дробного делителя частоты, упрощения его функциональной схемы или алгоритма работы при программной реализации в статье приводятся результаты исследования работы сигма-дельта модулятора первого порядка [9; 14; 16; 19–21] в качестве программного делителя частоты для управления драйвером шагового двигателя непосредственно от ПЛК с большой длительностью цикла.

**Методика эксперимента.** Алгоритм сигма-дельта модулятора (СДМ) (см. рис. 2) был выполнен программно. Модулятор выполняет умножение частоты входных сигналов ( $C$ ) на дробный коэффициент  $k = \frac{f_{U_{out}}}{f_C} = \frac{U_{in}}{U_0}$ , где  $U_0 > 0$ ;  $U_{in} \geq 0$ . Для упрощения реализации исследуемого алгоритма  $U_0$  и  $U_{in}$  выбирались целыми числами (в этом случае все вычисления целочисленные, что повышает скорость работы алгоритма), хотя исследуемый алгоритм способен работать и при дробных значениях указанных величин.

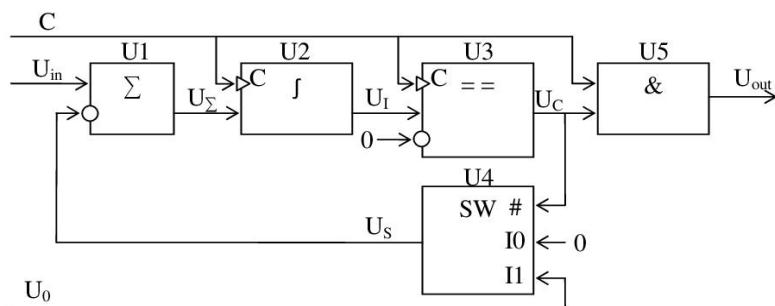


Рис. 2. Функциональная схема сигма-дельта модулятора



Интегратор U2 и компаратор U3 выполнены синхронными и синхронизируются передним фронтом входного сигнала «C». Передний фронт синхросигнала рассчитывается следующим образом:

$$C_{f,i} = \begin{cases} 1, & C_i > C_{i-1} \\ 0, & C_i \leq C_{i-1} \end{cases}$$

Выходной сигнал интегратора U2

$$U_{I,i} = \begin{cases} U_{I,i-1}, & C_{f,i} = 0 \\ U_{I,i-1} + U_{\Sigma,i}, & C_{f,i} = 1 \end{cases}$$

Выходной сигнал компаратора U3

$$U_{C,i} = \begin{cases} U_{C,i-1}, & C_{f,i} = 0 \\ 0, & C_{f,i} = 1 \cap U_{I,i} \leq 0 \\ 1, & C_{f,i} = 1 \cap U_{I,i} > 0 \end{cases}$$

Выходной сигнал коммутатора (однобитного цифро-аналогового преобразователя) U4

$$U_{S,i} = \begin{cases} U_0, & U_{C,i} = 1 \\ 0, & U_{C,i} = 0 \end{cases}$$

Выходной сигнал сумматора U1 вычисляется по формуле

$$U_{\Sigma,i} = U_{in} - U_{S,i-1} = \begin{cases} U_{in} - U_0, & U_{C,i-1} = 1 \\ U_{in}, & U_{C,i-1} = 0 \end{cases}$$

Драйвер шагового двигателя управляет фронтом сигнала управления, а не его уровнем, поэтому выходные импульсы модулятора должны быть минимальной длительности и обязательно разделены паузами. Для получения выходного сигнала минимальной длительности, равной длительности импульса входного сигнала, выходной сигнал генерируется только при наличии сигнала высокого уровня на входе «C», это реализуется с помощью схемы логического «И» U5. То есть этот логический элемент исполняет роль коммутатора, который либо пропускает импульсы опорного генератора, либо нет. Выходной сигнал модулятора

$$U_{out,i} = C_i \cdot U_{C,i}.$$

Для численного анализа выходных сигналов СДМ применительно к задаче управления скоростью вращения вала ШД [4; 8] применялся дискретный спектральный анализ с помощью дискретного преобразования Фурье. Дискретное преобразование Фурье выполнялось по формулам

$$\begin{aligned} U_k &= \sqrt{A_k^2 + B_k^2}; \\ A_k &= \sum_{n=0}^{N-1} U_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right); \\ B_k &= \sum_{n=0}^{N-1} U_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right); \\ k &= 0, \dots, N-1, \end{aligned}$$

где  $U_k$  – амплитуда  $k$ -й гармоники;  $N$  – количество значений выходных сигналов СДМ за период;  $U_n$  – мгновенное дискретное значение сигнала.

Для оценки пульсаций частоты вращения вала ШД рассчитывался коэффициент нелинейных искажений (THD):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{N-1} U_k^2}}{U_1}.$$

В работе также использовался автокорреляционный анализ выходных сигналов СДМ. Автокорреляционная функция вычислялась по формуле

$$B_u(n) = \sum_{i=0}^{N-1} U_{out,i} U_{out,i-n}.$$

**Результаты исследований и их анализ.** Диаграммы выходных сигналов СДМ для различных коэффициентов деления представлены на рис. 3. Анализ рисунка показывает, что исследуемый алгоритм деления формирует на выходы  $U_{in}$  сигналов из  $U_0$  входных сигналов. При этом распределение импульсов и пауз за период выходного сигнала достаточно равномерное, а при делении на целый коэффициент распределение импульсов и пауз равномерное. Также видно, что если коэффициент умножения СДМ  $k = \frac{U_{in}}{U_0}$  представляет собой несократимую дробь,  $U_0$  и  $U_{in}$  – натуральные числа, то период выходного сигнала равен  $N = U_0$ .

Считая, что угол поворота оси ШД за один шаг равен  $1,8^\circ$ , построим диаграммы изменения угла ШД при разных значениях коэффициента деления (см. рис. 4). Диаграммы показывают, что за время периода изменения угла поворота оси ШД происходит дискретно, но достаточно равномерно – отсутствуют явно выраженные «скачки» скорости вращения за исключением скачков скорости из-за дискретного характера вращения вала.

Графики автокорреляционных функций (АКФ) выходных сигналов СДМ при разных значениях коэффициента деления частоты показаны на рис. 5. Из графиков следует, что период выходных импульсов модулятора равен  $N = U_0$  при условии, что коэффициент деления представлен в виде неделимой дроби.

Из представленных данных видно, что если  $U_{in} = 1$  и  $U_0$  – натуральное число, период и скважность выходного сигнала СДМ неизменны. Иными словами, выходные импульсы СДМ чередуются одинаковыми паузами. Что означает постоянную (хотя и дискретную) скорость вращения вала ШД, т. е. вращение вала без ускорений и замедлений. На рис. 3 описанная особенность видна «невооружённым» глазом, а на рис. 5 этот факт приводит к наличию в графике АКФ только основных «лепестков» с периодом повторения, равным коэффициенту деления.

При делении частоты опорного генератора на другие коэффициенты деления длительность пауз между импульсами меняется, т. е. период импульсной последовательности содержит одиночные импульсы с разным периодом и скважностью. Это явление можно описать как джиттер (jitter), или колебание частоты. Это приводит к изменению скорости вращения вала ШД, что аналогично наложению высших гармоник на среднюю скорость вращения вала. На рис. 3 это также непосредственно видно, а на рис. 5 это выражается в наличии дополнительных «лепестков» на графике АКФ.

Диаграммы выходных импульсов на рис. 3 не позволяют качественно оценить описанный эффект джиттера частоты. По графику АКФ (см. рис. 5) можно лишь косвенно определить «чистоту» частоты выходных сигналов по количеству боковых «лепестков» графика АКФ и отношению их уровня к величине основного «лепестка».

Поэтому для оценки степени колебания частоты выходных сигналов СДМ в работе проводилось моделирование эквивалентного напряжения на обмотке ШД и оценки отношения его коэффициента нелинейных искажений к THD исходного сигнала. Под термином «эквивалентное напряжение» подразумевается дискретное напряжение гармонической формы, которое нужно подавать на одну из обмоток двухобмоточного ШД, чтобы вал ШД совершил 1 оборот за требуемый период (чтобы создать проекцию вращающегося вектора магнитного поля на одну из координатных осей). Из данных рис. 3 и 5 видно, что для исследуемых коэффициентов деления максимальный период выходных сигналов составляет 10 импульсов. Исходя из этого, примем, что один пе-

период эквивалентного гармонического напряжения питания обмотки двухобмоточного ШД соответствует 10 элементарным поворотам вала ШД, или что шаг вращения вала ШД соответствует 0,1 периода:  $\alpha = \frac{360^\circ}{10} = 36^\circ$ . Тогда эквивалентные напряжения при разных коэффициентах деления будут иметь вид, представленный на рис. 6.

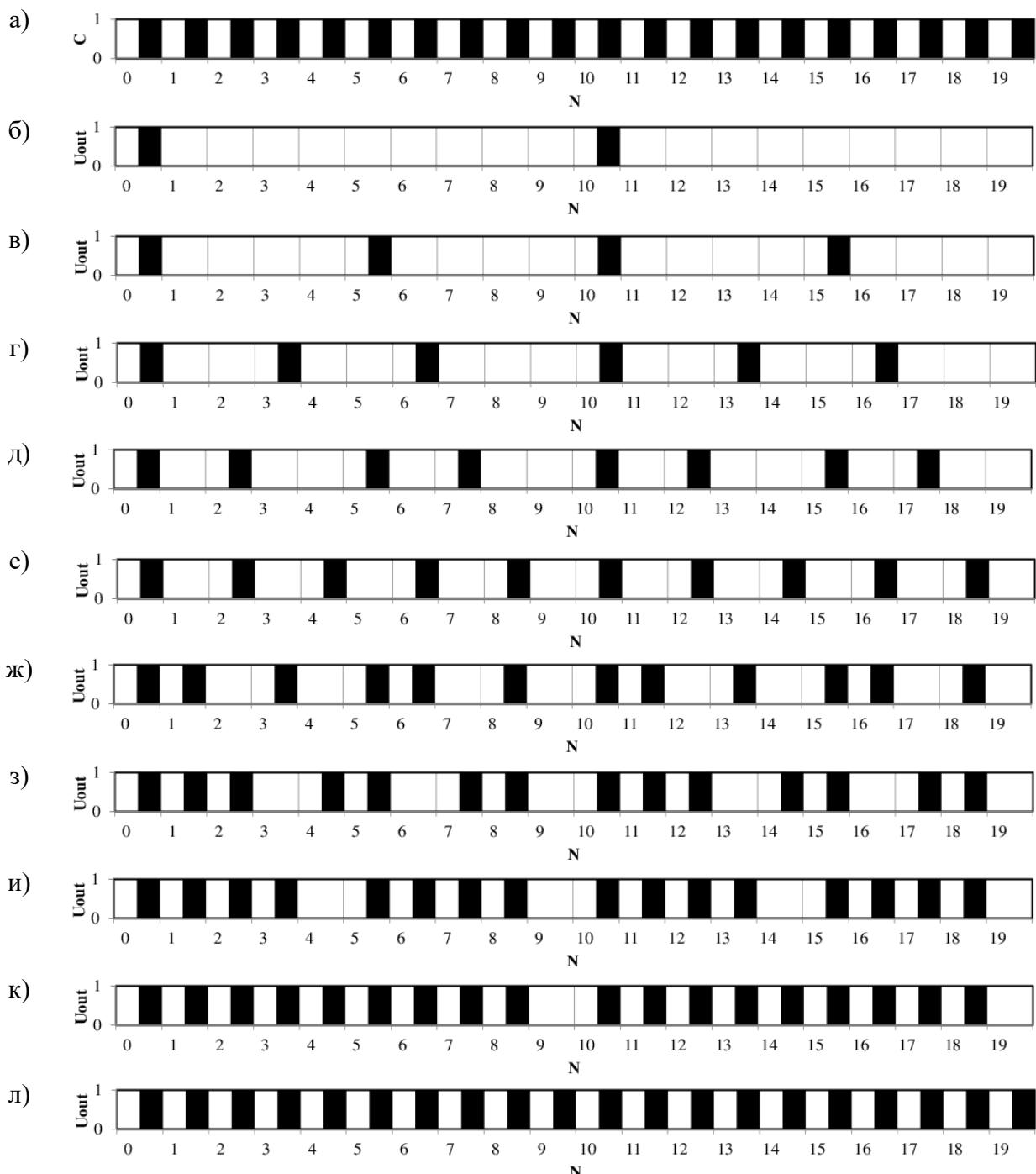


Рис. 3. Диаграммы входных (а) и выходных сигналов СДМ при различных коэффициентах умножения частоты: б – 1/10; в – 1/5; г – 3/10; д – 2/5; е – 1/2; ж – 3/5; з – 7/10; и – 4/5; к – 9/10; л – 1/1

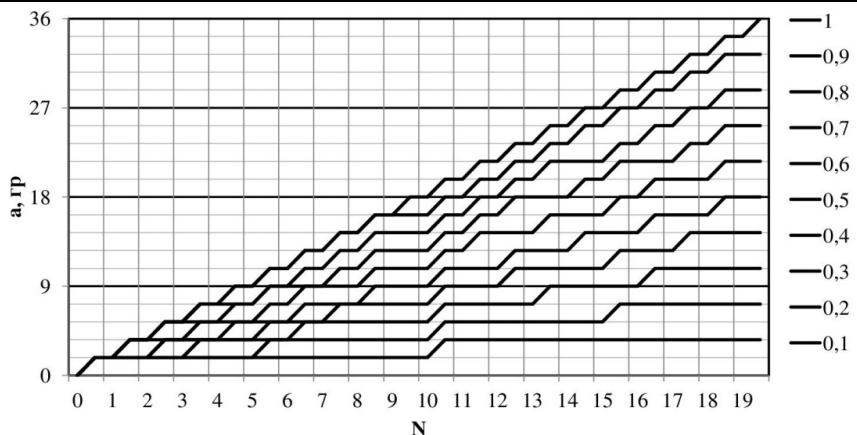


Рис. 4. Диаграммы вращения оси ШД при разных коэффициентах умножения частоты СДМ

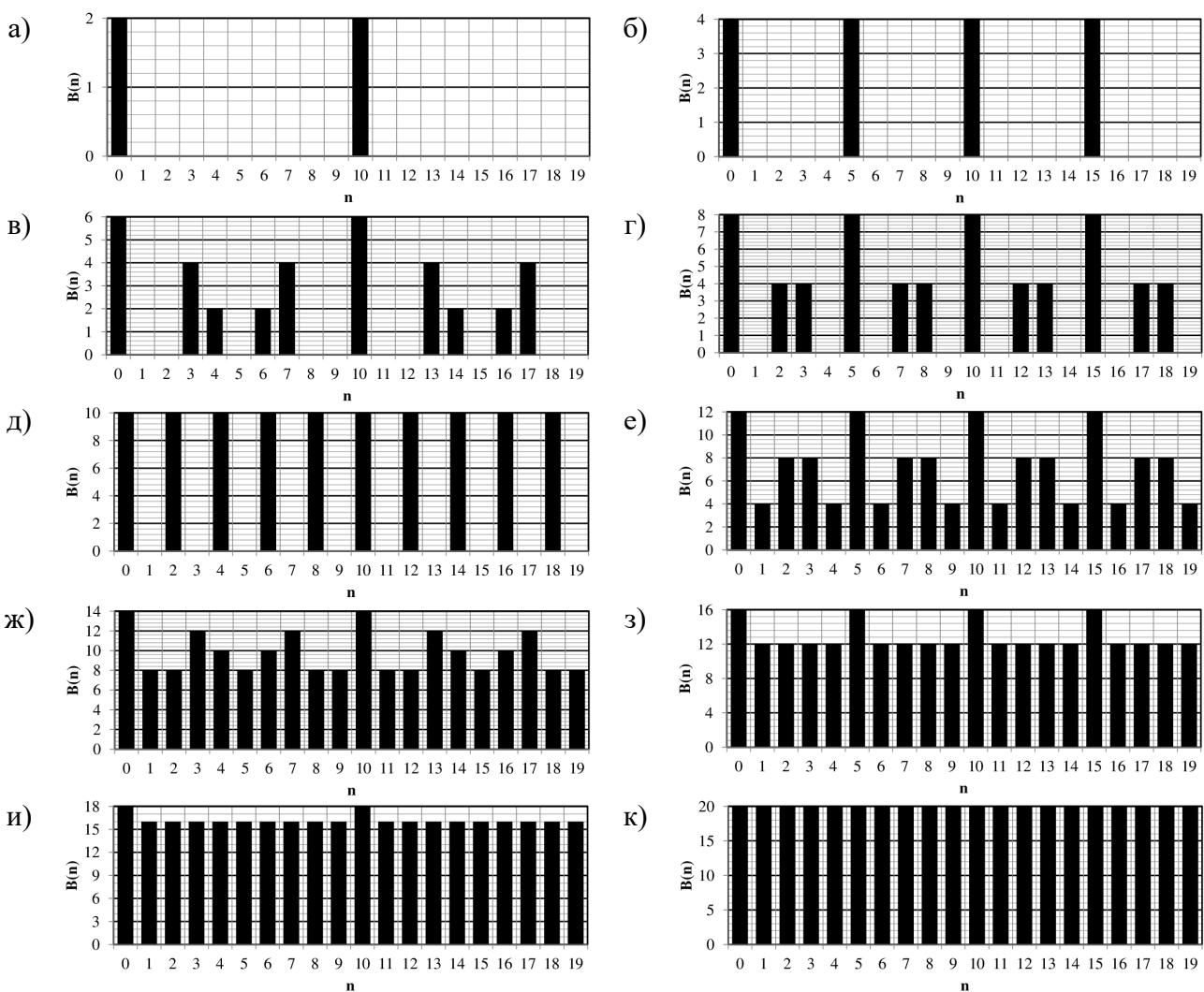


Рис. 5. Автокорреляционные функции выходных сигналов СДМ  
при разных коэффициентах умножения частоты: а – 1/10; б – 1/5; в – 3/10; г – 2/5;  
д – 1/2; е – 3/5; ж – 7/10; з – 4/5; и – 9/10; к – 1

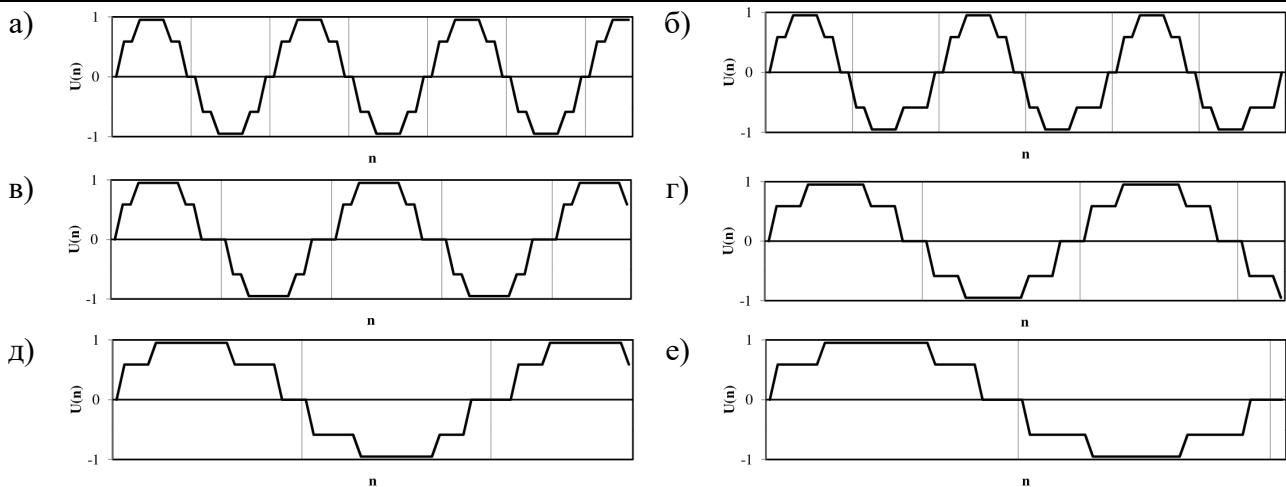


Рис. 6. Диаграммы «эквивалентных» напряжений обмотки ШД, полученные из выходных импульсов СДМ с разными коэффициентами умножения частоты:  
а – 1; б – 9/10; в – 7/10; г – 1/2; д – 2/5; е – 3/10

После разложения в ряд Фурье полученных сигналов (с учётом разных длительностей периодов сигналов с разными коэффициентами деления СДМ) получим соответствующие амплитудные спектры (см. рис. 7) и зависимость коэффициента нелинейных искажений от коэффициента деления СДМ (см. рис. 8).

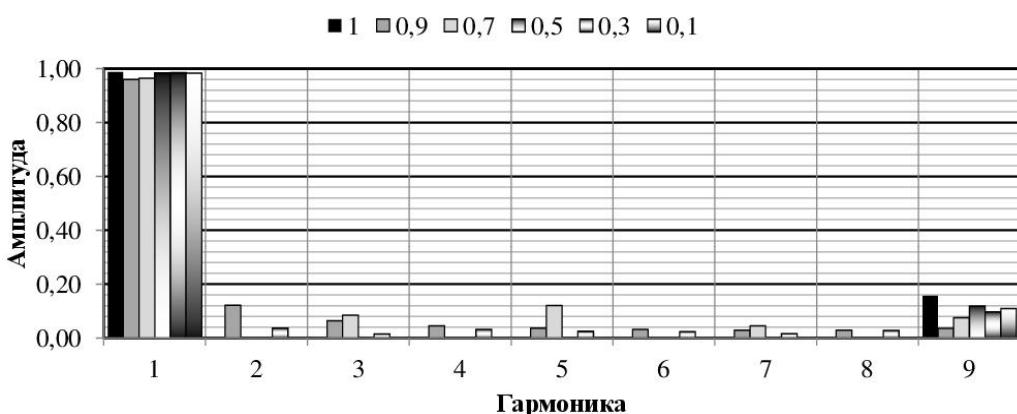


Рис. 7. Амплитудные спектры эквивалентных напряжений при коэффициентах умножения частоты СДМ: 1; 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1

Представленные диаграммы демонстрируют следующее. Минимальные искажения и минимальный уровень высших гармоник обеспечивает коэффициент деления частоты СДМ, равный 1. При этом THD составляет 16 %, а в спектре отсутствуют высшие гармоники, вплоть до 9. Наличие высокочастотных гармоник вызвано дискретным (ступенчатым) характером представления сигнала «эквивалентного» напряжения. Полученные значения спектрального состава и THD могут использоваться в качестве референсных для оценки качества остальных сигналов. Целочисленные коэффициенты деления частоты (2, 5, 10) обеспечивают спектральные характеристики сигнала, аналогичные характеристике исходного сигнала.

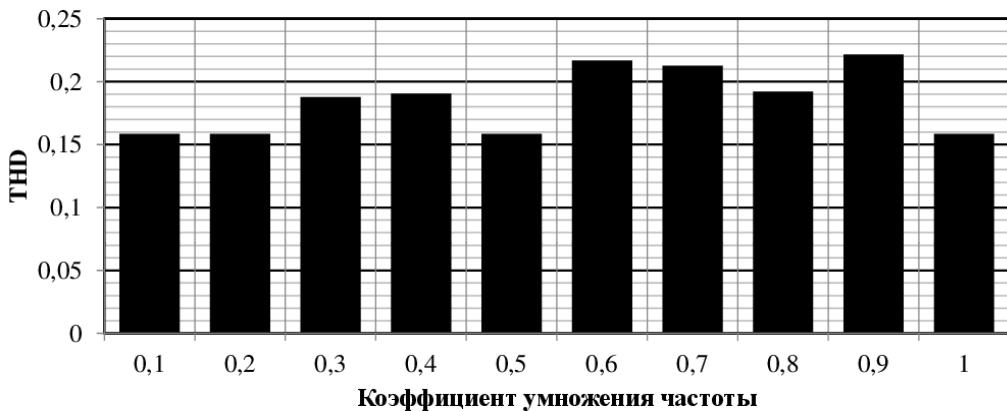


Рис. 8. Зависимость коэффициента нелинейных искажений от коэффициента умножения СДМ

Деление частоты опорного генератора на дробные коэффициенты деления приводит к появлению в спектре выходного сигнала высших гармоник амплитудой до 12 % от первой гармоники и дополнительно повышает THD на величину до 6 %. Наибольшие искажения формы выходных сигналов соответствуют меньшим значениям коэффициента деления частоты.

#### Выводы:

1. Алгоритм сигма-дельта модуляции может эффективно использоваться для реализации как аппаратных, так и программных цифровых делителей частоты с дробным переменным коэффициентом деления и формировать выходные сигналы с частотами от 0 до частоты опорного генератора.
2. Применение программного алгоритма сигма-дельта модулятора в ПЛК позволяет использовать универсальные ПЛК с большой длительностью программного цикла для непосредственного управления драйвером ШД с регулировкой скорости вращения вала ШД в широких пределах с малой дискретностью.
3. Выходные сигналы сигма-дельта модулятора в режимах деления частоты на целочисленный коэффициент деления аналогичны сигналам «классических» делителей на счётчиках, обеспечивают постоянные период и скважность импульсной последовательности, что обеспечивает постоянную скорость вращения вала ШД.

4. Дробные коэффициенты умножения частоты вида  $k = \frac{U_{in}}{U_0}$  (где  $U_0$  и  $U_{in}$  – целые числа,  $U_{in} \leq U_0$ ,  $U_0 > 0$ ,  $U_{in} \geq 0$ ) при условии, что они представляет собой несократимую дробь, обеспечивают формирование выходных сигналов с минимальным периодом, равным  $U_0$ . Внутри этого периода длительность паузы между сигналами меняется максимум на длительность одного периода сигнала опорной частоты. Распределение импульсов в выходном сигнале модулятора достаточно равномерное. В результате гармонические искажения выходного сигнала повышаются не более чем на 6 % за счёт добавления в спектр высших гармоник амплитудой не более 12 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авторское свидетельство № 1119177 А1 СССР, МПК H03K 23/00. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления: № 3608445: заявлено 21.06.1983: опубликовано 15.10.1984 / Вакуленко Н. И., Герман С. М.; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я А-1221.
2. Авторское свидетельство № 1322471 А1 СССР, МПК H03K 23/66. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления: № 3998634: заявлено 30.12.1985: опубликовано 07.07.1987 / Чистяков В. А., Слепнев Ю. М.; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я А-7182.
3. Авторское свидетельство № 822377 А1 СССР, МПК H03K 23/00. Делитель частоты следования импульсов с переменным коэффициентом деления: № 2812704: заявлено 09.07.1979: опубликовано 15.04.1981 /



# Учёные записки

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета

№ III (75)

2024

Власов Г. С., Гарин Л. Д., Добровинская Д. Г., Павленков О. Ф.; заявитель Пензенский филиал Всесоюзного научно-исследовательского технологического института приборостроения.

4. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III (51). – С. 29-38.
5. Браун, Д. Новые экономичные синтезаторы с дробно-переменным коэффициентом деления / Д. Браун // Новости микроэлектроники. – URL: [http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99\\_02/stat\\_11.htm](http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99_02/stat_11.htm) (дата обращения: 15.02.2024). – Текст: электронный.
6. Делитель частоты с регулируемым коэффициентом деления // Журнал РадиоЛоцман. – URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=51065> (дата обращения: 15.02.2024). – Текст: электронный.
7. Дингес, С. Делители частоты. Часть 1. Основные сведения о делителях частоты / С. Дингес, В. Кочемасов // Компоненты и технологии. – 2019. – № 2 (211). – С. 6-16.
8. Иванов, С. Н. Расчёт надёжности привода линейного перемещения машиностроительного оборудования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. Ю. Сарилов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 75-80.
9. Колесников, Д. В. Анализ характеристик verilog-модели сигма-дельта модулятора / Д. В. Колесников, Е. Н. Бормонтов, Е. В. Невежин // Энергия – XXI век. – 2012. – № 1-2 (82-83). – С. 58-63.
10. Лепехина, С. Ю. Комплекс алгоритмов работы системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати / С. Ю. Лепехина, С. И. Сухоруков, Ю. А. Давыдов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 68-75.
11. Микушин, А. В. Схемотехника цифровых устройств: учеб. пособие / А. В. Микушин, В. И. Сединин. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2007. – 327 с.
12. Организация делителя частоты с дробным коэффициентом деления в объёме ПЛИС // Habr, 2006-2024. – URL: <https://habr.com/ru/articles/306132/> (дата обращения: 15.02.2024). – Текст: электронный.
13. Особенности проектирования малоинерционных электромеханических приводов / С. Н. Иванов, Н. А. Буньков, А. А. Дадынский, А. В. Горбунов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (37). – С. 10-15.
14. Способ анализа работы сигма-дельта модулятора во временной области / И. Я. Апкаев, О. И. Лазарева, К. Ю. Пискаев, М. С. Хитрых // Современные информационные технологии. – 2022. – № 35 (35). – С. 57-62.
15. Стельмащук, С. В. Согласованное управление устройством транспортировки ленты с модальными регуляторами / С. В. Стельмащук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 28-40.
16. Толкачев, П. А. Анализ сигма-дельта модулятора / П. А. Толкачев // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 5. – С. 38-42.
17. Тышук, Ю. Н. Разработка цифрового делителя частоты с дробным коэффициентом деления в 130 нм sige BiCMOS технологии / Ю. Н. Тышук, А. С. Кожемякин, А. Г. Говенько // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2019. – № 2. – С. 142.
18. 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-1 (57). – С. 52-62.
19. Чувыкин, Б. В. Методика определения низкочастотных периодических колебаний в однобитных сигналах сигма-дельта модуляторов / Б. В. Чувыкин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 174-181.
20. Шахтарин, Б. И. Анализ сигма-дельта модулятора / Б. И. Шахтарин, А. А. Быков, А. А. Ковалчук // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012. – № 1. – С. 28-37.
21. Шахтарин, Б. И. Анализ сигма-дельта модулятора с одной петлёй / Б. И. Шахтарин, А. А. Иванов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2008. – № 126. – С. 74-86.
22. Шахтарин, Б. И. Анализ синтезатора частот с дробно-переменным коэффициентом деления делителя / Б. И. Шахтарин, Е. Г. Качармина, В. В. Вельтищев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 122-131.

Гумунюк П. В.

СРАВНЕНИЕ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ НА РАЗРАБОТКУ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА  
РУЧНЫМ СПОСОБОМ И СРЕДСТВАМИ АВТОМАТНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Гумунюк П. В.

P. V. Gumunyk

## СРАВНЕНИЕ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ НА РАЗРАБОТКУ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА РУЧНЫМ СПОСОБОМ И СРЕДСТВАМИ АВТОМАТНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

### COMPARISON OF TIME COSTS FOR PROGRAM PRODUCT DEVELOPMENT BY MANUAL AND AUTOMATIC PROGRAMMING MEANS

**Павел Васильевич Гумунюк** – аспирант Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (Россия, Москва); тел. 8(916)599-48-10. E-mail: pavelmailgpv@gmail.com.

**Pavel Vasilievich Gumunyk** – Graduate Student, Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia); tel. 8(916)599-48-10. E-mail: pavelmailgpv@gmail.com.

**Аннотация.** Данная статья имеет цель популяризировать методику автоматного программирования. Для показа преимуществ этой методики в статье проводится сравнение времени, необходимого на разработку карточной игры UNO двумя способами, а именно: ручным программированием и средствами автоматного программирования. Приведено обоснование, почему в качестве программы для разработки системы управления выбрана карточная игра UNO, и поясняются правила этой игры. Процесс разработки для наглядности и анализа разбит на этапы, каждый из которых измерен. Произведено сравнение этапов разработки программного обеспечения для выявления самого затратного из них. Это сравнение проводилось путём замера промежутков времени, необходимых для выполнения каждого конкретного этапа процесса разработки. В связи с возможностью возникновения во время написания программного кода различных обстоятельств и непреодолимых сил, способствующих увеличению или уменьшению времени разработки, расчёт не может быть полностью достоверным, т. к. для каждого конкретного случая существует только конкретное решение. Однако для систематизации статистики по сравнению временных промежутков, затраченных на разработку программы как ручным способом, так и с помощью методики автоматного программирования, в статье была проведена разработка аналогичных карточных игр с получением результатов по временными затратам. В завершение статьи приведён анализ полученных программных кодов и на основании полученных результатов делается заключение о возможности дальнейшего применения автоматного программирования.

**Summary.** This article aims to popularize the Automatic Programming technique. To show the advantages of this technique, the article compares the time required to develop the UNO card game in 2 ways, namely: Manual programming and Automatic programming tools. A justification is given for why the UNO card game was chosen as a program for developing a control system and the rules of this game are explained. The development process is divided into stages for clarity and analysis, each of which is measured. A comparison was made of the stages of software development to identify the most expensive of them. This comparison was made by measuring the length of time required to complete each specific stage of the development process. Due to the possibility that various circumstances and force majeure may arise during the writing of program code, contributing to an increase or decrease in development time, the calculation cannot be completely reliable, since for each specific case there is only a specific solution. However, in order to systematize statistics comparing the time periods spent on developing the program, both manually and using the Automated Programming technique, the article developed similar card games with obtaining results on time costs. At the end of the article, an analysis of the obtained program codes is given and, based on the results obtained, a conclusion is made about the possibility of further application of automatic programming.

**Ключевые слова:** UNO; ручная разработка; Switch-технология; автоматное программирование; система управления; Индустрия 4.0.

**Key words:** UNO; Manual development; Switch technology; Automatic programming; Control system; Industry 4.0.

УДК 004.457

Для того чтобы рассмотреть карточную игру UNO как систему, необходимо разобрать правила её ведения. Эта игра имеет следующие карты: карты от 0 до 9, смена цвета, смена хода, противоположному игроку +4 карты, противоположному игроку +2 карты, карты пропуска хода, карты обмена картами.



Общее количество карт 108, из которых 18 зелёных номиналом от 1 до 9, одна зелёная карта номиналом 0, и столько же синих, красных и жёлтых карт. Цвет карт в игре UNO является аналогом масти в классических карточных играх. Восемь карт, предназначенных для вручения противнику (противникам) двух дополнительных карт (карты берутся из общей колоды) соответственно по две зелёного, красного, синего и жёлтого цветов. Восемь карт для смены хода, по две штуки каждого цвета. Восемь карт для пропуска хода, по две штуки каждого цвета. Четыре карты, предназначенные для вручения противнику (противникам) четырёх дополнительных карт (карты берутся из общей колоды). Четыре карты смены цвета.

Игрок, который первым избавился от всех карт в раунде, получает очки за все карты, которые остались на руках у остальных игроков по следующим правилам:

1. За все карты номиналом от 0 до 9 начисляются баллы, равные номиналам карт (за карту номиналом 0 даётся 0 очков, за карту номиналом 1 даётся 1 очко и т. д.).
2. За карты, дающие противникам две дополнительные карты, даётся 20 очков.
3. За карты, дающие возможность пропуска хода, даётся 20 очков.
4. За карты, меняющие направление игры (очерёдность, по которой игроки делают свои ходы), даётся 20 очков.
5. За карты, позволяющие поменять цвет (активную игровую масть), даётся 50 очков.
6. За карты, дающие противникам четыре дополнительные карты, даётся 50 очков.

После подсчёта очков, если никто не набрал 500 очков, карты перетасовываются и игра продолжается. Победителем является тот, кто первым набрал 500 очков. Ещё один способ подсчёта очков – текущий подсчёт очков, которые остались на руках у игроков в конце каждого раунда. Тот игрок, у кого меньше всего очков по оставшимся на руках картам, становится победителем [11].

Карты перемешиваются и раздаются игрокам, по семь карт каждому игроку. Часть карт остаётся в колоде на тот случай, если игрокам понадобятся дополнительные карты [12].

Правила могут отличаться в зависимости от различных способов ведения игры, но можно выделить основные тезисы.

Данная программа будет разработана для игры между человеком и машиной (компьютерной программой, отыгравшей роль противоположного игрока).

Состояния системы игры зависят как от выбора игрока, так и от того, кто будет ходить первым.

Право первого хода предоставляется случайнным образом.

Если первый ход за машиной, тогда она выбирает самую малую карту из имеющихся, т. к. задача машины выиграть, и ей необходимо в первую очередь избавиться от самых мелких карт, поскольку чем дальше идёт игра, тем труднее избавиться от карт с низким номиналом.

Карты можно бить только картами того же цвета, что и уже выложенные на игровой стол. В один момент времени игра возможна только картами одного цвета. Если у машины нет карт нужного цвета или нужного номинала, но есть дополнительные карты для смены цвета, то машина может ими воспользоваться и выбрать новый активный цвет для дальнейшего хода игры. Цвет для замены компьютерной программой выбирается на основании подсчёта количества карт каждого цвета, и приоритет отдается картам того цвета, количество которых больше в колоде у машины. Если в колоде у машины оказывается равное количество карт разных цветов, то выбор производится случайнным образом.

Если у противника машины, т. е. человека, осталось три карты или меньше, и если у машины есть карта на +4 / +2 карты противнику, то она может ей воспользоваться.

Если у машины нет карт требуемой масти и нет карт смены масти или карты, дающей игроку +4 / +2 карты, то она может воспользоваться картой смены хода, что освобождает её от выдачи карты.

Если у машины нет карт нужной масти или смены цвета, смены хода, противоположному игроку +4 / +2 карты, то ей необходимо самой взять из колоды 4 карты.

Если в колоде осталась только одна карта, тогда необходимо сообщить другим игрокам об этом, в противном случае нарушитель штрафуется двумя дополнительными картами из колоды.

На основании всего вышеперечисленного программа для игры в UNO должна в первую очередь состоять из двух блоков, где первый отвечает за рандомное тасование карт, выбор первого игрока, подсчёт очков для победы и определение победителя. Второй блок отвечает за то, чтобы обыграть игрока. В этом случае можно применить методы автоматного программирования для выделения состояний, в которых будет находиться игра, что позволит машине принимать решения для того, чтобы обыграть противника [3].

Первый автомат представляет собой работающий по триггерам счётчик, срабатывающий в начале и конце игры. В начале игры необходимо рандомно распределить карты и роли, а в конце – подсчитать баллы и определить победителя. Логические операции происходят во втором автомате, логика которого будет разобрана ниже.

Для увеличения количества игроков в игре достаточно продублировать второй блок. Каждое из условий, определённых правилами игры, будет соответствующим условием программы, а выбираться они будут оператором множественного выбора switch.

Важно не только время, необходимое на разработку, но и компетенция программиста. Согласно статистике, чтобы пройти путь от начинающего разработчика до опытного специалиста, требуется много лет упорной практики и развития своих навыков. Если учитывать этот фактор, то в условиях задачи поиска наименьшего времени на разработку программного обеспечения получается, что ручная разработка проигрывает автоматному программированию. Поэтому время, требуемое на обучение программиста, не будет учитываться в рамках данного эксперимента. Можно парировать этот аргумент тем, что разработка методов автоматного программирования является процессом не быстрым и равносильным обучению программиста до уровня профессионала. Однако методы и средства автоматного программирования делаются один раз и дают свои возможности по написанию кода всем специалистам, тогда как время, требуемое для обучения конкретного программиста, нужно умножить на количество всех специалистов. В данном случае автоматное программирование выигрывает у ручного в количественном соотношении по результатам общего затраченного времени. Сейчас в индустрии программирования квалифицированные программисты уже не справляются с поставленным объёмом задач, но при этом есть предпосылки для формирования технологии генерирования программного кода с помощью средств автоматного программирования и словаля понятий, направленных на обучение производственных специалистов азам разработки систем управления [6].

Для подсчёта времени разделим процесс разработки программного обеспечения на несколько ключевых этапов. Замеры каждого временного промежутка помогут в составлении статистики, которая выявит самый трудоёмкий этап и какой из методов лидирует.

В качестве снаряда для эксперимента выступит карточная игра UNO. Она была выбрана из-за большого количества состояний, возникающих в игре, и предсказуемости поведения искусственного интеллекта во время игровых ситуаций [10].

Выделим следующие этапы разработки:

1. Изучение правил игры.

2. Поиск ключевых паттернов поведения программы в игре (в случае с ручным программированием это разработка структуры программы, в случае с автоматным программированием – выделение устойчивых состояний).

3. Разработка программного кода (в случае с ручной разработкой это написание программного кода вручную с последующей его компиляцией и исправлением ошибок, в случае же автоматного программирования – загрузка в программу для генерации кода).

4. Тестирование программы, поиск ошибок и их последующее устранение [7].

Для выявления количества времени была проведена разработка двух идентичных программ с целью замера времени, требуемого на создание программ разными путями. Рассмотрим сначала процесс автоматической разработки, а затем ручной, после чего проведём сравнение временных результатов. Начнём с автоматического способа.

Состояний в системе столько же, сколько карт и действий в игре:

1. Выдача карт от 0 до 9 по правилам игры (в приоритете находятся карты с меньшим числом).



2. Противоположному игроку +4 карты.
3. Противоположному игроку +2 карты.
4. Смена хода.
5. Карты запрета хода.
6. Смена цвета.
7. Карты пропуска хода.
8. Взять дополнительно карты.
9. Действие игрока.

После действий игрока цикл перезапускается, т. е. после последнего состояния система переходит в первое, но и в последнее состояние также можно попасть из всех предыдущих, минуя промежуточные.

Переменные системы управления:

int lastCard = 0; номинал последней карты, при старте игры он равен 0;

int firstMove; право первого хода в партии, выбирается в начале игры рандомно и может принимать два значения, где 0 – право хода достаётся компьютеру, а 1 – право хода достаётся игроку;

int lastMove; флаг, записывающий, кому принадлежал последний ход. Это необходимо для понимания программой, должна ли она сейчас ходить или она передаёт это право игроку, где 0 – ход игрока, а 1 – ход компьютера;

Arr [] cardArray = int []; массив карт, имеющихся у компьютера. При каждом праве хода карты пересчитываются массивом, и при отсутствии необходимой карты программа пользуется дополнительными картами.

int cardGame; состояние игрового процесса.

Игра UNO хорошо подходит как объект для реализации элементов искусственного интеллекта. Поведение машины достаточно просто прописать, следуя несложным правилам игры, ввиду того, что карты имеют свою цену и иерархию. На основании этого можно составлять последовательность действий, рассчитывая их цену и основываясь на приоритете игровых карт [2].

Данная программа не является системой управления в привычном виде из-за следующей её особенности. Если переход между состояниями происходит автоматически, то переход с последнего на первое осуществляется уже вручную, при помощи действий игрока. Такие программы также необходимы и имеют свои области применения [9].

Switch cardGame:

Case 1: // Выдача карт от 0 до 9

```
Arr [] cardArray = int [] ;  
for (int i = 0; i <= cardArray.Length; i++)  
{ cardArray[i] = 0; }  
Break;
```

Case 2: // противоположенному игроку +4 карты

```
Arr [] cardArray = int [] ;  
for (int i = 0; i <= cardArray.Length; i++)  
{ cardArray[i] = 10; }  
Break;
```

Case 3: // противоположенному игроку +2 карты

```
Arr [] cardArray = int [] ;  
for (int i = 0; i <= cardArray.Length; i++)  
{ cardArray[i] = 11; }  
Break;
```

Case 4: // смена цвета

```
Arr [] cardArray = int [] ;  
for (int i = 0; i <= cardArray.Length; i++)  
{ cardArray[i] = 12; }  
Break;
```

```

Case 5: // смена хода
Arr [] cardArray = int [] ;
for (int i = 0; i <= cardArray.Length; i++)
{ cardArray[i] = 13; }
Break;
Case 6: // запрет хода
Arr [] cardArray = int [] ;
for (int i = 0; i <= cardArray.Length; i++)
{ cardArray[i] = 14; }
Break;
Case 7: // Взять дополнительно +4 карты
Arr [] cardArray = int [] ;
for (int i = 0; i <= cardArray.Length+3; i++)
{ cardArray[i] = 0; }
lastMove = 0 ;
Break;
Case 8: // действие игрока
lastMove = 1 ;
Break;
```

Для реализации кода методом ручного построения нужно ввести дополнительную переменную:

int CardForMove определяет значение требуемой карты, которое выбирается из готовых вариантов одним из методов, срабатывающим при действиях игрока. Переменная может принимать значение от 0 до 9 при срабатывании метода.

int playerMoveResult переменная, представляющая собой значение карты.

Для корректной реализации программы воспользуемся реализацией следующих методов:

CardSearch выдача карт от 0 до 9;

PlayerAddingCards противоположному игроку +4 карты и противоположному игроку +2 карты;

ChangeMove смена хода;

ChangeCards карты обмена картами;

ChangeColor смена цвета;

LeaveFromMove карты пропуска хода.

В коде программы необходимо реализовать все перечисленные методы. Они все берут переменную lastCard playerMoveResult, но при этом результат выдаёт только один из методов.

Далее представлен фрагмент ручной программы:

```

void CardSearch () // Выдача карт от 0 до 9
{
    for (int i = 0; i <= cardArray.Length+3; i++)
    { cardArray[i] = 0 ; }
```

```
void ChangeMove () // Смена хода
```

```

{
    for (int i = 0; i <= cardArray.Length+3; i++)
    { cardArray[i] = lastCard ; }
```

```
void ChangeCards () // Запрет хода
```

```

{
    for (int i = 0; i <= cardArray.Length+3; i++)
    { cardArray[i] = lastCard ; }
```

```
void ChangeColor () // Смена цвета
{
for (int i = 0; i <= cardArray.Length+3; i++)
{ cardArray[i] = lastCard ; }
}
void LeaveFromMove () // Пропуск хода
{
Arr [] cardArray = int [] ;
for (int i = 0; i <= cardArray.Length+3; i++)
{ cardArray[i] = lastCard ; }
}
Void Main ()
{
CardSearch () ;
ChangeMove () ;
ChangeCards () ;
ChangeColor () ;
LeaveFromMove () ; // Поиск нужного метода
Arr [] cardArray = int [] ;
for (int i = 0; i <= cardArray.Length+3; i++)
{ cardArray[i] = 0 ; }
}
```

Оба программных кода написаны на языке C# и находятся в репозитории <https://github.com/pavel-proger/CardGame>. Внешний вид программы для игры в UNO представлен на рис. 1.

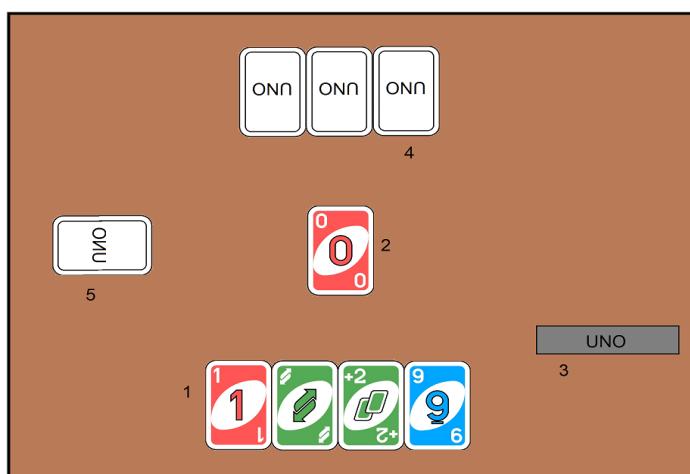


Рис. 1. Схематическое изображение программы для игры в UNO: 1 – карты игрока; 2 – текущая карта; 3 – кнопка для оповещения об окончании игры (становится активной только тогда, когда у игрока осталась одна карта); 4 – карты противника; 5 – стопка дополнительных карт

Рассмотрим фрагменты обоих программных кодов.

Оба программных кода выполняют свою функцию, но при этом они имеют разную структуру. Код, сгенерированный при помощи инструментов и методик автоматного программирования, имеет линейную, последовательную структуру набора условий, входящих в оператор switch, что является логичным и оправданным из-за второго названия данной методики – Switch-технология. Данная структура состоит из простых логических единиц, главным преимуществом которых является возможность без труда отследить связи между ними. По сути,

если взять условие как базовый логический элемент структуры Switch-технологии и рассмотреть его составные части в программах, в которых он применяется, можно систематизировать информацию и выделить общие правила его построения.

В итоге получается, что в каждом условии есть переменные, результаты которых заставляют программу перейти на это условие, переменные, по результатам которых программа переходит в другие условия, а также действия, выполняемые в самом условии, и реализуемые в нём же флаги [4]. Поверх этих базовых составляющих могут крепиться дополнительные конструкции, однако структура кода, сгенерированного при помощи технологии автоматного программирования, при этом не изменится. Таким образом, любая программа, которая была написана с применением Switch-технологии, всегда будет отличаться своей простотой и унификацией, что значительно помогает при её чтении. Эта простота может помочь при разработке аналогичных программ, применяемых для различных нужд, благодаря сведению процесса программирования к изучению технологического процесса и интерпретации его через состояния графов переходов автоматного программирования [1].

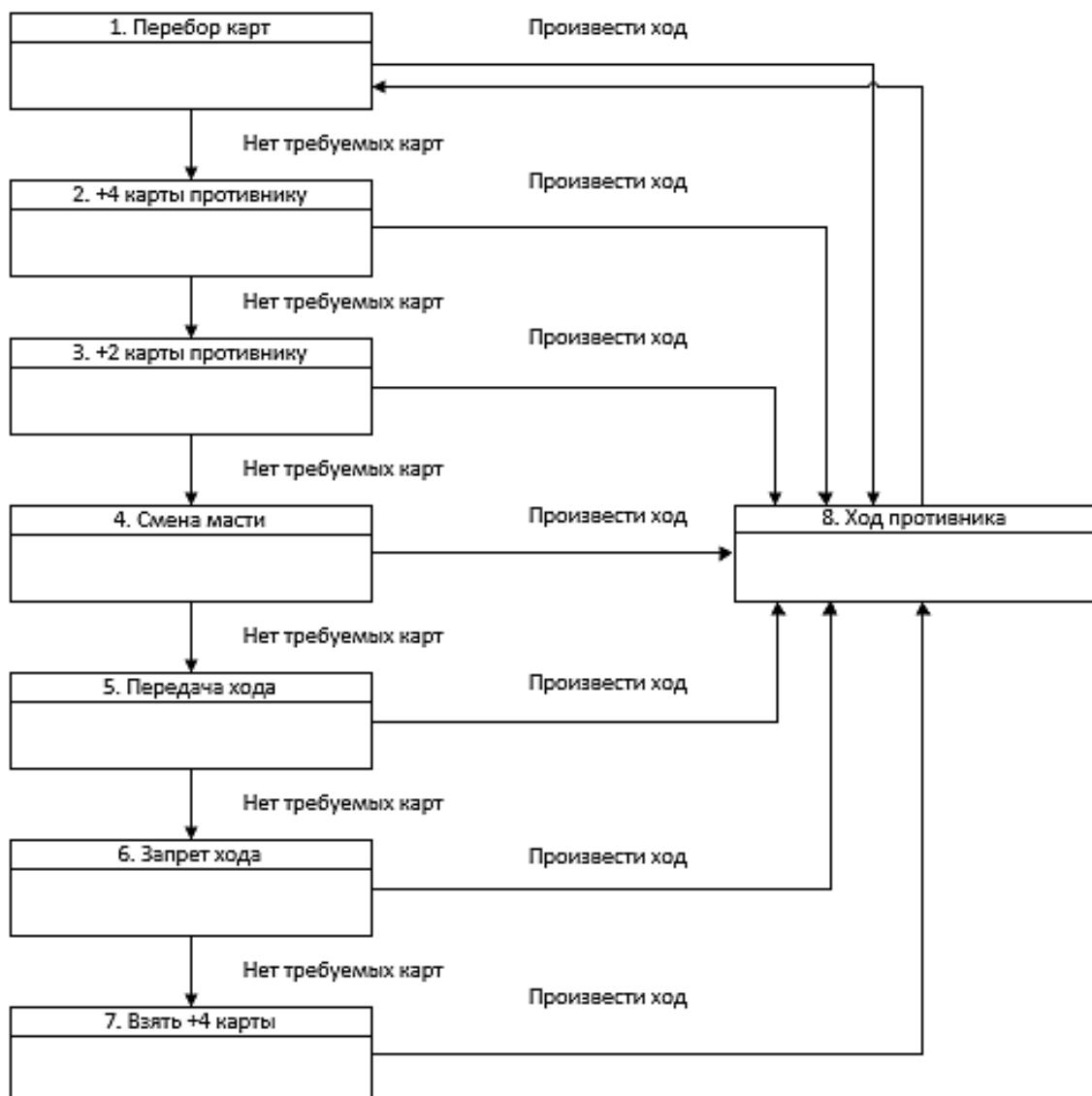


Рис. 2. Представление программного кода автоматного подхода в виде алгоритма (блок-схемы)

Программа, написанная вручную, имеет куда более сложное строение. Для её корректной работы потребовалось написать несколько методов. Каждый метод соответствует определённой операции, а именно: выдача карт от 0 до 9; противоположному игроку +4 карты; противоположному игроку +2 карты; смена хода; карты пропуска хода; смена цвета. В данном программном коде методы выступают в качестве аналога состояний из кода, сгенерированного технологией автоматического программирования. Исключение составляют только действия: «взять дополнительно карты» и «ход игрока», которые реализованы в виде простейших условий [8].

Программный код в виде блок-схемы, разработанной с помощью автоматического программирования, представлен на рис. 2.

Программный код в виде блок-схемы, разработанной с помощью ручного программирования, представлен на рис. 3.

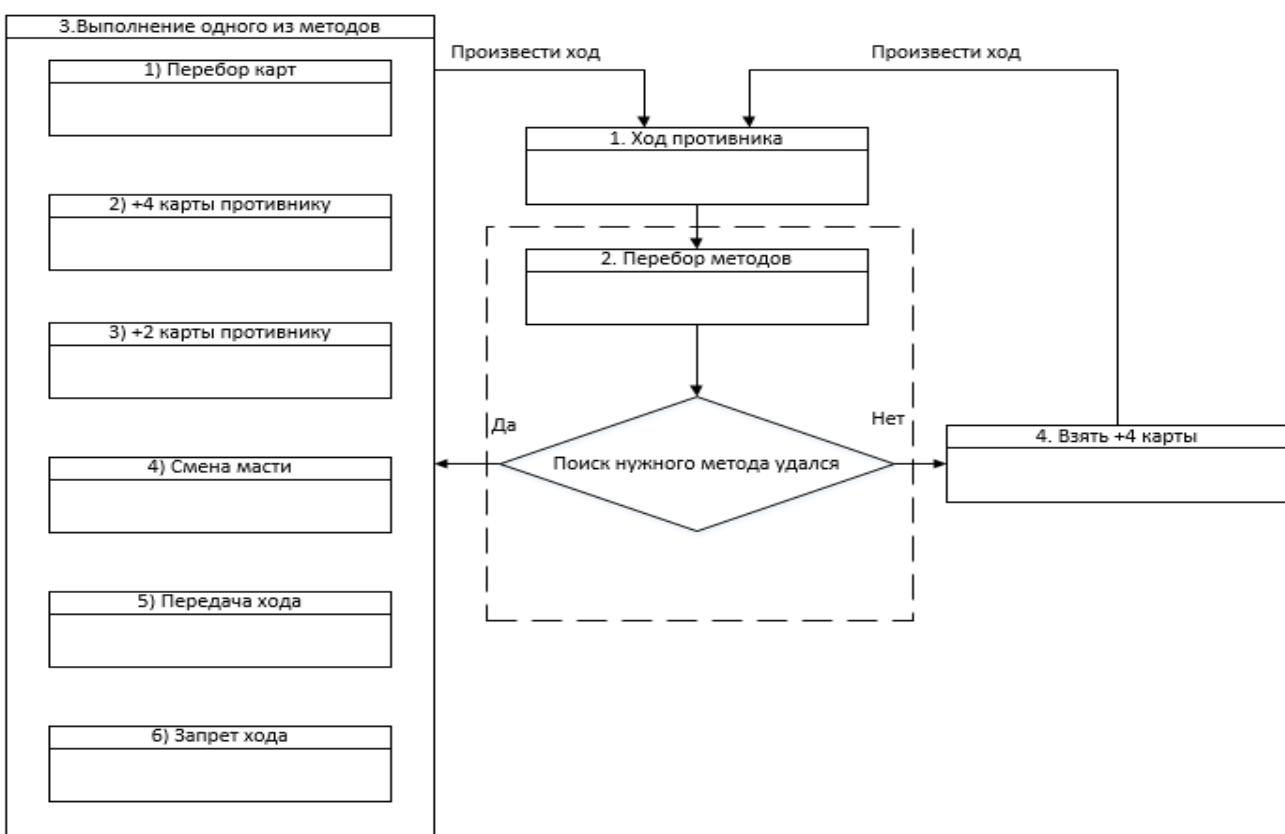


Рис. 3. Представление программного кода ручного подхода в виде алгоритма (блок-схемы)

Для достоверности полученного временного результата необходимо было убедиться в том, что данные не являются ошибочными. Для этого необходимо было провести аналогичные испытания на множестве примеров и только потом систематизировать результат. Игра UNO является карточной игрой, поэтому в качестве примера были взяты другие карточные игры и проанализированы их результаты для сравнения. Результаты по играм представлены в табл. 1.

Разбиение процесса автоматической разработки игры UNO по этапам представлено на рис. 4.

Разбиение процесса ручной разработки игры UNO по этапам представлено на рис. 5.

Сравнение времени, требуемого на разработку каждой программы, представлено на рис. 6.

Таблица 1

Сравнение временных промежутков, затрачиваемых на разработку карточных игр ручным и автоматическим способом

	Время (часы)	Игра				
		Этапы	UNO	Солитер	Пасьянс	Косынка
Автоматическое генерирование	1. Изучение	2	2	2	2	2
	2. Паттерны	1,5	1,5	1,5	1	2
	3. Разработка	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	4. Тестирование	1	1,5	1	1	1,5
	Итого:	4,75	5,25	4,75	4,25	5,75
Ручная разработка	Время (часы)	Игра				
	Этап	UNO	Солитер	Пасьянс	Косынка	Покер
	1. Изучение	2	2	2	2	2
	2. Паттерны	1	1,5	1	1,5	2
	3. Разработка	6	6,5	6	7	8
	4. Тестирование	2	2,5	2	2	2,5
	Итого:	11	12,5	11	12,5	14,5

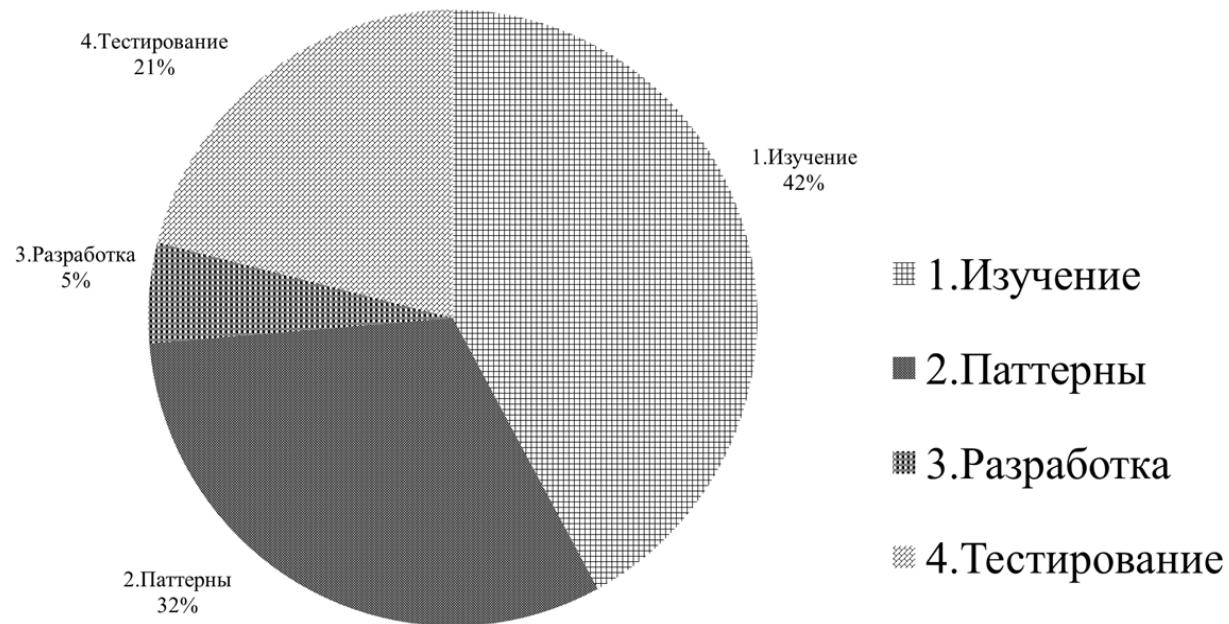


Рис. 4. Временное разбиение в часах по этапам процесса автоматической разработки

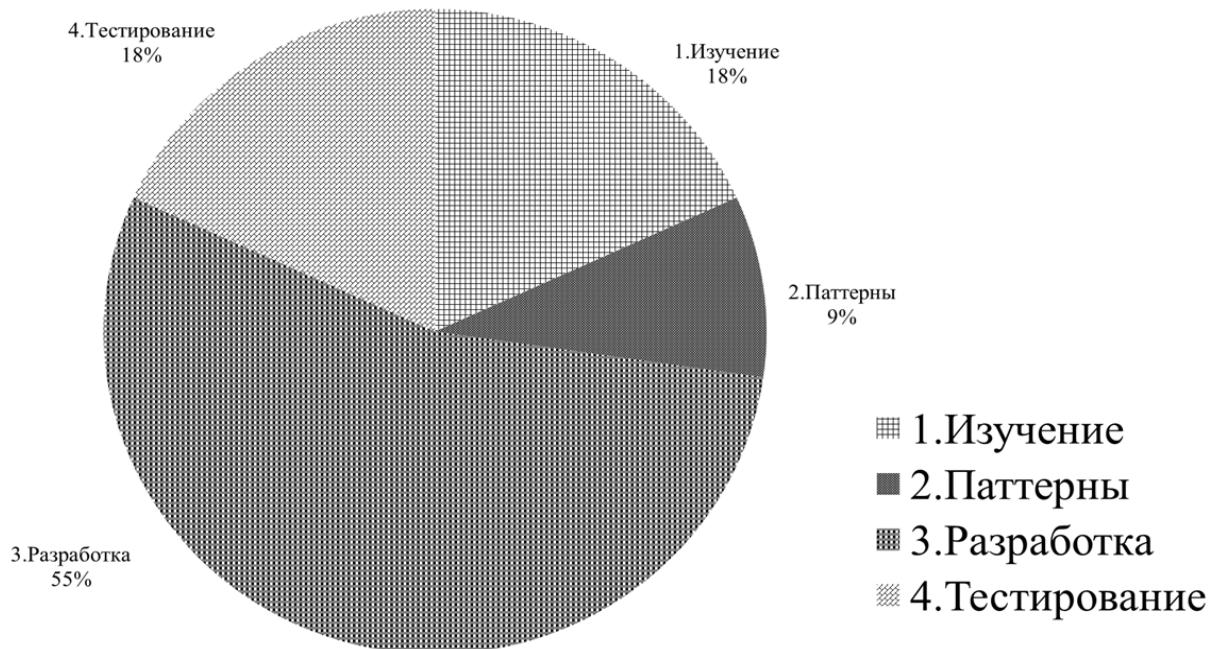


Рис. 5. Временное разбиение в часах по этапам процесса ручной разработки

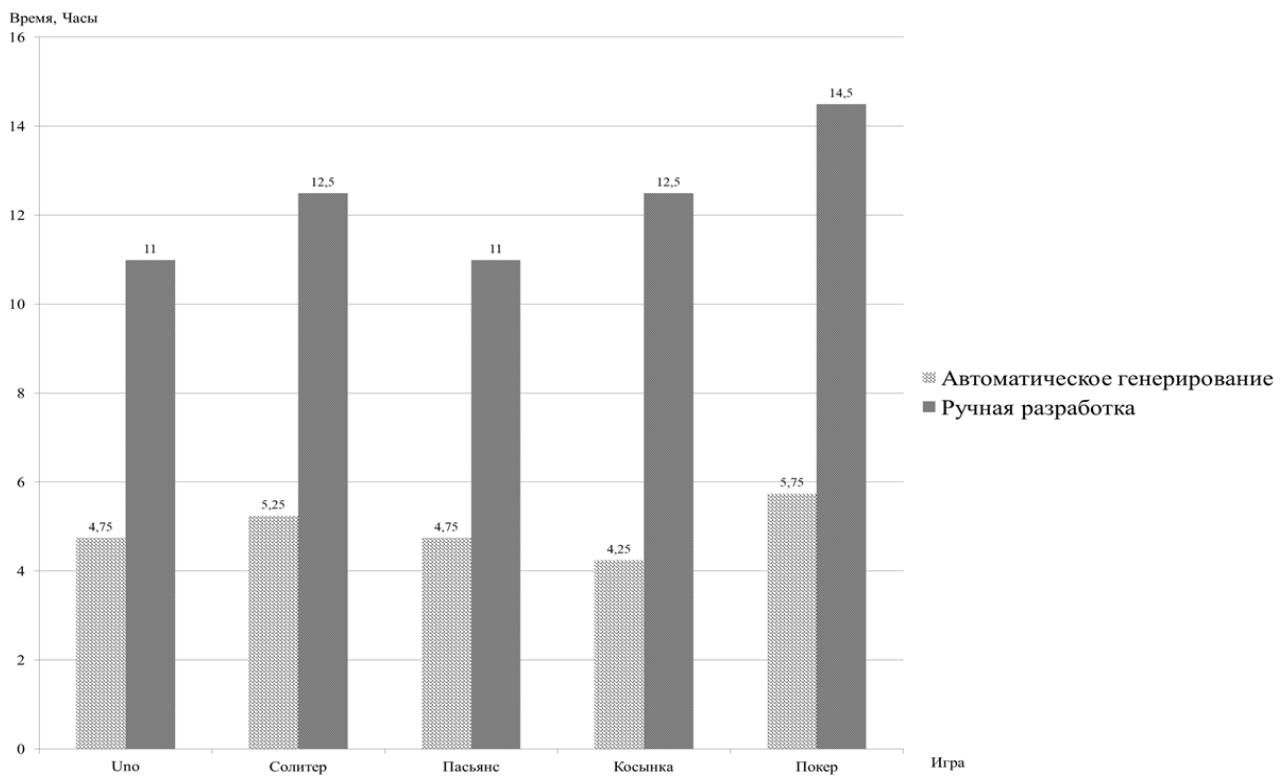


Рис. 6. Сравнение времени, требуемого на разработку каждой программы по часам

Обе программы вполне функциональны и безупречно справляются со своими функциями, несмотря на их различное написание и строение. Однако код, сгенерированный при помощи технологии автоматного программирования, значительно уменьшает время на его разработку (примерно с 6-8 часов до 15 минут), а общий результат уменьшает время разработки практически в два раза. Это свидетельствует о том, что автоматное программирование является эффективным средством для решения задач по написанию программных продуктов для тех систем, чей технологический процесс понятен и хорошо изучен [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьева, Ю. И. Организация деятельности сельскохозяйственных производителей в условиях информационно-технологической среды / Ю. И. Афанасьева, А. В. Рыбаков, А. Н. Шурпо // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 4-8.
2. Афанасьева, Ю. И. О возможности производства пищевых продуктов с использованием «умных систем» / Ю. И. Афанасьева, А. В. Рыбаков, А. Н. Шурпо // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 87-93.
3. Канжелев, С. Ю. Преобразование графов переходов, представленных в формате MSVisio, в исходные коды программ для различных языков программирования (инструментальное средство MetaAuto) / С. Ю. Канжелев, А. А. Шалыто; Национальный исследовательский университет институт точной механики и оптики. – СПб.: ИТМО, 2005. – 102 с.
4. Липкин, Е. ИНДУСТРИЯ 4.0: умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции / Е. Липкин. – М.: ООО «Остек–СМТ», 2017. – 224 с.
5. Поликарпова, Н. И. Автоматное программирование: учебно-методическое пособие / Н. И. Поликарпова, А. А. Шалыто. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.
6. Шалыто, А. А. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов / А. А. Шалыто; Национальный исследовательский университет институт точной механики и оптики. – СПб.: ИТМО, 2005. – 779 с.
7. Татарчевский, В. А. Switch-технология в задачах логического управления / В. А. Татарчевский // Программные продукты и системы. – 2006. – № 5. – С. 30-32.
8. Шалыто, А. А. Алгоритмизация и программирование задач логического управления / А. А. Шалыто. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 1998. – 55 с.
9. Шалыто, А. А. Switch-технология – автоматный подход к созданию программного обеспечения «реактивных» систем / А. А. Шалыто, Н. И. Туктель // Программирование. – 2001. – № 5. – С. 45-62.
10. INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 4th Edition, Wiley, 2015.
11. Правила игры UNO // Игронафтик.ру. – URL: [https://igronaftik.ru/files/cms/common/pravila\\_igry\\_uno.pdf](https://igronaftik.ru/files/cms/common/pravila_igry_uno.pdf) (дата обращения: 17.03.2024). – Текст: электронный.
12. UNO Настольная игра [Электронный ресурс]. – URL: [https://static.onlinetrade.ru/docs/470367/nastolnaya\\_igra\\_mattel\\_uno\\_1581150012\\_1.pdf](https://static.onlinetrade.ru/docs/470367/nastolnaya_igra_mattel_uno_1581150012_1.pdf) (дата обращения: 17.03.2024). – Текст: электронный.



Базилевский М. П.

M. P. Bazilevskiy

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕКСА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ЦЕН ПО ДАННЫМ СУБЪЕКТОВ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЬНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

### STATISTICAL MODELING OF THE CONSUMER PRICE INDEX ACCORDING TO THE SUBJECTS OF THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT USING MODULAR REGRESSION MODELS

**Базилевский Михаил Павлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: mik2178@yandex.ru.

**Mikhail P. Bazilevskiy** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: mik2178@yandex.ru.

**Аннотация.** Статья посвящена экспериментальному исследованию предложенной ранее новой спецификации регрессионных моделей – модульной регрессии. Рассмотрен алгоритм её численного оценивания с помощью метода наименьших квадратов. Достоинство модульной регрессии в том, что при оценивании качество её аппроксимации никогда не хуже, чем качество линейной регрессии. На примере моделирования индекса потребительских цен по субъектам Сибирского федерального округа проведён сравнительный анализ характеристик оцененных линейных и модульных регрессий. Ни одна модульная регрессия ни по одной из рассмотренных характеристик не оказалась хуже соответствующей линейной регрессии. Показано, каким образом можно интерпретировать модульные регрессии. Результаты проведённых исследований могут быть использованы для повышения точности существующих математических моделей из различных отраслей наук, в частности, технических.

**Summary.** This article is devoted to an experimental study of the previously proposed new specification of regression models - modular regression. An algorithm for its numerical estimation using the ordinary least squares method is considered. The advantage of modular regression is that when estimating, the quality of its approximation is never worse than the quality of linear regression. Using the example of modeling the consumer price index for the subjects of the Siberian Federal District, a comparative analysis of the characteristics of the estimated linear and modular regressions was carried out. Not a single modular regression for any of the characteristics considered was worse than the corresponding linear regression. It is shown how modular regressions can be interpreted. The results of the research can be used to improve the accuracy of existing mathematical models from various branches of science, in particular engineering.

**Ключевые слова:** линейная регрессия, модульная регрессия, метод наименьших квадратов, коэффициент детерминации, t-критерий Стьюдента, индекс потребительских цен.

**Key words:** linear regression, modular regression, ordinary least squares, coefficient of determination, Student's t-test, consumer price index.

УДК 519.862.6

**Введение.** Актуальной в настоящее время является проблема обработки статистических данных [1; 2], накопленных в самых разных сферах человеческой деятельности. К одному из эффективных способов обработки данных относится регрессионный анализ [3; 4], применение которого приводит к построению регрессионной модели, т. е. уравнения, математически связывающего объясняемую и одну или несколько объясняющих переменных. С помощью регрессионной модели можно получать прогнозные значения [5] объясняемой переменной или можно использовать её для интерпретации [6], например для объяснения характера и степени влияния объясняющих переменных на выходной показатель.

Арсенал регрессионного анализа располагает множеством различных математических форм связи между моделируемыми переменными. Бессспорно, самой известной из них формой считается модель множественной линейной регрессии [3], которая весьма эффективно оценивается с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Более сложной формой считаются квазилинейные регрессии, которые линейны по неизвестным параметрам и поэтому также могут оцениваться с помощью МНК. При этом их качество аппроксимации справедливо в целом выше, чем у линейных регрессий. Качественный обзор существующих спецификаций регрессионных моделей можно найти в [7]. Самой сложной формой принято считать полностью нелинейные регрессии, для которых обычный МНК неприменим. Среди них хотелось бы выделить неэлементарные линейные регрессии [8; 9], представляющие собой синтез линейной конструкции с добавлением бинарных операций  $\min$  и  $\max$  для всех возможных пар объясняющих переменных. Данная статья посвящена исследованию модульных линейных регрессий [10; 11], для оценивания которых с помощью МНК и метода наименьших модулей разработана программа МОДУЛИР-1. Широкомасштабных испытаний этой программы на практике до текущего момента времени не проводилось.

Как отмечено в [12], задача построения качественных прогнозов инфляции чрезвычайно важна для Центрального банка. Решению этой задачи посвящено много научных статей. Так, в [12] апробирована модель прогнозирования месячной российской инфляции по номинальному обменному курсу, ставке MIACR и ценам на нефть, в [13] описывается метод комбинирования прогнозов, полученных по нескольким эконометрическим моделям, для индекса потребительских цен (ИПЦ). В [14] для прогнозирования инфляции применены нейронные сети, в [15] строится прогноз методом динамического усреднения моделей, в [16] прогнозирование осуществляется с помощью TVP-модели с байесовским сжатием параметров, в [17] на основе статистики запросов в Google Trends для прогнозирования построена модель, учитывающая психологические аспекты экономического поведения населения.

Цель настоящей работы состоит в проведении сравнительного анализа качества аппроксимации модульных и традиционных линейных регрессий на примере моделирования ИПЦ по статистическим данным субъектов Сибирского федерального округа.

**Постановка задачи.** Модель множественной модульной линейной регрессии [11] имеет вид

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j \cdot |x_{ij} - \lambda_j| + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $n$  – объём выборки;  $l$  – число объясняющих переменных;  $y_i$  –  $i$ -е значение объясняемой переменной  $y$ ;  $x_{ij}$  –  $i$ -е значение  $j$ -й объясняющей переменной  $x_j$ ;  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_l, \lambda_1, \dots, \lambda_l$  – неизвестные параметры;  $\varepsilon_i$  –  $i$ -я ошибка аппроксимации.

Если  $\lambda_j \in (-\infty, x_{\min}^j] \cup [x_{\max}^j, \infty)$ ,  $j = \overline{1, l}$ , где  $x_{\min}^j, x_{\max}^j$  – соответственно минимальное и максимальное значения  $j$ -й объясняющей переменной, то коэффициенты корреляции между переменными  $y$  и  $|x_j - \lambda_j|$  по абсолютной величине будут точно такими же, что и между переменными  $y$  и  $x_j$ . Поэтому в такой ситуации для любых значений объясняющих переменных оценивание модульной регрессии эквивалентно оцениванию классической линейной регрессии. Из этого следует, что при оценивании модульной регрессии любым методом качество её аппроксимации всегда не хуже, чем качество аппроксимации линейной регрессии.

К сожалению, модульная регрессия (1) относится к нелинейным по параметрам моделям, поэтому оценивать её необходимо численно. Алгоритм её численного оценивания с помощью МНК описан в [11]. Он состоит из четырёх шагов:

*Шаг 1.* Найти области возможных оценок параметров  $\lambda_j \in [x_{\min}^j, x_{\max}^j]$ ,  $j = \overline{1, l}$ .

*Шаг 2.* Выбрать на каждом отрезке  $[x_{\min}^j, x_{\max}^j]$  равномерным образом  $p$  точек.



*Шаг 3.* Перебирая точки с отрезков, оценить с помощью МНК методом «всех возможных регрессий» [18]  $(p+2)^l$  линейных по параметрам регрессий.

*Шаг 4.* Выбрать модель с минимальной величиной суммы квадратов остатков.

Полученные с помощью этого алгоритма МНК-оценки не являются оптимальными с точки зрения минимизации суммы квадратов ошибок. Но они будут близки к оптимальным при выборе очень большого числа точек  $p$ . При этом, естественно, будет возрастать вычислительная сложность задачи.

Приведённый алгоритм был ранее реализован в программном комплексе оценивания модульных линейных регрессий (ПК МОДУЛИР-1). Особенность программы в том, что она позволяет в процессе реализации метода «всех возможных регрессий» исключать линейные модели с хотя бы одним незначимым по t-критерию Стьюдента коэффициентом. В результате на выходе строится модульная регрессия абсолютно со всеми значимыми оценками при модулях. Однако такой регрессии в зависимости от выбранного критического значения t-критерия Стьюдента может вовсе не быть.

Была поставлена задача с помощью ПК МОДУЛИР-1 по статистическим данным субъектов Сибирского федерального округа построить модульные линейные регрессии зависимости ИПЦ от других индексных показателей. Особенность регрессионного моделирования в такой ситуации в том, что все переменные имеют примерно одинаковую дисперсию, поэтому для них лишь в редких случаях удаётся построить регрессию высокого качества. В этой связи особенно интересно посмотреть, как с задачей справляются модульные регрессии.

Для моделирования были использованы годовые временные ряды с сайта Федеральной службы государственной статистики (<https://rosstat.gov.ru/>) за период с 2000 по 2022 годы по следующим переменным:

$y$  – индекс потребительских цен (декабрь к декабрю предыдущего года, %);

$x_1$  – индекс цен производителей на строительную продукцию (декабрь к декабрю предыдущего года, %);

$x_2$  – индекс цен производителей сельскохозяйственной продукции (в процентах к предыдущему году);

$x_3$  – индекс цен приобретения промышленных товаров и услуг (в процентах к предыдущему году);

$x_4$  – индекс тарифов на грузовые перевозки (декабрь к декабрю предыдущего года, %).

Сначала для каждого субъекта с помощью МНК оценивалась линейная регрессия, затем – модульная. При оценивании модульных регрессий в ПК МОДУЛИР-1 число разбиений интервалов  $p$  выбиралось равным 10, а ограничение на значимость коэффициентов по t-критерию Стьюдента не ставилось. В результате для построения каждой модульной регрессии потребовалось методом «всех возможных регрессий» оценить  $12^4 = 20\,736$  линейных моделей. Для представленного объёма выборки эти задачи решаются за считанные секунды.

**Результаты моделирования.** В результате МНК-оценивания были получены следующие регрессионные модели.

*Республика Алтай:*

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 54,62 + 0,118x_1 + 0,023x_2 + 0,201x_3 + 0,163x_4 .$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 110,041 - 0,063 \cdot |x_1 - 96,591| - 0,688 \cdot |x_2 - 115,464| + 0,274 \cdot |x_3 - 95,9| + 0,288 \cdot |x_4 - 103,518| .$$

Во всех уравнениях в скобках под коэффициентами указаны наблюдаемые значения t-критериев Стьюдента.

**Базилевский М. П.**

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕКСА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ЦЕН ПО ДАННЫМ СУБЪЕКТОВ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЬНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

*Республика Тыва:*

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 66,963 - 0,012 x_1 + 0,329 x_2 + 0,066 x_3 - 0,003 x_4 .$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 118,08 + 0,494 \cdot |x_1 - 110,336| - 0,412 \cdot |x_2 - 131,709| - 0,202 \cdot |x_3 - 126,954| + 0,103 \cdot |x_4 - 121,273| .$$

*Республика Хакасия:*

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 79,873 + 0,044 x_1 - 0,028 x_2 + 0,114 x_3 + 0,134 x_4 .$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 118,11 + 0,086 \cdot |x_1 - 104,064| - 0,114 \cdot |x_2 - 100,354| + 0,199 \cdot |x_3 - 101,218| - 0,175 \cdot |x_4 - 170,791| .$$

*Алтайский край:*

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 73,903 + 0,027 x_1 + 0,009 x_2 + 0,248 x_3 + 0,036 x_4 .$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 115,197 + 0,218 \cdot |x_1 - 95,882| - 0,107 \cdot |x_2 - 106,154| - 0,437 \cdot |x_3 - 138,282| + 0,385 \cdot |x_4 - 111,191| .$$

*Красноярский край:*

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 71,498 - 0,007 x_1 - 0,009 x_2 - 0,085 x_3 + 0,434 x_4 .$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 120,062 + 0,14 \cdot |x_1 - 96,1| - 0,062 \cdot |x_2 - 138,582| + 0,226 \cdot |x_3 - 146,91| - 0,627 \cdot |x_4 - 141,9| .$$

*Иркутская область:*

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 52,58 + 0,141 x_1 - 0,021 x_2 + 0,206 x_3 + 0,185 x_4 .$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 111,821 + 0,159 \cdot |x_1 - 101,3| + 0,127 \cdot |x_2 - 120,536| - 0,263 \cdot |x_3 - 137,954| + 0,192 \cdot |x_4 - 104,4| .$$

*Кемеровская область:*

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 77,023 - 0,139 x_1 + 0,248 x_2 + 0,059 x_3 + 0,127 x_4 .$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 106,685 - 0,166 \cdot |x_1 - 94,445| + 0,27 \cdot |x_2 - 95,8| + 0,07 \cdot |x_3 - 108,154| + 0,177 \cdot |x_4 - 105,654| .$$



Новосибирская область:

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 72,958 + 0,032x_1 + 0,021x_2 + 0,074x_3 + 0,193x_4.$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 105,742 + 0,035 \cdot |x_1 - 99,836| + 0,137 \cdot |x_2 - 102,1| - 0,167 \cdot |x_3 - 116,082| + 0,247 \cdot |x_4 - 100,3|.$$

Омская область:

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 63,197 + 0,082x_1 + 0,043x_2 + 0,182x_3 + 0,104x_4.$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 121,583 + 0,135 \cdot |x_1 - 106,718| - 0,188 \cdot |x_2 - 111,809| + 0,237 \cdot |x_3 - 99| - 0,256 \cdot |x_4 - 167,136|.$$

Томская область:

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 64,964 + 0,034x_1 + 0,106x_2 + 0,185x_3 + 0,077x_4.$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 106,377 - 0,403 \cdot |x_1 - 113,154| + 0,2 \cdot |x_2 - 101,918| + 0,253 \cdot |x_3 - 99,9| + 0,097 \cdot |x_4 - 93,773|.$$

Сибирский федеральный округ:

Линейная регрессия:

$$\tilde{y} = 67,52 + 0,031x_1 + 0,015x_2 - 0,039x_3 + 0,268x_4.$$

Модульная регрессия:

$$\tilde{y} = 80,082 + 0,415 \cdot |x_1 - 110,718| + 0,24 \cdot x_2 - 0,431 \cdot |x_3 - 109,018| + 0,388 \cdot |x_4 - 105,418|. \quad (2)$$

Характеристики всех оцененных с помощью МНК линейных и модульных регрессий представлены в табл. 1.

В табл. 1:

$R_1$  – коэффициент детерминации  $R^2$  линейной регрессии;

$R_2$  – коэффициент детерминации модульной регрессии;

$R_{\text{абс}}$  – абсолютный прирост ( $R_2 - R_1$ );

$R_{\text{отн}}$  – относительный прирост ( $100 \cdot (R_2/R_1) - 100$ ) в процентах;

$T_1$  – число значимых по t-критерию Стьюдента регрессоров в линейной регрессии для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ ;

$T_2$  – число значимых по t-критерию Стьюдента регрессоров в модульной регрессии для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ ;

$Q_1$  – сумма модулей наблюдаемых значений t-критерия Стьюдента в линейной регрессии;

$Q_2$  – сумма модулей наблюдаемых значений t-критерия Стьюдента в модульной регрессии;

$Q_{\text{абс}}$  – абсолютный прирост ( $Q_2 - Q_1$ );

$Q_{\text{отн}}$  – относительный прирост ( $100 \cdot (Q_2/Q_1) - 100$ ) в процентах.

Таблица 1

## Характеристики линейных и модульных регрессий

<b>СФО и его субъекты</b>	<b>R<sub>1</sub></b>	<b>R<sub>2</sub></b>	<b>R<sub>абс</sub></b>	<b>R<sub>отн</sub></b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>Q<sub>1</sub></b>	<b>Q<sub>2</sub></b>	<b>Q<sub>абс</sub></b>	<b>Q<sub>отн</sub></b>
Республика Алтай	0,471	0,716	0,24	51,92	0	3	4,25	10,343	6,09	143,36
Республика Тыва	0,690	0,842	0,15	22,04	1	3	5,209	16,17	10,96	210,42
Республика Хакасия	0,694	0,739	0,04	6,48	1	2	5,12	7,436	2,32	45,23
Алтайский край	0,625	0,860	0,24	37,65	1	3	3,436	17,361	13,93	405,27
Красноярский край	0,848	0,887	0,04	4,67	1	3	8,524	15,294	6,77	79,42
Иркутская область	0,774	0,794	0,02	2,58	3	3	6,939	8,734	1,80	25,87
Кемеровская область	0,590	0,610	0,02	3,39	1	1	5,551	6,518	0,97	17,42
Новосибирская область	0,692	0,749	0,06	8,26	1	1	3,638	8,377	4,74	130,26
Омская область	0,624	0,686	0,06	9,89	1	2	6,419	11,013	4,59	71,57
Томская область	0,586	0,677	0,09	15,66	1	2	4,537	7,856	3,32	73,15
СФО	0,731	0,833	0,10	13,98	1	4	5,34	15,675	10,34	193,54
<b>Среднее</b>	<b>0,666</b>	<b>0,763</b>	<b>0,10</b>	<b>16,05</b>	<b>1,091</b>	<b>2,455</b>	<b>5,360</b>	<b>11,343</b>	<b>5,98</b>	<b>126,87</b>

По табл. 1 видно, что качество аппроксимации модульных регрессий во всех одиннадцати случаях оказалось выше, чем качество линейных регрессий. Действительно, значения коэффициентов детерминации для всех модульных регрессий оказались больше. Средний абсолютный прирост коэффициентов детерминации составил примерно 0,1. Самый маленький относительный прирост (2,58 %) наблюдается для Иркутской области, а самый большой (51,92 %) – для Республики Алтай. В среднем относительный прирост составил 16,05 %. Для использованных статистических данных с индексными показателями это весьма неплохой результат.

По показателям  $T_1$  и  $T_2$  модульные регрессии также ни разу не проиграли. Среднее число значимых регрессоров в модульных регрессиях оказалось 2,455 из 4, что на 125 % больше среднего числа в линейных регрессиях. Максимальное улучшение по показателям  $T_1$  и  $T_2$  наблюдается в данных по Сибирскому федеральному округу – получена модульная регрессия (2), в которой все регрессоры значимы по t-критерию.

По показателям  $Q_1$  и  $Q_2$  вновь одержали победу абсолютно все модульные регрессии. Причём средний относительный прирост по этим показателям составил 126,87 %, т. е. в модульных регрессиях наблюдаемые значения t-критериев Стьюдента МНК-оценок по абсолютной величине возросли примерно в 2,12 раз.

Поскольку единственной модульной регрессией со всеми значимыми по t-критерию Стьюдента коэффициентами оказалась модель (2) для Сибирского федерального округа, то было принято решение её интерпретировать. Для этого она была представлена в виде кусочно-заданной функции:

$$\tilde{y} = \begin{cases} 40,219 + 0,415x_1 + 0,24x_2 - 0,431x_3 + 0,388x_4, & \text{при } x_1 \geq 110,718, x_3 \geq 109,018, x_4 \geq 105,418, \\ 122,023 + 0,415x_1 + 0,24x_2 - 0,431x_3 - 0,388x_4, & \text{при } x_1 \geq 110,718, x_3 \geq 109,018, x_4 < 105,418, \\ -53,755 + 0,415x_1 + 0,24x_2 + 0,431x_3 + 0,388x_4, & \text{при } x_1 \geq 110,718, x_3 < 109,018, x_4 \geq 105,418, \\ 28,05 + 0,415x_1 + 0,24x_2 + 0,431x_3 - 0,388x_4, & \text{при } x_1 \geq 110,718, x_3 < 109,018, x_4 < 105,418, \\ 132,115 - 0,415x_1 + 0,24x_2 - 0,431x_3 + 0,388x_4, & \text{при } x_1 < 110,718, x_3 \geq 109,018, x_4 \geq 105,418, \\ 213,919 - 0,415x_1 + 0,24x_2 - 0,431x_3 - 0,388x_4, & \text{при } x_1 < 110,718, x_3 \geq 109,018, x_4 < 105,418, \\ 38,141 - 0,415x_1 + 0,24x_2 + 0,431x_3 + 0,388x_4, & \text{при } x_1 < 110,718, x_3 < 109,018, x_4 \geq 105,418, \\ 119,945 - 0,415x_1 + 0,24x_2 + 0,431x_3 - 0,388x_4, & \text{при } x_1 < 110,718, x_3 < 109,018, x_4 < 105,418. \end{cases}$$

Тогда справедлива следующая интерпретация.



Если индекс цен производителей на строительную продукцию  $x_1$  превосходит 110,718 %, то с ростом  $x_1$  на 1 % ИПЦ возрастает в среднем на 0,415 %. Если же  $x_1$  меньше 110,718 %, то с ростом  $x_1$  на 1 % ИПЦ убывает примерно на 0,415 %.

С ростом индекса цен производителей сельскохозяйственной продукции  $x_2$  на 1 % ИПЦ всегда только возрастает в среднем на 0,24 %.

Если индекс цен приобретения промышленных товаров и услуг  $x_3$  превосходит 109,018 %, то с ростом  $x_3$  на 1 % ИПЦ убывает в среднем на 0,431 %. Если же  $x_3$  меньше 109,018 %, то с ростом  $x_3$  на 1 % ИПЦ возрастает примерно на 0,431 %.

Если индекс тарифов на грузовые перевозки  $x_4$  превосходит 105,418 %, то с ростом  $x_4$  на 1 % ИПЦ возрастает в среднем на 0,388 %. Если же  $x_4$  меньше 105,418 %, то с ростом  $x_4$  на 1 % ИПЦ убывает примерно на 0,388 %.

## Заключение.

1. В результате проведённого статистического моделирования ни одна модульная регрессия ни по одному из рассмотренных критерии не оказалась хуже соответствующей линейной регрессии. Причём по величине коэффициента детерминации модульные регрессии превзошли линейные модели примерно на 16 %, по числу значимых по t-критерию Стьюдента регрессоров – на 125 %, а по сумме модулей наблюдаемых значений t-критерия Стьюдента – на 111,62 %.

2. Модульные регрессии отлично подходят для моделирования по индексным переменным, содержащим, например, значения относительных приростов каких-либо величин. Помимо того что такие модели будут всегда не хуже линейных регрессий по качеству аппроксимации, их можно ещё и интерпретировать, что продемонстрировано в данной работе на примере интерпретации модели (2).

3. Построенные в работе модульные регрессии не решают всех проблем прогнозирования ИПЦ в Сибирском федеральном округе, поскольку не учитывают многие другие влияющие на цены факторы. Однако проведённые в работе эксперименты подтверждают, что применение предложенных модульных конструкций в существующих на сегодняшний день модельных спецификациях может сделать их гораздо более точными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крянев, А. Метрический анализ и обработка данных / А. В. Крянев, Г. В. Лукин, Д. К. Удумян. – М.: Физматлит, 2012. – 308 с.
2. Косарев, Е. Методы обработки экспериментальных данных / Е. Косарев. – М.: Физматлит, 2008. – 207 с.
3. Montgomery, D. C. Introduction to linear regression analysis / D. C. Montgomery, E. A. Peck, G. G. Vining. – John Wiley & Sons, 2021.
4. Pardoe, I. Applied regression modeling / I. Pardoe. – John Wiley & Sons, 2020.
5. Кильдишев, Г. С. Анализ временных рядов и прогнозирование / Г. С. Кильдишев, А. А. Френкель. – М.: Ленанд, 2021. – 104 с.
6. Molnar, C. Interpretable machine learning / C. Molnar. – Lulu. com, 2020.
7. Хацкевич, Г. А. Двухфакторные производственные функции с заданной предельной нормой замещения / Г. А. Хацкевич, А. Ф. Проневич, М. В. Чайковский // Экономическая наука сегодня. – 2019. – № 10. – С. 169-181.
8. Базилевский, М. П. Метод построения неэлементарных линейных регрессий на основе аппарата математического программирования / М. П. Базилевский // Проблемы управления. – 2022. – № 4. – С. 3-14.
9. Базилевский, М. П. Отбор информативных операций при построении линейно-неэлементарных регрессионных моделей / М. П. Базилевский // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – № 5. – С. 30-35.
10. Базилевский, М. П. Оценивание модульных линейных регрессионных моделей с помощью метода наименьших модулей / М. П. Базилевский, А. Б. Ойдопова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 45. – С. 130-146.
11. Базилевский, М. П. Программное обеспечение для оценивания модульных линейных регрессий / М. П. Базилевский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3 (31). – С. 136-146.

**Базилевский М. П.**

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕКСА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ЦЕН ПО ДАННЫМ СУБЪЕКТОВ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЬНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

12. Третьяков, Д. В. Помогают ли высокочастотные данные в прогнозировании российской инфляции? / Д. В. Третьяков, Н. Д. Фокин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2021. – Т. 37. – № 2. – С. 318-343.
13. Андреев, А. Прогнозирование инфляции методом комбинирования прогнозов в Банке России / А. Андреев // Банк России. Серия докладов об экономических исследованиях. – 2016. – Т. 14. – С. 2-11.
14. Павлов, Е. Прогнозирование инфляции в России с помощью нейронных сетей / Е. Павлов // Деньги и кредит. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 57-73.
15. Стырин, К. Прогнозирование инфляции в России методом динамического усреднения моделей / К. Стырин // Деньги и кредит. – 2019. – № 1. – С. 3-18.
16. Полбин, А. В. Прогнозирование инфляции в России с помощью TVP-модели с байесовским сжатием параметров / А. В. Полбин, А. В. Шумилов // Вопросы статистики. – 2023. – Т. 30. – № 4. – С. 22-32.
17. Юревич, М. А. Инфляционные ожидания и инфляция: научастинг и прогнозирование / М. А. Юревич // Journal of Economic Regulation. – 2021. – Т. 12. – № 2. – С. 22-35.
18. Айвазян, С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1005 с.



Ефремов М. А., Ткачук А. А., Монастырский Д. Я., Ким К. К., Иванов С. Н.  
M. A. Efremov, A. A. Tkachuk, D. Ya. Monastyrskiy, K. K. Kim, S. N. Ivanov

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

### DESIGN OF THE ELECTROMECHANICAL DRIVE OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Ефремов Михаил Андреевич – инженер-электромеханик (Россия, Санкт-Петербург); 190013, г. Санкт-Петербург. E-mail: em@email.knastu.ru.

Mikhail A. Efremov – Electromechanic Engineer (Russia, Saint Petersburg); 190013, Saint Petersburg. E-mail: em@email.knastu.ru.

Ткачук Антон Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru.

Anton A. Tkachuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, «Electrical and Heat Power Engineering» Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); Russian Federation, 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9. E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru.

Монастырский Дмитрий Ярославович – аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: toe@pgups.ru.

Dmitriy Ya. Monastyrskiy – Postgraduate, «Electrical and Heat Power Engineering» Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); Russian Federation, 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9. E-mail: toe@pgups.ru.

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

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

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

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

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы определения размерных соотношений и электромагнитных нагрузок электромеханического привода для беспилотного летательного аппарата на основе классической теории электромагнитного преобразования энергии. Проведён анализ современных беспилотных летательных аппаратов, показаны основные технические ограничения их выполнения. Приведены требования к параметрам устройства, определяющие область его применения. Рассмотрены структура и аппаратная реализация основных элементов и модулей. Предложена трёхмерная модель проектируемого двигателя. Даны рекомендации по выбору типа и параметров исполнительных элементов. Приведены результаты электромагнитного расчёта бесколлекторного двигателя с учётом технических характеристик летательного аппарата. Определена аналитическая связь между параметрами исполнительного элемента и электромагнитными характеристиками электромеханического преобразователя. Получены рабочие характеристики в номинальном диапазоне скоростей вращения. Рассмотрен вариант системы управления двигателем на базе отечественных дискретных элементов.

**Summary.** The article shows the issues of determining the dimensional ratios and electromagnetic loads of an electromechanical drive for an unmanned aerial vehicle based on the classical theory of electromagnetic energy conversion are considered. The analysis of modern unmanned aerial vehicles is carried out; the main technical limitations of their implementation are shown. The requirements for the device parameters defining the scope of its application are given. The structure and hardware implementation of the main elements and modules are considered. A three-dimensional model of the projected engine is proposed. Recommendations on the choice of the type and parameters of the executive elements are given. The results of the electromagnetic calculation of the brushless motor are given, taking into account the technical characteristics of the aircraft. The analytical relationship between the parameters of the actuator and the electromagnetic characteristics of the electromechanical converter is determined. The operating characteristics in the nominal range of rotation speeds are obtained. A variant of the engine control system based on domestic discrete elements is considered.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, электромеханический привод, электромагнитные нагрузки, модель, проектирование.

**Key words:** unmanned aerial vehicle, electromechanical drive, electromagnetic loads, model, design.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00159, <https://rscf.ru/project/24-29-00159/>.*

УДК 621.313:681.511

**Введение.** Вопрос проектирования приводов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является достаточно актуальным, поскольку сами аппараты востребованы в различных отраслях [1]. Очевидно, что одним из критериев, обеспечивающих эффективность БПЛА в условиях ограниченного ресурса, является стоимость его комплектующих, основным из которых является силовая установка, реализуемая на основе двигателей внутреннего сгорания или электромеханических преобразователей.

При выборе типа привода необходимо обеспечить целый ряд проектных параметров: тяговое усилие, грузоподъёмность, весогабаритные соотношения, динамические характеристики, помехоустойчивость, надёжность при минимальной стоимости.

Применение двигателей внутреннего сгорания на БПЛА связано с ограниченной динамикой, сложным процессом управления, ограниченной высотой полётов, низкой защитой от обнаружения.

Использование привода на базе электродвигателей с интегрированной системой управления позволяет получить более высокие технические характеристики, в частности повысить скорость, улучшить управляемость, обеспечить требуемую наработку. Высокие энергетические характеристики и отсутствие дополнительного топливного оборудования, в сравнении с аналогичными по мощности двигателями внутреннего сгорания, расширяют область их применения. Несмотря на конструкционную простоту БПЛА, проектирование электромеханической системы для его привода связано с определёнными трудностями. Так, относительно невысокая мощность двигателя не позволяет использовать апробированные для преобразователей средней и большой мощности методики расчёта. Использование постоянных магнитов требует формализации и замены их на фиктивные источники намагничающей силы (НС). Существующие методы расчёта на практике приводят к необоснованно завышенным весогабаритным характеристикам. Увязка эксплуатационных требований к аппарату с его энергетическими и надежностными параметрами позволяет повысить эффективность БПЛА.

**Постановка задачи исследования.** Начальным этапом проектирования является обоснование требуемой мощности электродвигателя, передаваемой на исполнительный механизм, который представляет многолопастную систему тяговых элементов. На этом этапе не важен тип двигателя, поскольку определяются характеристические точки механической характеристики электромеханического преобразователя, связанные с режимами его работы (пуск, регулирование, реверс, но-



миналный режим, режим максимальной нагрузки). Объектом исследования на первом этапе является исполнительный механизм. На сегодняшний день апробированная методика решения обратной задачи нахождения размерных соотношений лопастного механизма по требуемым выходным характеристикам отсутствует, т. е. для проектирования электропривода, кроме вращающего момента и частоты, необходимо иметь информацию о количестве лопастей, их размерных соотношениях, профиле, наличии ограничивающих или направляющих элементов. Определение момента сопротивления, преодолеваемого электродвигателем, сводится к вариативной задаче, не имеющей однозначного решения. Такой подход предполагает наличие аэродинамических характеристик исполнительного элемента, которые могут быть получены аналитически, экспериментально на физических или имитационных моделях.

Для установления функциональной связи между размерными соотношениями исполнительного механизма и энергетическими характеристиками приводного двигателя аппарата обычно рассматривают параметр  $k_U$ , представляющий отношение количества оборотов электродвигателя на единицу приложенного напряжения при условии отсутствия нагрузки на валу (без лопастного механизма). На величину параметра  $k_U$  влияет число витков в обмотках статора, с увеличением их количества значение  $k_U$  снижается. При больших внешних диаметрах лопастного механизма, сопряжённого с приводом с высоким значением  $k_U$ , требуемые динамические характеристики могут быть обеспечены за счёт увеличения потребляемого тока. При проектировании необходимо учитывать, что  $k_U$  непосредственно влияет на величину как тока, так и допустимого напряжения. Соответственно, при определении обмоточных данных для двигателей с высоким  $k_U$  обмотки выполняются короче, что снижает максимальное допустимое напряжение и увеличивает потребляемый ток для одного и того же исполнительного механизма. При увеличении длины пропорционально увеличивается сопротивление обмотки, значение  $k_U$  уменьшается. Также необходимо отметить, что привод выполняется с большим числом полюсов магнитной системы для обеспечения заданных динамических характеристик БПЛА. В свою очередь, это приводит к увеличению сечения проводников обмотки с соответствующим снижением сопротивления и возрастанием мощности. Постоянные магниты, используемые для создания магнитного поля, часто выполнены на основе неодима, поскольку могут применяться при температурах до 120 °C, остаточная магнитная индукция  $B_r = 1,2$  Тл; коэрцитивная сила  $H_c = 910$  кА/м; магнитная энергия  $BH = 370$  кДж/м<sup>3</sup>.

Все размерные соотношения в БПЛА привязываются к характеристикам исполнительного механизма, определяющего не только эффективность работы электродвигателя, но и соответствие мощности привода аэродинамической нагрузке. Эффективность электродвигателя определяется отношением тяги во всём диапазоне мощностей к нагрузке и потребляемой мощностью или отношением тяги к потребляемому току. Обычно большая тяга требует большого тока, поэтому необходимо подбирать двигатели с максимальной тягой при минимальном токе. Напряжение источника питания выбирается в зависимости от типа аккумулятора, например, литий-ионный аккумулятор обеспечивает величину напряжения 24 В.

**Расчётная часть.** При определении мощности двигателя необходимо знать минимальную мощность, требуемую для вращения лопастной системы, определяемую назначением БПЛА (минимальное рекомендованное соотношение тягового усилия к весу 5:1).

Аналитически производительность лопастного механизма  $Q$  и развиваемого им давления  $H$  связана с полезной мощностью электропривода  $P_{2\text{ном}}$  выражением

$$P_{2\text{ном}} = \eta_{\text{лоп}} Q \cdot H, \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{лоп}}$  – коэффициент полезного действия лопастной системы.

Сложность выражения (1) обусловлена тем, что определяющие параметры в его правой части связаны нелинейной зависимостью [2–4], примерный вид которой показан на рис. 1.

Исходные данные для расчёта напорной характеристики лопастного механизма:

- действительный напор одной лопасти,  $H$ ;
- действительная производительность одной лопасти  $Q$ ;
- гидравлический и объёмный коэффициенты полезного действия  $\eta_g$  и  $\eta_o$ ;

- коэффициент  $K_\Lambda$ , учитывающий конечное число лопастей на теоретический напор исполнительного механизма.

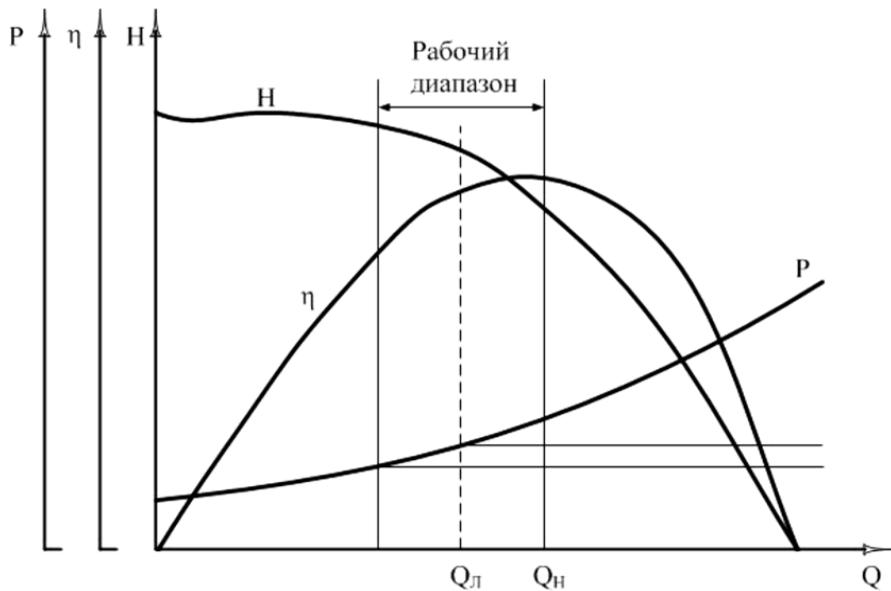


Рис. 1. Расчётные характеристики лопастного механизма

Пример расчёта двухлопастного исполнительного механизма приведён на рис. 2.

Аналитический расчёт позволяет ориентировочно найти мощность проектируемого двигателя, передаваемую на исполнительный механизм. Приближённый характер расчёта связан с неполным учётом проектных параметров и, как правило, требует верификации полученных результатов с использованием физической модели.

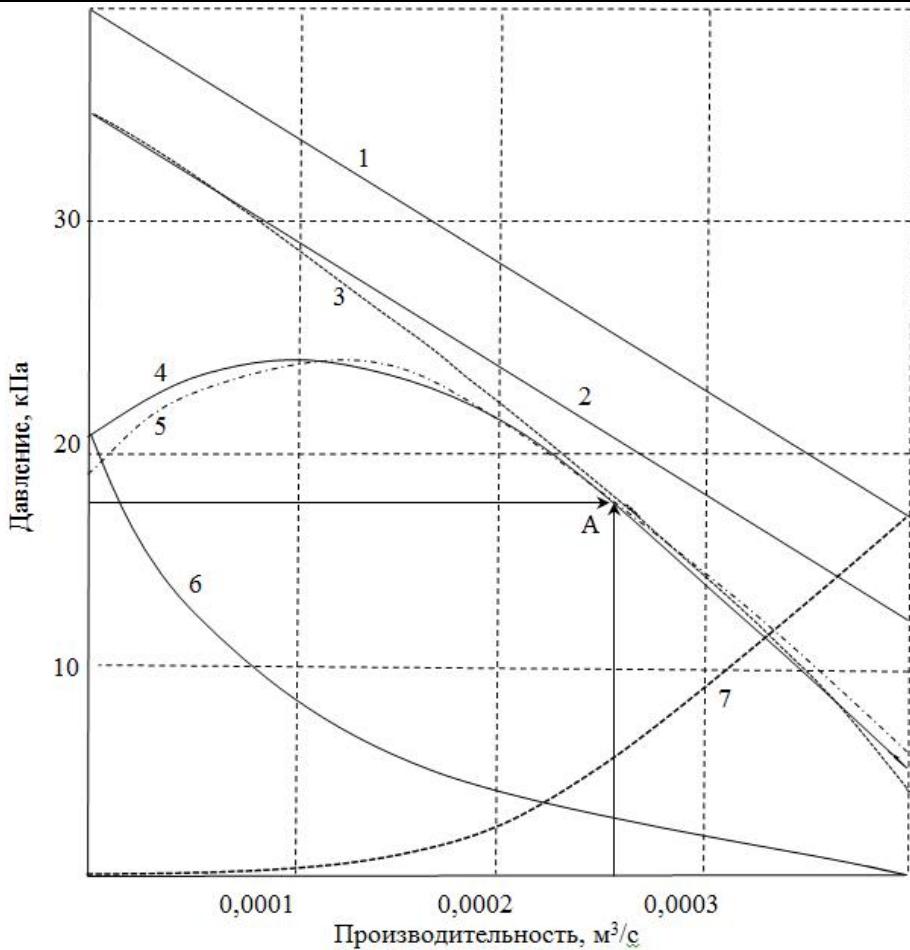
Экспериментальное исследование является наиболее точным, но требует наличия реального исполнительного механизма, что не только снижает эффективность проектирования, но и не позволяет найти оптимальный вариант привода. Его целесообразно выполнять после проведения компьютерного моделирования с целью подтверждения и возможного уточнения результатов.

Третий способ определения требуемой мощности, передаваемой лопастному механизму от приводного электродвигателя, основан на анализе результатов имитационного моделирования. С учётом доступных информационных источников для квадрокоптерных БПЛА широко применимы лопасти марки APC MR, имеющие высокие аэродинамические характеристики. Размерные соотношения и коэффициент полезного действия лопастного исполнительного механизма в первом приближении привязаны к его наружному диаметру. С учётом формы лопасти создаётся параметризованная трёхмерная модель лопастного механизма, с помощью которой обеспечивается сопряжение присоединительных и установочных размеров приводного двигателя (указанных в справочной литературе [5–7]).

Создание цифровой модели реализуется в CAD-редакторе (например, AutoCAD, T-Flex, Компас). В качестве проектных параметров задаются геометрические размеры, форма лопасти, шаг, внешний и внутренний диаметр посадочного кольца, количество лопастей.

На рис. 3, а показана цифровая модель двухлопастного винта типа APC 7x38WSF.

Далее файл преобразуется в формат STL, адаптированный для преобразования в G-код для управления 3D-принтером с использованием программ-слайсеров. Заключительной частью первого этапа является печать исполнительного механизма, физическая реализация которого из поликарбоната показана на рис. 3, б.



1 –  $H_{t\infty} = f(Q_t)$  – зависимость расчётного теоретического напора лопастного механизма

с бесконечно большим количеством лопастей при расчётном значении подачи;

2 –  $H_t = f(Q_t)$  – зависимость теоретического напора; 3 –  $H' = f(Q)$  – зависимость теоретического напора при конечном числе лопастей; 4 –  $H = f(Q_t)$  – расчётная характеристика при постоянной частоте вращения; 5 –  $H = f(Q)$  – действительная напорная характеристика;

6 –  $h_1$  – гидравлические потери на трение; 7 –  $h_2$  – ударные потери

Рис. 2. Расчётная характеристика лопастного механизма

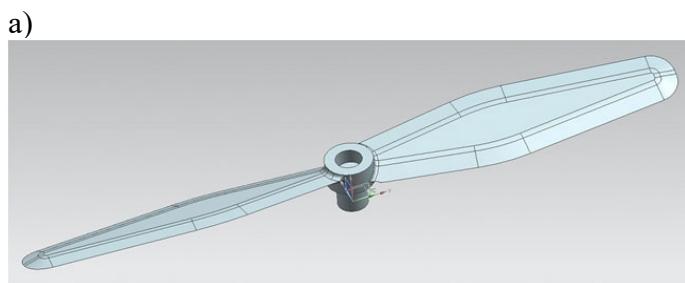


Рис. 3. Модель лопастного исполнительного механизма

Готовый лопастной механизм соединяется с тарированным приводным двигателем, обеспечивающим возможность снятия реальной аэродинамической характеристики и определения требуемой мощности и коэффициента полезного действия (КПД) в различных скоростных режимах. Полученная информация позволяет совместить механическую характеристику проектируемого двигателя и тяговую характеристику лопастного механизма.

**Выбор типа и элементов электродвигателя.** В БПЛА часто используются бесколлекторные синхронные двигатели с постоянными магнитами, управляемые микроэлектронным контроллером. Это связано с относительно небольшими размерами и весом аппарата, высоким использованием, широким диапазоном и плавностью регулирования, низким уровнем электромагнитных помех.

Конструктивная схема бесколлекторного двигателя (см. рис. 4) включает ротор 1, на котором размещены постоянные магниты, и статор с обмотками 2, число которых определяет его фазность.

Исходными данными для проектирования электродвигателя являются: тяговая сила, значение КПД лопастного механизма при различных скоростях вращения, напряжение питания, кривая размагничивания постоянных магнитов. Для обеспечения точности регулирования количество полюсов и постоянных магнитов выбирается достаточно большим. Для вычисления тяговой силы необходима информация об аэродинамических характеристиках лопастного механизма: диаметре пропеллера  $D$ ; коэффициентах тяги  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ ; коэффициентах мощности  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ ; оптимальном коэффициенте скорости  $\lambda_{\text{опт}}$ ; коэффициенте сопротивления лопастного механизма  $R_y$ .



Рис. 4. Физическая модель бесколлекторного двигателя

Результирующий коэффициент тяги

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_{\text{опт}} + \alpha_2 \lambda_{\text{опт}}^2.$$

Результирующий коэффициент мощности

$$\beta(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 \lambda_{\text{опт}} + \beta_2 \lambda_{\text{опт}}^2.$$

Тяга одного лопастного механизма

$$T = \alpha(\lambda) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^3,$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $n$  – частота вращения, оборотов в секунду,

$$n = \sqrt{\frac{M \cdot g}{z \rho D^4 [\alpha(\lambda) - R_y \lambda_{\text{опт}}^2]}}.$$

Мощность, затрачиваемая на вращение,

$$P = \beta(\lambda) \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D^5.$$



## Мощность электродвигателя

$$P_2 = \frac{P}{\eta_{\text{лоп}} \cdot \eta_{\text{дв}}}.$$

## Расчётная мощность электродвигателя

$$P_a = \frac{1 + 2\eta}{3\eta} P_2.$$

Обращаясь к теории электромагнитного преобразования энергии [8] и зная мощность электродвигателя, можно найти его конструктивные размеры. Уравнение Арнольда позволяет предварительно определить длину и диаметр сердечника статора:

$$C_A = \frac{D_a^2 \cdot l_\delta \cdot n}{P_2} = \frac{1}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot A_\delta \cdot B_\delta}, \quad (2)$$

где  $A_\delta$  – линейная нагрузка;  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре;  $\alpha_\delta$  – коэффициент полюсного перекрытия,  $\alpha_\delta = 0,75$ .

Произведение квадрата диаметра сердечника статора на его длину в соответствии с (2) можно представить в виде

$$D_a^2 \cdot l_\delta = \frac{P_2}{n \cdot \pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot A_\delta \cdot B_\delta}. \quad (3)$$

В электродвигателях постоянного тока малой мощности отношение длины  $l_\delta$  пакета якоря к его диаметру  $D_a$  обычно находится в пределах

$$\xi = \frac{l_\delta}{D_a} = 0,4 \dots 1,4.$$

Принимая значение  $\xi = 0,6$ , можно получить

$$l_\delta = 0,6D_a. \quad (4)$$

Диаметр якоря  $D_a$  находится из уравнения (3), и с учётом (4) полученное значение диаметра определяет длину  $l_\delta$ .

После нахождения основных размерных соотношений выполняется электромагнитный расчёт. Связь между намагничающей силой ( $Iw$ ) и электромагнитной мощностью ( $P_{\text{ЭМ}}$ ) позволяет вычислить необходимое количество витков обмотки сердечника якоря.

Электромагнитная сила, с которой взаимодействуют постоянный магнит и токовая обмотка,

$$F = (Iw) \cdot B_n \cdot l_\delta. \quad (5)$$

Электромагнитный момент

$$M_2 = F \cdot R_2,$$

где  $R_2$  – расстояние от втулки до конца сердечника полюса (см. рис. 5),

$$R_2 = \frac{D_a - d_{\text{в}}}{2},$$

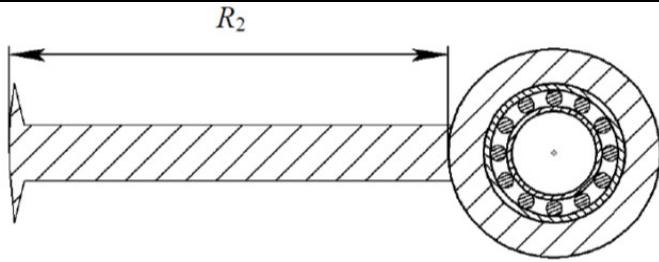
здесь  $d_{\text{в}}$  – внешний диаметр втулки.

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{ЭМ}} = M_2 \cdot \omega_2; \quad P_{\text{ЭМ}} = P_a,$$

где  $\omega_2$  – угловая скорость,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,

$$\omega_2 = \frac{\pi n}{30}.$$

Рис. 5. К определению  $R_2$ 

Подстановка в (5)  $l_\delta$  и  $B_n$  определяет намагничивающую силу:

$$Iw = \frac{F}{B_n \cdot l_\delta}.$$

Потребляемый двигателем ток

$$I = \frac{P_a}{U}.$$

Количество витков обмотки сердечника

$$w = \frac{Iw}{I}.$$

Предварительная плотность тока  $j'_2$ , выбранная по величине врачающего момента  $M_2$ , определяет сечение провода:

$$q'_2 = \frac{I}{2 \cdot j'_2}.$$

Окончательная плотность тока в проводнике обмотки якоря

$$j_2 = \frac{I}{2 \cdot q_2},$$

где  $q_2$  – нормированное сечение провода.

После определения обмоточных данных находятся геометрические размеры зубцовой зоны статора: высота сердечника  $h_c$ , высота  $h_{ш}$  и ширина шлица  $b_{ш}$ , средняя длина витка обмотки  $l_{ср}$ .

Величина воздушного зазора между статором и ротором принимается из технологических рекомендаций  $\delta = 0,5$  мм.

Нормализованные размеры статора определяют размеры ротора: толщину  $b_p$ , внутренний диаметр втулки  $r_2$ , по которому выбирается подшипник электродвигателя, внутренний диаметр ротора  $D_1$ :

$$D_1 = D_a + 2\delta + 2b_m,$$

толщину  $b_m$  и длину магнита  $l_m = l_\delta$ .

Внешний диаметр ротора  $D_H$

$$D_H = D_1 + 2b_p.$$

Длина ротора  $l_p$  выбирается больше длины сердечника ротора:

$$l_p = l_\delta + 0,005.$$

Длина вала

$$l_v = l_p + 0,025.$$

На рис. 6 представлена 3D-модель двигателя, спроектированного по рассмотренной методике, выполненная в T-Flex CAD.

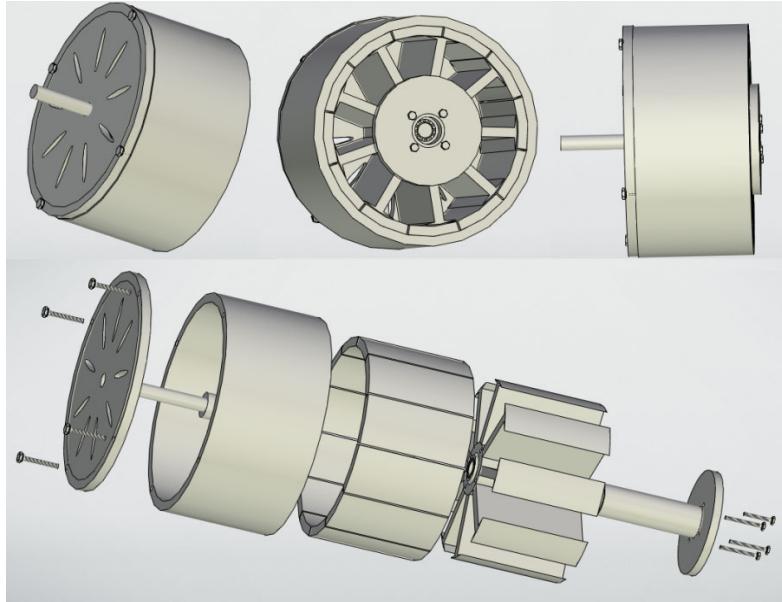


Рис. 6. 3D-модель двигателя

Для оценки эффективности привода рассчитываются рабочие характеристики двигателя в диапазоне частот  $0,7 \dots 1,18 n_{\text{ном}}$  [9].

Электрические потери в обмотке якоря:

$$P_{\text{эл}} = I_2^2 \cdot r,$$

где  $r$  – сопротивление обмотки возбуждения,

$$r = k_{\theta} \frac{2 \cdot p \cdot w \cdot l_{\text{cp}}}{57 \cdot q_2},$$

здесь  $k_{\theta}$  – температурный коэффициент.

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи

$$P_{c2} = p_{c2} \cdot B_{c2}^2 G_{c2},$$

где  $G_{c2}$  – масса сердечника;  $p_{c2}$  – удельные потери в стали:

$$G_{c2} = 5,5(D_a - 2h_c)^2 \cdot l_{\delta}, \quad p_{c2} = 2\varepsilon \left( \frac{f}{100} \right) + 2,5\rho \left( \frac{f}{100} \right)^2,$$

здесь  $f$  – частота перемагничивания стали якоря,

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Механические потери в электродвигателе (без учёта лопастной системы):

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{т.п}} + P_{\text{т.в}},$$

где  $P_{\text{т.п}}$  – потери на трение в подшипнике;  $P_{\text{т.в}}$  – потери на трение якоря о воздух.

Потери на трение в подшипнике приближённо определяются по формуле

$$P_{\text{т.п}} \approx k_m G_{c2} n \cdot 10^{-3},$$

где  $k_m$  – коэффициент для малых машин с шарикоподшипниками, равный 1...3.

Потери на трение якоря о воздух можно определить приближённо по формуле

$$P_{\text{т.в}} \approx 2D_a^3 \cdot n^3 \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-14}.$$

Добавочные потери

$$P_{\Delta} = 0,01 \cdot (P_{\text{эл}} + P_{\text{мех}} + P_{c2}).$$

Суммарные потери

$$\sum P = P_{\Delta} + P_{\text{эл}} + P_{\text{мех}} + P_{c2}.$$

Полная мощность электродвигателя

$$P_2 = I_2 \cdot U.$$

Полезная мощность электродвигателя

$$P_1 = P_2 - \sum P.$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_1}{P_2}.$$

Вращающий момент электродвигателя

$$M_2 = 955 \frac{P_2}{n}.$$

В табл. 1 приведены рабочие характеристики двигателя мощностью 500 Вт, 10 000 мин<sup>-1</sup>.

Таблица 1

#### Рабочие характеристики

<i>n</i>	о. е.	1,18 <i>n</i>	1,11 <i>n</i>	1,08 <i>n</i>	1,05 <i>n</i>	1 <i>n</i>	0,7 <i>n</i>
	мин <sup>-1</sup>	11 800	11 000	10 800	10 050	10 000	8000
<i>U</i>	В	24	24	24	24	24	24
<i>I</i> <sub>2</sub>	А	16,07	18,75	18,77	19,19	21,09	23,4
<i>P</i> <sub>эл</sub>	Вт	46,28	54,1	54,201	56,028	60,9	66,99
<i>P</i> <sub>c2</sub>	Вт	28,726	23,406	22,515	21,44	20,23	14,767
<i>P</i> <sub>мех</sub>	Вт	1,274	1,199	1,167	1,135	1,08	0,76
<i>P</i> <sub>Δ</sub>	Вт	0,076	0,078	0,077	0,078	0,09	0,082
$\sum P$	Вт	76,356	78,783	77,759	78,681	82,3	82,599
<i>P</i> <sub>1</sub>	Вт	309,324	371,217	372,721	381,879	423,867	479,001
<i>P</i> <sub>2</sub>	Вт	385,68	450	450,48	460,56	506,167	561,6
η	%	82	82,7	82,4	82,9	83,74	85,29
<i>M</i> <sub>2</sub>	Н·м	0,265	0,439 44	0,447 58	0,460 37	0,483 39	0,644 24

**Заключение.** В статье проведён анализ приводов, используемых в БПЛА. Показаны преимущества применения электродвигателей. Предложена упрощённая методика определения размерных соотношений, электромагнитных нагрузок бесколлекторного двигателя с постоянными магнитами. Приведены рабочие характеристики и компьютерная модель в программе T-Flex CAD одного из вариантов двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Патент 2791914 Российская Федерация, МПК В64С 39/02 (2006.01), G01R 31/08 (2006.01). Беспилотный летательный аппарат для диагностики высоковольтных электроустановок: № 2022129097: заявлено 08.11.2022; опубликовано 14.03.2023 / Ким К. К., Панычев А. Ю.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2 с.
- Костышин, В. С. Моделирование режимов центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В. С. Костышин. – Иваново-Франковск : ИФГТУНГ, 2000. – 163 с.



3. Шафиков, И. Н. Повышение энергоэффективности электроприводов погружных электроцентробежных насосов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Шафиков Игорь Наилевич; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2020. – 176 с.
4. Иванов, С. Н. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
6. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 1 / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
7. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 2 / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
8. David C. White, Herbert H. Woodson. Electromechanical Energy Conversion, New York, John Wiley and Sons, Inc. 1959. – 528 p.
9. Иванов, С. Н. Разработка электромеханической системы для привода беспилотного летательного аппарата / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. А. Ефремов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 5-11 декабря 2022 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – Ч. 1. – С. 193-196.
10. К вопросу проектирования энергетической установки на основе водородных топливных элементов для малых беспилотных летательных аппаратов / А. В. Павленко [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2023. – Т. 66. – № 1. – С. 5-13.
11. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия вузов. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
12. Krishna K. R. Unmanned aerial vehicle systems in crop production / K. R. Krishna. – Apple academic press, 2019. – 710 p.
13. Ram Avtar. Unmanned aerial vehicle: applications in agriculture and environment / Ram Avtar, Teiji Watanabe. – Springer, 2020. – 202 p.
13. Колесник, М. Б. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Известия вузов. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.
14. Колесник, М. Б. Анализ напряжённо-деформированного состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII (55). – С. 43-47.
15. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов / А. А. Анучин. – М.: Издательский дом «МЭИ», 2015. – 373 с.
16. Мелешин, В. И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В. И. Мелешин, Д. А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2015. – 576 с.
17. Гаврилов, С. В. Управление электроприводом на основе бесколлекторного двигателя с постоянными магнитами / С. В. Гаврилов, Д. Т. Занг, Н. Д. Тхань // Известия Санкт-Петербургского гос. электротехнического университета ЛЭТИ. – 2016. – Т. 8. – С. 53-62.

**Космынин А. В., Щетинин В. С., Марьин С. Б.**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОМАГНИТНЫХ ОПОРАХ  
ЗА СЧЁТ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИЛОЙ

**Космынин А. В., Щетинин В. С., Марьин С. Б.**

**A. V. Kosmynin, V. S. Shchetinin, S. B. Maryin**

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОМАГНИТНЫХ ОПОРАХ ПУТЁМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИЛОЙ**

### **IMPROVEMENT OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF THE SPINDLE ASSEMBLY ON GAS-MAGNETIC SUPPORTS BY ADAPTIVE CONTROL OF THE MAGNETIC FORCE**

**Космынин Александр Витальевич** – доктор технических наук, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: prorector-nr@knastu.ru.

**Alexander V. Kosmynin** – Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for Scientific Work, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: prorector-nr@knastu.ru.

**Щетинин Владимир Сергеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Vladimir S. Shchetinin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: schetynin@mail.ru.

**Марьин Сергей Борисович** – доктор технических наук, заведующий кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: as@knastu.ru.

**Sergey B. Maryin** – Doctor of Technical Sciences, Head of Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27 Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: as@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние магнитной силы на выходные характеристики высокоскоростного шпиндельного узла металлорежущего станка с передней газомагнитной опорой и задней газостатической. Проанализированы зависимости нагрузки и жёсткости, измеренные на режущем инструменте шпиндельного узла, от изменения магнитной силы в опоре и влияние управления тяговым усилием электромагнита на точность вращения шпинделя и его основные характеристики.

**Summary.** The paper considers the influence of magnetic force on the output characteristics of a high-speed spindle assembly of a metal-cutting machine tool with a front gas-magnetic support and a rear gas-static support. The dependences of load and stiffness measured on the cutting tool of the spindle assembly depending on the change of magnetic force in the support and the influence of electromagnet thrust force control on the spindle rotation accuracy and its main characteristics are analyzed.

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, управление, газомагнитная опора шпинделя, несущая способность, жёсткость шпиндельного узла.

**Key words:** spindle assembly, control, gas magnetic spindle support, bearing capacity, rigidity of the spindle assembly.

УДК 62-229.331:621.924

Повышение точности изготовления деталей является важнейшей задачей станкостроения. К современным высокоточным станкам, например расточной и шлифовальных групп, предъявляют требования по точности формы рабочих поверхностей до десятых долей микрометра и чистоте поверхности  $R_a \leq 0,08$  мкм. Достичь таких параметров обработки возможно за счёт малых усилий

резания и высоких скоростей обработки, а также жёсткости системы станок – приспособление – инструмент – заготовка (СПИЗ). Одним из главных узлов в цепи СПИЗ является шпиндельный узел (ШУ) металлообрабатывающего станка, обеспечивающий до 85 % точности, которая, в свою очередь, достигается за счёт точности вращения шпинделя в подшипниковом узле.

В современных конструкциях высокоскоростных ШУ применяют подшипники качения, гидростатические, гидродинамические, газостатические, магнитные и газомагнитные опоры.

В работах [1; 5] выполнен достаточно подробный анализ применения тех или иных типов опор в высокоскоростных шпиндельных узлах в зависимости от технологии и условий обработки. В данных работах показано, что применение комбинированных газомагнитных опор (ГМО) в шпиндельных узлах оправдано для финишной обработки отверстий малых диаметров до 30...40 мм с точностью до 1,0...0,4 мкм.

На рис. 1 представлены нагрузочные и жёсткостные характеристики на режущем инструменте шпиндельного узла с передней газомагнитной опорой и задней газостатической, полученные теоретическим и экспериментальным способом. Методики расчёта характеристик и проведения серии физических наблюдений подробно изложены в работах [2; 3].

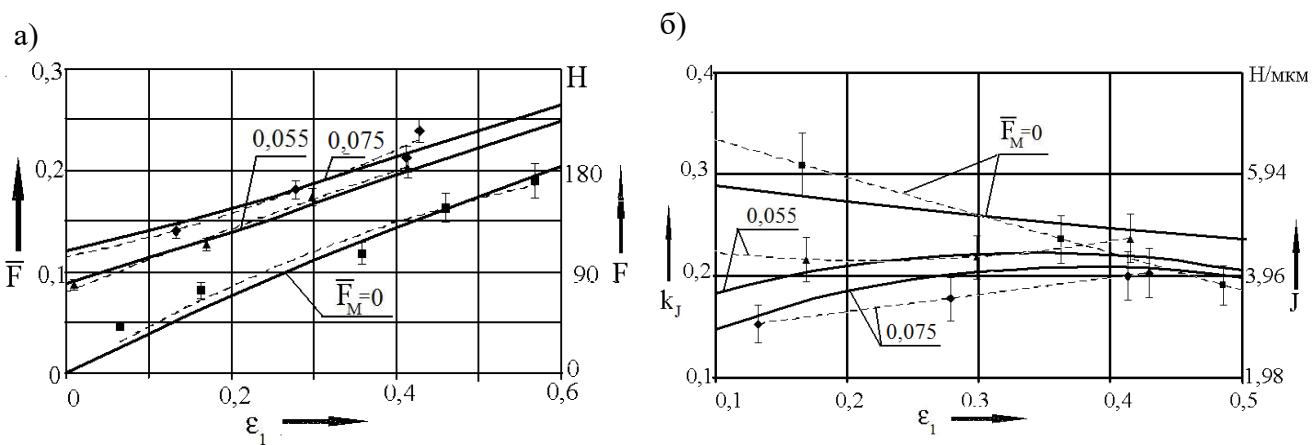


Рис. 1. Зависимость нагрузки  $F$  (относительной нагрузки  $\bar{F}$ ) (а) и жёсткости  $J$  (коэффициента жёсткости  $k_J$ ) (б) от удельной магнитной силы  $\bar{F}_m$  и относительного эксцентризитета передней опоры  $\epsilon_1$ : — теория; - - - эксперимент

Анализ выходных характеристик ШУ показывает, что при работе передней опоры с включённым электромагнитом ( $\bar{F}_m = 0,055$  и  $0,075$ ) нагрузка на режущем инструменте значительно выше, чем при отключённом электромагните. При этом жёсткость на режущем инструменте при  $\bar{F}_m \neq 0$  заметно снижается. Это позволяет сделать вывод, что такой режим работы передней газомагнитной опоры может быть использован на черновых и предварительных операциях обработки заготовки, когда требуются повышенные силы резания и менее значима точность обработки.

Из зависимостей, представленных на рис. 1, б, также следует, что повысить жёсткость ШУ с передней газомагнитной опорой можно путём управления режимом её работы. Система управления радиальной газомагнитной опорой должна работать по принципу замкнутой системы, т. е. когда расстояние от внутренней поверхности вкладыша опоры до вала непрерывно регистрируется сигналами датчиков, потом сформированный сигнал подаётся на регулятор, который формирует управляющий ток в катушках электромагнитов.

Принцип, положенный в основу системы управления, является раздельным, т. к. радиальная ГМО имеет три раздельных электромагнита, расположенных под углом  $120^\circ$  друг к другу [4], общим является блок задания эксцентризитета (см. рис. 2).

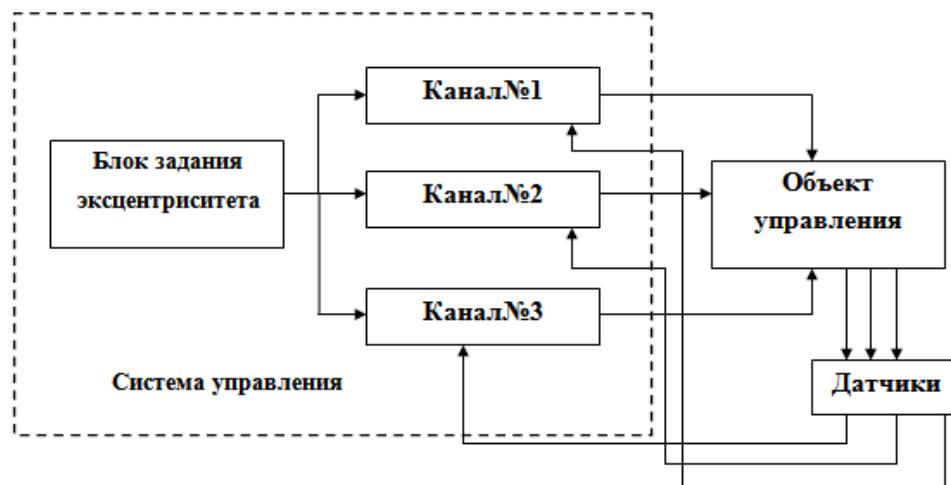
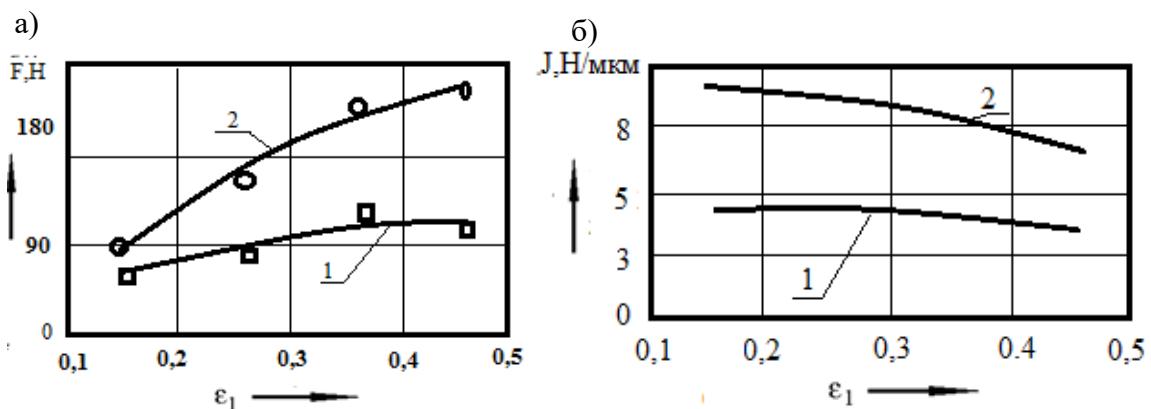


Рис. 2. Структурная схема системы управления радиальной газомагнитной опорой

На рис. 3 представлены зависимости нагрузки  $F$  и жёсткости  $J$  газомагнитной опоры шпиндельного узла, полученные с использованием управления режимом работы электромагнитов, обеспечивающих поддержание заданных эксцентрикитетов  $\varepsilon_1$ . В экспериментах частота вращения вала составляла 21 000 мин<sup>-1</sup>.

Рис. 3. Зависимость нагрузки  $F$  (а) и жёсткости  $J$  (б) от относительного эксцентрикитета:  
1 – при отключённом электромагните; 2 – при включённом электромагните  
в режиме автоматического управления

Из представленных зависимостей видно, что управление тяговым усилием в электромагнитах ГМО ведёт не только к увеличению нагрузки, но и способно заметно повысить жёсткость. Значение жёсткости во многом зависит от чувствительности и быстродействия системы управления.

Наличие системы управления тяговым усилием ГМО также благоприятно сказывается на точности вращения вала. По сигналам с датчиков обратной связи реконструирована траектория движения оси шпинделя без активного управления и с активным управлением магнитными силами, представленная на рис. 4. Эксперименты выполнены при частоте вращения вала 25 000 мин<sup>-1</sup> и относительном эксцентрикете передней опоры 0,45.

Реконструированные траектории показывают, что при вращении шпинделя с включённым магнитным подвесом с активным управлением уменьшается амплитуда размаха эллипса оси шпинделя до 55 %. Это позволяет примерно на 45 % повысить точность вращения шпинделя и, соответственно, повысить точность обработки детали на финишных операциях.

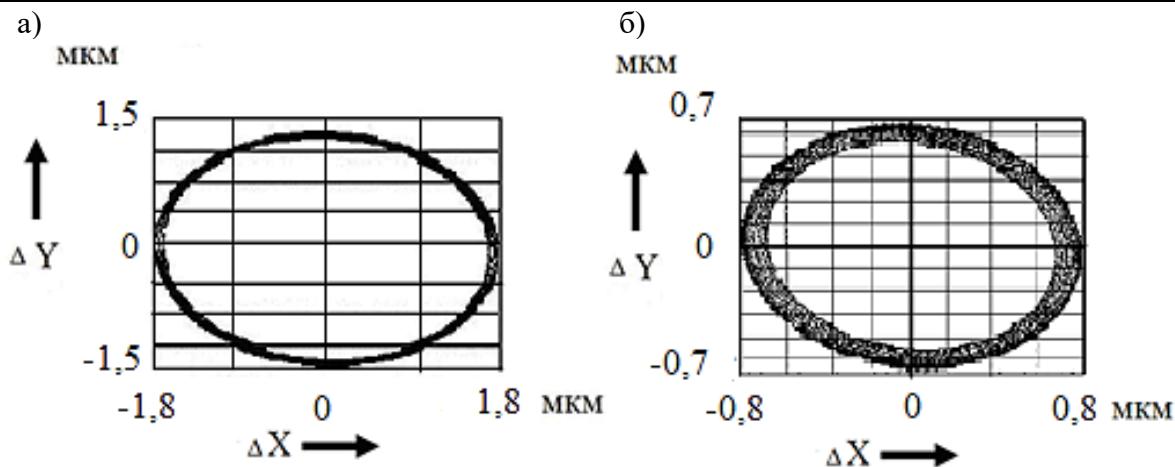


Рис. 4. Экспериментальный годограф оси вала в опоре: а – ГМО без активного управления, б – ГМО с активным управлением

Совокупный анализ комплекса выполненных исследований позволяет сделать вывод, что установка шпинделя на газомагнитную опору (передний подшипник ШУ) и газостатическую опору (задний подшипник ШУ) позволяет заметно увеличить нагрузку на режущий инструмент, но при этом на нём заметно снижается жёсткость. Эксплуатация ШУ при таком режиме работы опор целесообразна на черновых и предварительных операциях обработки заготовки. Наличие системы управления тяговым усилием электромагнитов ГМО является мощным средством повышения не только жёсткости на режущем инструменте ШУ, но и точности вращения шпинделя.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бесконтактные опоры высокоскоростных роторных систем. Эксплуатация и проектирование: моногр. / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов [и др.]; под общ. ред. А. В. Космынина. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 372 с.
- Космынин, А. В. Расчёт несущей способности газомагнитных опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А. В. Космынин, В. С. Щетинин // СТИН. – 2010. – № 9. – С. 6-8.
- Стенд для исследования выходных характеристик шпиндельного узла на газомагнитных опорах / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, Н. А. Иванова [и др.] // СТИН. – 2010. – № 5. – С. 8-11.
- Управление работой газомагнитной опоры / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. В. Ульянов [и др.]; под общ. ред. А. В. Космынина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – 128 с.
- Щетинин, В. С. Научное обоснование создания и разработка высокоскоростных шпиндельных узлов на газомагнитных опорах металорежущих станков: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Щетинин Владимир Сергеевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2011. – 160 с.
- Эволюция отечественных исследований математического моделирования процессов подачи жидкого металла в кристаллизатор и его перемешивание / Э. А. Дмитриев, В. А. Карпенко, В. И. Одиноков, А. И. Евстигнеев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 59-67.

**Саяпина П. О., Крупский Р. Ф., Черный С. П., Савельев Д. О.**  
**P. O. Sayapina, R. F. Krupsky, S. P. Cherniy, D. O. Savelyev**

## АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ

### ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC ACCELERATOR RESEARCH PROBLEM

**Саяпина Полина Олеговна** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kerapu@knastu.ru.

**Polina O. Sayapina** – Postgraduate, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kerapu@knastu.ru.

**Крупский Роман Фаддеевич** – кандидат технических наук, главный научный сотрудник – руководитель научно-производственного инжинирингового центра Филиала ПАО «ОАК» – КнААЗ имени Ю. А. Гагарина (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: roman\_krupskiy@rambler.ru.

**Roman F. Krupsky** – PhD in Engineering, Chief Researcher – Head of the Scientific and Production Engineering Center of the Branch of PJSC «UAC» – KnAAZ named after Yu. A. Gagarin (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: roman\_krupskiy@rambler.ru.

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

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

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

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

**Аннотация.** Показана актуальность исследования электромагнитного ускорителя ферромагнитных частиц для дробемётных (дробеструйных) аппаратов. Рассмотрены устройства ускорения сыпучих ферромагнитных сред, и выявлено, что наиболее перспективными являются устройства, принцип действия которых основывается на взаимодействии магнитного момента ферромагнитных частиц с импульсным магнитным полем. Приведена методика расчёта движения ферромагнитных сред в магнитном поле. Описан порядок выбора выходных параметров, и показаны этапы научно-исследовательской работы. Приводятся описание структурной схемы и назначение основных блоков и модулей.

**Summary.** The relevance of the study of the electromagnetic accelerator of ferromagnetic particles for shot blasting (shot blasting) devices is shown. Devices for accelerating bulk ferromagnetic environment are considered and it is revealed that the most promising devices are those whose principle of operation is based on the interaction of the magnetic moment of ferromagnetic particles with a pulsed magnetic field. A method for calculating the motion of ferromagnetic media in a magnetic field is presented. The procedure for selecting output parameters is described and the stages of research work are shown. A description of the block diagram and the purpose of the main blocks and modules is given.

**Ключевые слова:** электромагнитный ускоритель, магнитное поле, ферромагнитная среда.

**Key words:** electromagnetic accelerator, magnetic field, ferromagnetic medium.



УДК 681.5

**Введение.** В литейном и формообразующем производстве широко применяется обработка поверхностей изделий, полученных после изготовления, ферромагнитной дробью или абразивом. Такие технологические процессы осуществляются с помощью устройств (дробемётных или дробеструйных аппаратов), в которых происходит ускорение частиц ферромагнитного материала за счёт использования энергии движущихся газов, жидкостей или механической энергии различных тел вращения. Однако такие устройства не удовлетворяют современным требованиям с точки зрения надёжности, экономичности и экологии.

Главный недостаток этих устройств – быстрый износ рабочих поверхностей аппаратов, по которым дробь или абразив скользят под действием центробежной силы, ввиду большого трения частиц ферромагнитного материала о поверхность. Для работы аппаратов требуются большие затраты энергии.

На поверхность обрабатываемых изделий из аппаратов выбрасывается расходящийся поток (факел) частиц. Для эффективной обработки импульс силы, передаваемый частицами ферромагнитного материала поверхности обрабатываемого изделия, должен иметь достаточно большую величину. Поскольку он равен произведению массы отдельной частицы на скорость, то для получения необходимого импульса силы при малой массе частиц последние разгоняются в таких устройствах до высоких скоростей порядка 60-80 м/с.

Широкий факел разгоняемых частиц резко снижает эффективность использования аппаратов при обработке малогабаритных изделий. Кроме того, при эксплуатации таких устройств создаются неблагоприятные санитарно-гигиенические условия на рабочих местах. Ограничена возможность автоматизации работы аппаратов.

Одним из общепризнанных направлений в разработке устройств, отвечающих запросам современных технологий, является непосредственное использование электромагнитных сил для ускорения сыпучих ферромагнитных материалов, представляющих собой сыпучую ферромагнитную среду. О перспективности этого направления свидетельствует широкое практическое применение взаимодействия магнитного поля с сыпучей ферромагнитной средой в электромагнитных методах сепарации и магнитно-абразивной обработки. Однако в разработке устройств электромагнитного ускорения сыпучих ферромагнитных материалов до сих пор наблюдается заметное отставание. Несмотря на многочисленные авторские свидетельства и патенты в этой области, промышленных аппаратов не создано.

Для решения задач по зачистке и/или формообразованию дробью необходимо задать дроби первоначальную кинетическую энергию при помощи ускорения. Задача ускорения дроби необходима как для зачистки металлической заготовки, так и для формообразования. Принцип ускорения заключается в придании изначально статичному телу дроби некоторой кинетической энергии.

Для придания ускорения необходимо задать импульс. Физически приданье какого-либо ускорения телу передаётся при помощи воздействия – механического или электрического импульса. Как для любого вектора, для импульса важна не только величина, но и направление.

Физическими способами ускорения дроби могут быть:

- ускорение дроби при ударении о механические лопатки. Разгон дроби при помощи лопаток осуществляется в дробемётной установке. Основным рабочим механизмом дробемётной установки является дробемётная турбина. Она конструктивно состоит из двигателя, на котором закреплено рабочее колесо с лопатками, помещённое в стальной экранирующий короб. Специальный профиль лопаток позволяет за счёт вращения рабочего колеса с очень большой скоростью (1500-7500 об/мин) создавать центробежную силу, обеспечивающую разгон дроби до 90 м/с. Лопатки дробемётной турбины выполняются из износостойкого высокохромистого чугуна. Скорость вращения лопаток регулируется для подбора оптимального режима подачи дроби;

- ускорение дроби при помощи сжатого воздуха. Устройство дробеструйной установки подразумевает наличие специальной камеры со сжатым воздухом, в которой абразивные частицы набирают ускорение. При запуске аппарата дробь попадает под струю сжатого воздуха, который

сообщает дроби большую кинетическую энергию – это приводит к серьёзному разгону. Под действием струи сжатого воздуха дробь на большой скорости вылетает из распылителя и ударяется о поверхность металла. Если на поверхности металлического объекта есть какие-либо посторонние частицы (грязь, пыль, мусор, ржавчина, окалина и т. д.), то дробь сообщает таким частицам большое количество кинетической энергии. Это приводит к тому, что из-за избытка кинетической энергии посторонние частицы слетают с поверхности, что приводит к очистке металла. Под давлением абразивной струи удаляется весь старый слой с поверхности заготовки;

- ускорение дроби при помощи электрических и/или электромагнитных ускорителей.

У каждого способа имеются недостатки и функциональные ограничения. К примеру, при ускорении дроби при помощи удараения о лопатки рабочего колеса не вся дробь прилетает в область зачистки. Есть вероятность навредить сотруднику, работающему в непосредственной близости к данной установке.

Что касается очистки и/или обработки заготовок с ускорением дроби при помощи сжатого воздуха, то данные аппараты могут быть применимы на локальных участках производства, т. к. площадь обработки мала. При обработке мелких металлических деталей есть риск их повреждения из-за высокого давления. Толщина обрабатываемой металлоконструкции не должна быть менее 3 мм, в противном случае рельеф покрытия на металле после такой очистки может быть неровным, внешне напоминая лимонную корку. Нежелательно для обработки использовать детали в масле, т. к. это негативно скажется на конечном результате.

Из совокупности вышеуказанных способов придания ускорения дроби наиболее интересным для производства является вариант ускорения дроби при помощи электромагнитного импульса. Поскольку в большинстве случаев дробь для рассматриваемых задач (зачистки/формообразования) ферромагнитная, то импульс можно создавать при помощи нескольких индукторов (индукционных катушек). Полученным электромагнитным импульсом можно управлять, регулируя входные электрические характеристики, такие как ток и напряжение.

Практическая разработка устройств электромагнитного ускорения сыпучей ферромагнитной среды сильно сдерживается отсутствием надёжных методов определения электромагнитных характеристик таких устройств.

На начальном этапе решения задачи разработки инженерных методов расчёта электромагнитных характеристик устройств необходимо в первую очередь сделать правильный выбор физической модели, в которой возможно наиболее эффективное использование энергии взаимодействия частиц ферромагнитного материала с магнитным полем. Поэтому представляет интерес оценка уже известных идей создания устройств ускорения сыпучей ферромагнитной среды с целью выделения устройств с таким принципом действия, имеющих такие конструктивные особенности, которые позволяют свести к минимуму недостатки механических аналогов.

*Устройства с магнитным удержанием частиц на поверхности врачающегося ротора механического дробёметного аппарата.* В этих устройствах за счёт силового воздействия магнитного поля ферромагнитные частицы удерживаются на поверхности врачающегося ротора. Поскольку в предлагаемых устройствах отсутствует скольжение частиц по поверхности врачающегося ротора под действием центробежной силы, следует ожидать, что в них износ поверхности будет существенно меньше, чем в механических аналогах. Однако некоторые существенные недостатки, свойственные механическим аналогам, остаются непреодолёнными. По-прежнему требуются большие затраты электроэнергии для получения высоких частот вращения ротора, сообщающего ферромагнитным частицам необходимую выходную скорость, и поэтому коэффициент полезного действия рассматриваемых устройств не может быть выше, чем у механических аналогов. Таким же широким остаётся и факел разгоняемых частиц.

Предлагаются конструкции устройств для ускорения сыпучей ферромагнитной среды, работа которых основана на принципе действия асинхронных двигателей или с вращающимся/бегущим магнитным полем. Достоинством этих устройств является то, что, в отличие от устройств с магнитным удержанием ферромагнитных частиц, в них может происходить прямое преобразование электроэнергии в кинетическую энергию ферромагнитных частиц. Однако практи-



тически применить предлагаемые устройства для ускорения сыпучей ферромагнитной среды достаточно сложно.

Сыпучая ферромагнитная среда в устройствах, в которых предлагаются использовать принцип действия классических асинхронных двигателей с врачающимся магнитным полем, должна двигаться по спиралевидной направляющей трубе из немагнитного и непроводящего материала. В этом случае траектория движения частиц из ферромагнитного материала представляет собой вращательно-поступательное перемещение. На частицы будут действовать центробежные силы, прижимающие их к стенкам трубы. Поэтому будет происходить быстрый износ направляющей трубы из-за сильного трения частиц о стенки трубы, как и при механическом способе разгона сыпучей ферромагнитной среды.

Трение частиц ферромагнетика о стенки направляющей трубы станет существенно меньше, если перемещение частиц будет происходить по прямой направляющей трубе разгона. Такой отличительной конструктивной особенностью обладают предлагаемые в авторских свидетельствах и патентах устройства, работа которых основана на использовании принципа действия линейных асинхронных двигателей. Тем не менее практическое применение таких устройств для ускорения сыпучей ферромагнитной среды может также натолкнуться на определённые трудности, обусловленные свойствами токопроводящих ферромагнитных частиц, из которых состоит сыпучая ферромагнитная среда. Поскольку они обладают большим электрическим сопротивлением, индукционные токи в них не могут достигать значительных величин. Электромагнитные силы, действующие на частицы и обусловленные взаимодействием бегущего магнитного поля с индукционными токами, также не могут быть большими. Поэтому движение сыпучей ферромагнитной среды по направляющей трубе будет происходить существенно асинхронно с магнитным полем и для сообщения частицам необходимой высокой скорости потребуется труба с длиной, во много раз превосходящей расстояние, определяемое заданной скоростью бегущего магнитного поля. Следовательно, массогабаритные размеры рассматриваемых устройств должны быть достаточно солидными.

Скорость бегущего магнитного поля можно увеличить, а длину направляющей трубы, соответственно, уменьшить, если повысить частоту тока, питающего катушки индуктора, которые создают магнитное поле. Однако это повлечёт за собой применение достаточно громоздких мощных преобразователей частоты и в конечном итоге не позволит решить проблему существенного уменьшения массогабаритных размеров предлагаемых устройств ускорения сыпучей ферромагнитной среды.

Другим существенным недостатком этих устройств является разогрев частиц токопроводящего ферромагнетика наводимыми в них индукционными вихревыми токами. Это обстоятельство требует создания системы дополнительного охлаждения устройств.

Перечисленные недостатки устройств, работа которых основана на принципе действия асинхронных двигателей, указывают на то, что эти устройства не могут обладать значительными преимуществами перед механическими аналогами и, следовательно, практическое применение их для ускорения сыпучей ферромагнитной среды вряд ли целесообразно.

В предлагаемых устройствах порция сыпучего ферромагнитного материала разгоняется по прямой направляющей трубе из немагнитного и непроводящего материала под действием импульсного магнитного поля. Это поле создаётся идеальными катушками (индуктором), надетыми последовательно друг за другом на трубу. В катушки попеременно подаются импульсы постоянного тока. В промежутках между импульсами порция ферромагнетика движется по инерции. Регулируя амплитуду, длительность и время следования импульсов, можно добиться такого режима работы устройств, при котором порция сыпучей ферромагнитной среды приобретает ускорение в прямой направляющей трубе.

Питание индуктивных катушек импульсами постоянного тока позволяет создать магнитные поля очень высокой интенсивности и, соответственно, большую электромагнитную силу для ускорения сыпучей ферромагнитной среды в течение достаточно короткого интервала времени. Это

открывает возможность получения высокой скорости вылета порции ферромагнетика из направляющей трубы с длиной много меньшей, чем в ранее рассмотренных устройствах.

Качественная оценка предлагаемых идей создания устройств ускорения сыпучей ферромагнитной среды позволяет сделать заключение, что взаимодействие частиц ферромагнитного материала с магнитным полем можно наиболее эффективно использовать в устройствах, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитного момента ферромагнитных частиц с импульсным магнитным полем. Поэтому неслучайно последние стали объектом пристального внимания исследователей. Исследования процессов, происходящих в устройствах по ускорению сыпучей ферромагнитной среды в импульсном магнитном поле, показали перспективность применения таких устройств в качестве электромагнитных формовочных устройств. Это объясняется рядом важных преимуществ их по сравнению с механическими аналогами.

В конструкции устройств нет движущихся механических частей. Поэтому такие устройства работают с низким уровнем шума. Так как ферромагнитные частицы двигаются в прямой направляющей трубе по прямолинейной траектории, значительно уменьшается трение частиц о поверхность скольжения. Становится возможным существенно снизить выходную скорость частиц при использовании устройств для обработки поверхностей изделий. Теперь импульс силы, передаваемый поверхности, равен произведению массы порции частиц на скорость вылета порции из трубы, в отличие от импульса в механических аналогах, где он равен произведению массы отдельной частицы на скорость. Следовательно, необходимый для обработки поверхности, в соответствии с технологическими требованиями, импульс силы можно создать при значительно меньшей скорости частиц. Это позволяет существенно сократить затраты электроэнергии на процесс ускорения.

Указанные устройства (независимо от условий их применения в различных технологических процессах) имеют характерный общий конструктивный признак, а именно: наличие прямой направляющей трубы из непроводящего и немагнитного материала, по которой разгоняется порция ферромагнитных частиц и на которую надеты соленоидальные катушки (индуктор), питаемые импульсами постоянного тока. Такая конструкция устройств ускорения сыпучей ферромагнитной среды импульсным магнитным полем может быть выбрана в качестве обобщённой физической модели устройства.

**Заключение.** Рассмотрение большого количества устройств ускорения сыпучих ферромагнитных сред показало, что наиболее перспективными являются устройства, принцип действия которых основывается на взаимодействии магнитного момента ферромагнитных частиц с импульсным магнитным полем. В таких устройствах предполагается наличие прямой направляющей трубы из непроводящего и немагнитного материала, по которой разгоняется порция сыпучей ферромагнитной среды под воздействием магнитного поля соленоидальных катушек, питаемых импульсами постоянного тока. Большое значение при расчёте указанных устройств приобретает разработка методов расчёта взаимодействия ферромагнитных частиц между собой и распределения электромагнитных сил по объёму порции. Это связано с тем, что условием физической работоспособности устройства является порционное движение сыпучей ферромагнитной среды по направляющей трубе, т. е. движение сплошного ферромагнитного тела. Поэтому в любой рассматриваемый интервал времени требуется производить оценку распределения электромагнитных сил по всему факелу дроби и рассчитывать силы взаимодействия между отдельными частями порции, а также проверки возможности движения порции без расслоения её на отдельные части.

## ЛИТЕРАТУРА

- Пашков, А. Е. Математическое моделирование процесса формирования факела дроби в дробемётном аппарате контактного типа / А. Е. Пашков, В. В. Герасимов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 12 (59). – С. 48-52.
- Патент № 125505 U1 Российская Федерация, МПК B24C 3/06. Дробемётное устройство: № 2012136404/02: заявлено 24.08.2012: опубликовано 10.03.2013 / Пашков А. Е., Герасимов В. В., Гришаев П. Г., Пашков А. А.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет»



- (ФГБОУ ВПО «ИрГТУ»), Открытое акционерное общество «Научно-производственная корпорация "Иркут"» (ОАО «Корпорация "Иркут"»). – Бюл. 14.
3. Патент № 2626254 С Российской Федерации, МПК B24C 5/08. Электромагнитный дробемётный аппарат: № 2015145802: заявлено 23.10.2015: опубликовано 25.07.2017 / Башкиров Н. И. – 16 с.
4. Трофимова, Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 11-е изд., стер. – М.: Академия, 2006. – 560 с.
5. Электромеханическая система для формования алюминиевых изделий транспортных объектов / П. О. Саяпина, М. Б. Колесник, Р. Ф. Крупский, К. К. Ким // Проблемы безопасности и эффективности технических систем: сборник докладов конференции с международным участием, посвящённой 95-летию со дня рождения А. В. Плакса, Санкт-Петербург, 11-12 мая 2023 года. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. – С. 97-99.
6. Automated method based on a neural network model for searching energy-efficient complex movement trajectories of industrial robot in a differentiated technological process / M. A. Gorkavyy, A. I. Gorkavyy, V. P. Egorova, M. A. Melnichenko // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – DOI 10.3389/fenrg.2023.1129311.
7. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров / С. П. Черный, Д. О. Савельев, Н. Р. Сбитнев, П. О. Саяпина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 4-10.
8. Горьковый, М. А. Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления / М. А. Горьковый, А. И. Горьковый, М. А. Мельниченко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66. – № 2. – С. 85-95.
9. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия / М. А. Горьковый, А. И. Горьковый, А. С. Гудим [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-2 (52). – С. 97-104.

Сухоруков С. И., Годяев А. И., Овсянников А. Р.  
**S. I. Sukhorukov, A. I. Godyaev, A. R. Ovsyannikov**

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ТРЁХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

### DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM STRUCTURE FOR A ROBOTIC COMPLEX FOR 3D PRINTING METAL PRODUCTS

**Сухоруков Сергей Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; тел. 8(929)407-39-49. E-mail: sukhorukov@knastu.ru.

**Sergei I. Sukhorukov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27; tel. 8(929)407-39-49. E-mail: sukhorukov@knastu.ru.

**Годяев Александр Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(984)286-17-25. E-mail: zav\_at@festu.khv.ru.

**Alexander I. Godyaev** – Doctor of Engineering, Professor, Head of Automatic Telemechanics and Communication Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(984)286-17-25. E-mail: zav\_at@festu.khv.ru.

**Овсянников Антон Романович** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)186-35-88. E-mail: anton.mark.kms@gmail.com.

**Anton R. Ovsyannikov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)186-35-88. E-mail: anton.mark.kms@gmail.com.

**Аннотация.** Работа посвящена разработке структуры системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати металлических изделий. Проведён краткий обзор существующих технологий трёхмерной печати металлических изделий, в котором отражены их основные особенности. В рамках обзора также проанализированы основные преимущества и недостатки различных технологий, что позволило обосновать выбор технологии Direct Energy Deposition для дальнейшей реализации. Определены основные функции оборудования комплекса, которые должны выполняться для реализации выбранной технологии печати. Приведена функциональная схема роботизированного комплекса, реализующего выбранную технологию. В соответствии с особенностями приведённой функциональной схемы определены необходимые функции системы управления роботизированного комплекса. Разработаны два варианта структуры системы управления, отличающиеся распределением элементов по уровням иерархии: структура с главным устройством в виде контроллера робота и структура с главным устройством в виде отдельного ПЛК. Проведён анализ вариантов структуры. Сделан выбор варианта для дальнейшей разработки роботизированного комплекса.

**Summary.** The work is devoted to the development of the structure of the control system for a robotic complex for three-dimensional printing of metal products. A brief review of existing technologies for three-dimensional printing of metal products is carried out, which reflects their main features. The review also analyzed the main advantages and disadvantages of various technologies, which made it possible to justify the choice of Direct Energy Deposition technology for further implementation. The main functions of the complex equipment that must be performed to implement the selected printing technology are determined. A functional diagram of a robotic complex that implements the selected technology is presented. In accordance with the features of the given functional diagram, the necessary functions of the control system of the robotic complex are determined. Two variants of the control system structure have been developed, differing in the distribution of elements across hierarchy levels: a structure with a main device in the form of a robot controller and a structure with a main device in the form of a separate PLC. An analysis of the structure options was carried out. A choice has been made for the further development of the robotic complex.



**Ключевые слова:** роботизированный комплекс, трёхмерная печать металлами, система управления, структура, вариант структуры, уровни иерархии.

**Key words:** robotic complex, metal 3D printing, control system, structure, variant of structure, hierarchy levels.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-00267,  
<https://rscf.ru/project/22-79-00267/>.*

УДК 681.5

**Введение.** Производство металлических изделий в промышленности осуществляется преимущественно по двум технологиям: литьё и механическая обработка. Для этих методов характерны ограниченные возможности построения сложных структур внутри детали и большой расход материала. Одним из возможных вариантов решения данных проблем являются разработка и внедрение аддитивных технологий в производство [1; 2; 3; 4]. При этом важным ограничением для внедрения аддитивных технологий в промышленное производство являются итоговые габариты изделия. Анализ существующих решений показывает, что имеющиеся системы печати металлических изделий обладают весьма ограниченными размерами конечного изделия – порядка  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  м. Это затрудняет изготовление крупногабаритных изделий с применением аддитивных технологий.

В качестве одного из перспективных вариантов решения данной проблемы на сегодня является разработка технологических комплексов трёхмерной печати, применяющих различные варианты механики для обеспечения повышенных габаритов рабочей зоны печати. Так, например, предприятием НИТИ «Прогресс» был разработан роботизированный комплекс трёхмерной печати на базе антропоморфного робота собственного производства, выполняющий наплавку с применением электронного луча [5]. К недостаткам такого решения можно отнести следующие аспекты:

- необходимость расположения комплекса в вакуумной камере больших габаритов, что требует высоких капитальных затрат для внедрения комплекса, а также необходимость в высококвалифицированном персонале, выполняющем обслуживание данной установки. Также в случае ошибок в программе перемещений могут возникать повреждения стенок камеры, что приведёт к аварии и порче заготовки;

- применение робота собственной разработки, выпускаемого в штучном или мелкосерийном исполнении, что приводит к сложности подготовки персонала для работы с данным роботом и к высокой стоимости оборудования.

В качестве альтернативного варианта, позволяющего компенсировать вышеозначенные недостатки, в Комсомольском-на-Амуре государственном университете разрабатывается роботизированный комплекс на базе серийного промышленного робота-манипулятора, не требующий для работы применения вакуумной камеры. Применение серийного массово производимого робота позволяет обеспечить снижение капитальных затрат на внедрение комплекса и снижает требования к подготовке персонала комплекса, что в дальнейшем позволит снизить количество ошибок и повысить процент выхода годных изделий. Применение источников энергии, отличных от электронного луча, позволяет вместо сложной и дорогостоящей вакуумной камеры для работы комплекса использовать более простые защитные ограждения. Конкретная техническая реализация такого комплекса может быть различной и будет зависеть от применяемой технологии печати и оборудования. Однако, независимо от применяемой технологии, в рамках разрабатываемого комплекса потребуется обеспечивать совместную работу разнородного оборудования, что потребует разработки системы управления комплекса. Системы управления в подобных случаях могут характеризоваться значительной сложностью [6]. В рамках представленной работы решается задача разработки структуры системы управления роботизированного комплекса, обеспечивающего печать трёхмерных крупногабаритных изделий.

**Анализ технологий трёхмерной печати.** На начальном этапе разработки авторами был выполнен обзор научно-технических публикаций, в результате которого были выявлены основные существующие на сегодняшний день технологии трёхмерной печати металлами. К ним относятся технологии: SLM (селективного лазерного спекания) или DMLS (прямого лазерного спекания металлов), 3DP (струйной трёхмерной печати), LOM (изготовление методом ламинирования), DED (прямой подвод энергии и материала). Все эти технологии формируют итоговое изделие послойно, но с применением различных вариантов исходных материалов и способов нанесения слоя.

Так, технологии 3DP, SLM, DMLS основаны на применении металла в виде порошка [7; 8; 9; 10], спекаемого лазерным лучом, и отличаются у этих технологий только способы доставки порошка и формирования геометрии слоя. Несмотря на возможность печати с высокой детализацией, применение таких технологий в рамках роботизированного комплекса затруднено в связи с трудностью доставки порошка в место печати.

Технология LOM основана на применении тонколистового металла, который вырезается по форме текущего слоя, после чего такие вырезки свариваются с применением специального источника энергии (ультразвукового или лазерного) [11; 12]. Такой подход также не рекомендуется к реализации в рамках роботизированного комплекса в связи со сложностью разработки оснастки для работы с тонколистовыми «срезами» слоёв.

В технологии DED [13] используется металл в виде проволоки, который наплавляется лазерным лучом в нужных местах на поверхность предыдущего слоя. Такая форма металла является наиболее удобной для доставки в зону печати, а также позволяет использовать распространённые расходные материалы (сварочные проволоки) и менять материал в процессе печати (например, для нанесения защитных слоёв).

Следует отметить, что, помимо перечисленных основных технологий, также разрабатываются различные варианты гибридных технологий, объединяющих в себе несколько различных подходов одновременно [14; 15; 16].

С учётом вышеизложенного для дальнейшей реализации в рамках роботизированного комплекса была выбрана технология DED.

**Структура роботизированного комплекса трёхмерной печати по технологии DED.** Для реализации выбранной технологии оборудование, входящее в состав роботизированного комплекса, должно обеспечивать выполнение следующих функций:

- подачу исходного материала (проводки) с программно задаваемыми скоростью, ускорением и количеством (длиной);
- генерацию лазерного излучения для расплавления проводки с программным управлением режимами работы лазера (мощность, длительность, наличие импульсов и т. д.);
- перемещение печатающей оснастки, закреплённой на промышленном робот-манипуляторе, по координатам в пространстве, заданным в управляющей программе печати;
- формирование защитной атмосферы в зоне печати;
- обеспечение функций безопасности комплекса в целом, в том числе активной безопасности в случае выхода лазерного луча за зону печати.

Помимо указанных функций, непосредственно требующихся для реализации технологии печати, также было предложено обеспечить возможность варьирования геометрических параметров наносимого слоя (ширину и высоту наплавляемого за один проход валика) металла без смены диаметра проводки. Для этого необходима реализация функции программно управляемого позиционирования проводки относительно лазерного луча (приближение или удаление от точки фокуса лазера, изменение угла наклона проводки к лазеру).

В соответствии с данными функциями была сформирована функциональная схема роботизированного комплекса трёхмерной печати металлами, реализующая печать по технологии DED, приведённая на рис. 1. На рис. 1 сплошными стрелками показаны информационные связи между элементами, а пунктирными стрелками – механические связи.

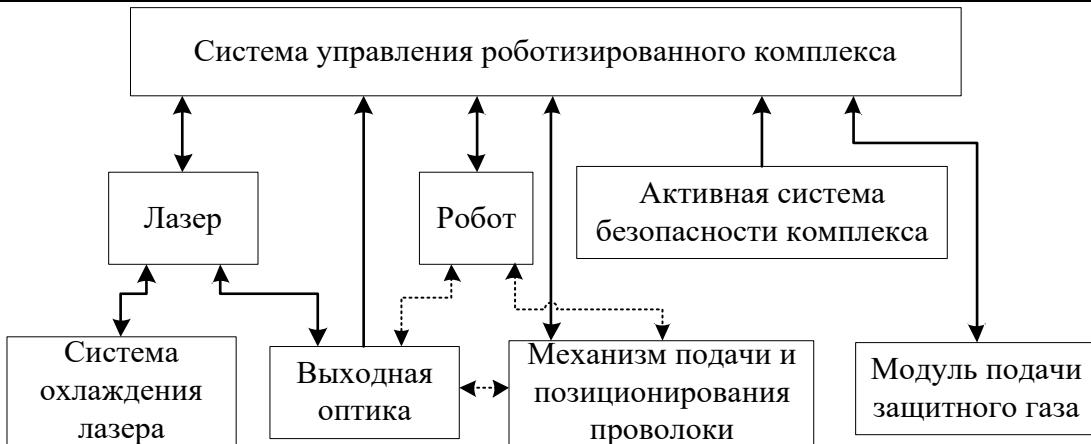


Рис. 1. Функциональная схема роботизированного комплекса трёхмерной печати металлами

Система управления роботизированного комплекса осуществляет чтение управляющей программы печати конкретного изделия, распознаёт типы команд в программе и формирует управляющие воздействия для подчинённых исполнительных устройств. При формировании управляющих воздействий учитываются сигналы обратных связей, поступающие от датчиков, а также сигналы от системы безопасности комплекса и поступающие команды от оператора.

Робот (манипулятор) осуществляет перемещение по заданным координатам печатающей оснастки, состоящей из выходной оптики лазера и механизма подачи и позиционирования проволоки в зоне печати. Механизм подачи и позиционирования проволоки обеспечивает требуемое расстояние и угол наклона проволоки относительно лазерного луча, а также подачу необходимого количества проволоки под лазерный луч с заданными скоростью и ускорением. Выходная оптика лазера служит для фокусировки лазерного луча, поступающего от лазерного источника, в определённой точке.

Лазер генерирует лазерное излучение заданной мощности, передаваемое по гибкому оптоволокну к выходной оптике. Система охлаждения лазера является неотъемлемой частью полноценного комплекта лазерного оборудования и предназначена для поддержания постоянной температуры внутренних элементов лазерного источника и выходной оптики.

Модуль подачи защитного газа управляет потоком инертного газа, подаваемого в зону печати локально в место пересечения лазерного луча с проволокой.

Активная система безопасности отслеживает возникновение аварийных ситуаций в процессе работы комплекса, в том числе определяет факт попадания прямого луча в защитное ограждение, а также принимает меры по сокращению ущерба от возникших ситуаций путём остановки работы оборудования.

Всё перечисленное оборудование комплекса может быть разделено на две категории: готовые серийно изготавливаемые устройства (робот, лазер, система охлаждения лазера, выходная оптика) и устройства, разрабатываемые и проектируемые при построении комплекса (механизм подачи и позиционирования проволоки, активная система безопасности комплекса, модуль подачи защитного газа и система управления комплекса).

Для дальнейшей разработки роботизированного комплекса необходимо детализировать внутреннюю структуру системы управления роботизированного комплекса. Так как система управления роботизированного комплекса будет состоять из нескольких отдельных устройств, связанных между собой, то при детализации необходимо рассмотреть и проанализировать возможные варианты структуры данной системы управления.

**Разработка вариантов структуры системы управления роботизированного комплекса.**  
Разрабатываемая система управления должна реализовывать следующие функции:

- взаимодействие с человеком-оператором;

- хранение файла управляющей программы печати изделия, построчное чтение этого файла, распознавание типов команд программы;
- формирование необходимых сигналов задания для перемещения в пространстве робота-манипулятора с дальнейшим расчётом и формированием необходимого питания для приводов робота;
- формирование сигналов задания режимов работы лазера;
- формирование сигналов задания позиции проволоки относительно лазерного луча с дальнейшим формированием необходимого питания приводов механизма позиционирования;
- формирование сигналов задания параметров подачи проволоки (скорости, ускорения и количества) с дальнейшим расчётом и формированием необходимого питания для привода подачи;
- формирование сигналов задания для подачи защитного газа;
- приём и обработка сигналов обратной связи от датчиков (давление защитного газа, фактическая скорость подачи проволоки, состояние выходной оптики лазера, расположение объектов в зоне печати);
- реализация функций безопасности (отслеживание нажатия кнопок аварийного останова, отслеживание выхода лазерного луча за пределы зоны печати, отслеживание открывания ворот защитного ограждения, отслеживание внутренних ошибок оборудования, остановка оборудования комплекса).

Так как структура комплекса включает значительное количество сложных в управлении устройств, то в неё также будет входить набор отдельных элементов, специализированных на решении локальных задач управления. При этом важным вопросом при разработке такой системы управления будет вопрос определения необходимой иерархии устройств в составе системы и распределение вышеописанных функций между устройствами.

Так как управляющая программа печати конкретного изделия представляет собой один файл (в случае разделения программы на несколько файлов задача подготовки печати значительно усложнялась бы), то иерархия устройств, реализующих функции управления, должна содержать минимум два уровня. На верхнем уровне должны находиться некоторый центральный контроллер, осуществляющий хранение, чтение и анализ управляющей программы, а также интерфейс для взаимодействия с оператором. На нижнем уровне должны располагаться все остальные устройства, входящие в состав системы управления.

В соответствии с этим положением и вышеописанными функциями было разработано два варианта структуры системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати, приведённые в виде функциональных схем на рис. 2 и 3.

Представленные на рис. 2 и 3 структуры отличаются распределением устройств по иерархии структуры систем управления. В первом случае верхний уровень системы управления реализован в виде контроллера робота, во втором – в виде отдельного программируемого логического контроллера (ПЛК). На обеих схемах в рамке показаны элементы системы управления комплекса. Исполнительные устройства, ранее приведённые на рис. 1, на рис. 2 и 3 не отражены, а только лишь показаны направления передачи информации в виде подписей на концах стрелок.

Возможность применения контроллера робота в качестве главного устройства (см. рис. 2) связана с тем, что современные контроллеры промышленных роботов позволяют реализовывать подключение внешних устройств посредством различных интерфейсов с дальнейшей разработкой пользовательских алгоритмов с достаточно широким функционалом и сложностью [17; 18]. При таком подходе контроллер робота выполняет хранение файла управляющей программы, чтение и распознавание команд из файла, реализует полный цикл управления перемещением робота, формирует сигналы задания для контроллеров управления отдельными устройствами, получает и обрабатывает сигналы от датчиков, обрабатывает сигналы от контроллера распознавания видео, реализует алгоритмы реагирования на поступление сигналов от системы безопасности комплекса. При такой структуре системы управления в качестве интерфейса оператора можно использовать штатный пульт управления роботом, однако следует помнить, что большинство пультов управления роботами не предполагает разработку отдельного пользовательского интерфейса и позволяет использовать только встроенные функции.

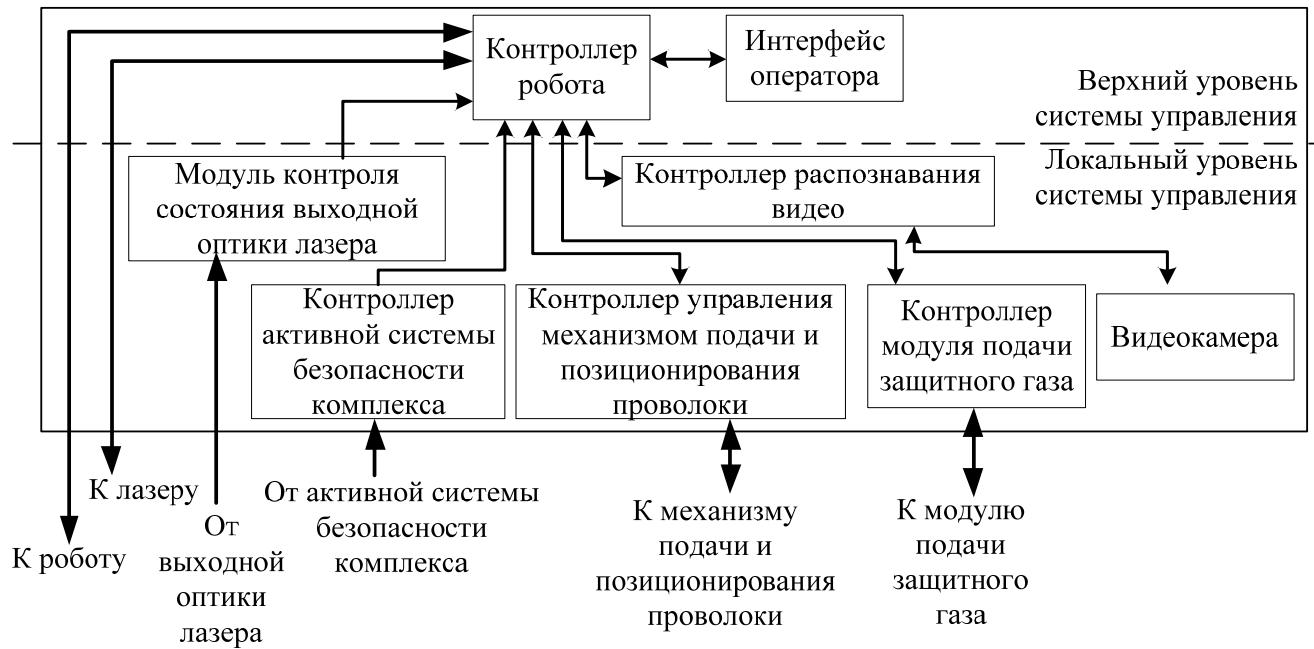


Рис. 2. Функциональная схема системы управления с главным устройством в виде контроллера робота

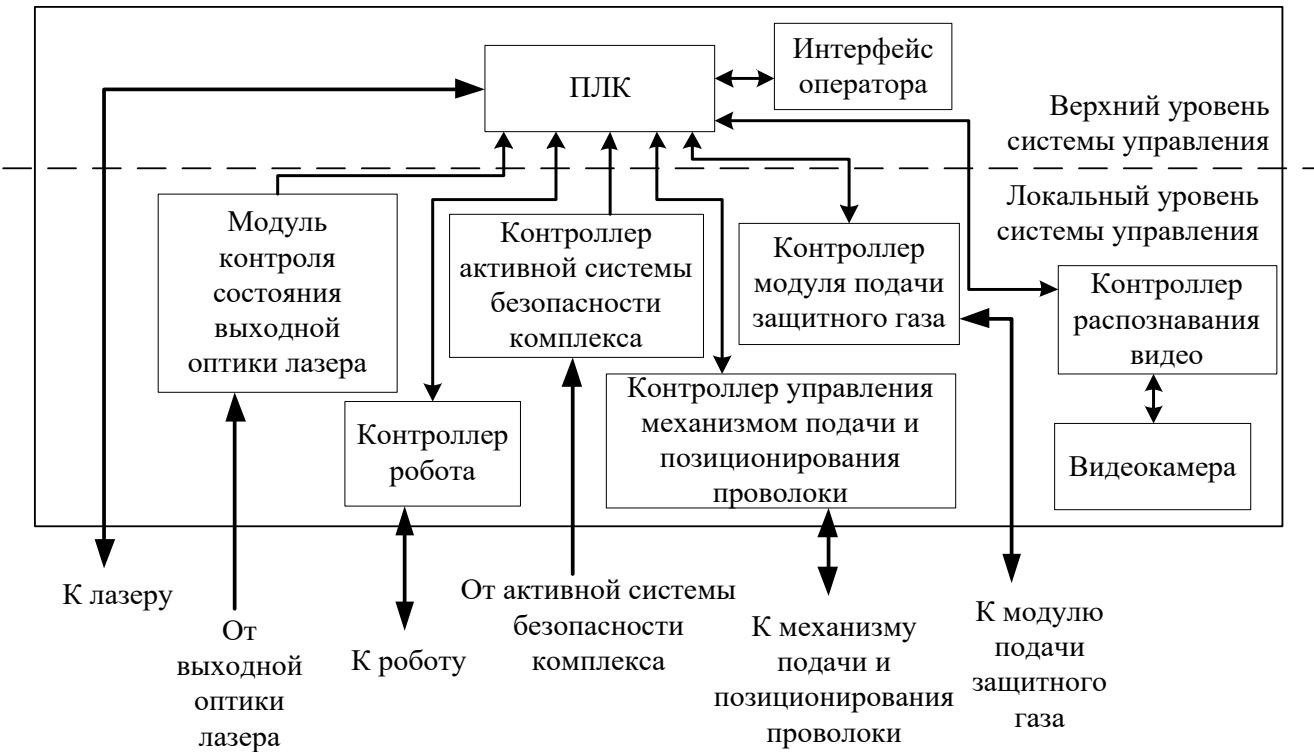


Рис. 3. Функциональная схема системы управления с главным устройством в виде отдельного ПЛК

Во втором варианте структуры контроллер робота осуществляет только полный цикл управления перемещениями робота. При этом координаты и траектории перемещения контроллер робота получает от вышестоящего ПЛК. ПЛК в свою очередь осуществляет хранение файла управляющей программы, чтение и распознавание команд из файла, формирование сигналов задания для лазера и контроллеров управления механизмом подачи и позиционирования проволоки, а также модуля подачи защитного газа, осуществляет приём и обработку сигналов обратных связей от робота, лазера, модуля контроля состояния выходной оптики лазера, контроллеров активной системы безопасности комплекса, механизма подачи и позиционирования проволоки, модуля подачи защитного газа и контроллера распознавания видео.

Все остальные устройства в обоих вариантах реализации структуры имеют следующий функционал:

- Модуль контроля состояния выходной оптики лазера принимает сигналы от датчиков, встроенных в выходную оптику, и в зависимости от уровня этих сигналов формирует сигналы предупреждения или тревоги для главного устройства.

- Контроллер активной системы безопасности получает сигналы от датчиков, встроенных в ограждение комплекса, сравнивает их уровни с допустимыми и формирует сигналы тревоги с номером датчика для главного устройства в случае выхода сигналов за допустимые пределы.

- Контроллер управления механизмом подачи и позиционирования проволоки получает от главного устройства сигналы задания положения проволоки и параметров подачи проволоки. На основании полученных сигналов задания контроллер рассчитывает и формирует управляющие сигналы для драйверов входящих в состав механизма двигателей.

- Контроллер модуля подачи защитного газа получает от главного устройства сигналы задания для подачи защитного газа, в соответствии с которыми формирует необходимое силовое питание для открытия или закрытия клапанов подачи газа. Также контроллер получает сигналы от датчика давления газа и в случае падения давления ниже определённых величин передаёт на главное устройство сначала сигналы предупреждения, а затем (при падении давления ниже критического уровня) тревоги.

- Видеокамера располагается на печатающей оснастке и применяется для контроля качества печати и оценки правильности протекания технологического процесса. Контроллер распознавания видео осуществляет анализ изображения с камеры и распознавание проволоки, точки расплавления проволоки лучом и уже нанесённых фрагментов материала и определяет возникшие отклонения их взаимного расположения. Результаты распознавания в виде необходимых коррекций расположения печатающей оснастки передаются на главное устройство в системе управления.

**Анализ разработанных вариантов структуры системы управления.** Проведём анализ преимуществ и недостатков разработанных вариантов структуры.

Преимуществом первого варианта является упрощение состава и удешевление оборудования комплекса, т. к. при этом варианте не требуется дополнительного оборудования в виде ПЛК.

Недостатками же данной структуры являются:

- необходимость в разработке специализированных программных пакетов для взаимодействия контроллера робота с лазерным оборудованием, интерфейсом оператора и для организации связи с элементами комплекса, что затруднено для большинства серийно производимых роботов. Это связано с высокой степенью закрытости системного ПО промышленных роботов;

- специфическая подготовка управляющей программы для печати изделия, выражаясь в такой компоновке программы, чтобы контроллер робота мог распознавать различные типы команд и обеспечивать синхронизацию управляющих воздействий для остального оборудования;

- ограниченный объём файла управляющей программы печати конкретного изделия, заведомо недостаточный для большинства печатаемых изделий. Это связано с ограничениями на длину программы в контроллере робота;

- сложность обеспечения быстродействия системы и высоких скоростей обмена информацией с внешними устройствами, т. к. вся вычислительная нагрузка возлагается на одно устройство, а команды в управляющей программе выполняются строго последовательно;



- контроллер робота фактически реализует как функции верхнего уровня системы управления, так и функции локальной системы управления механикой робота-манипулятора. Это приводит к частичному размытию границ между уровнями иерархии системы и возникновению потенциальных конфликтов между функционалом разных уровней в одном устройстве.

При этом для второго варианта структуры характерны следующие преимущества:

- наличие отдельного управляющего устройства в виде ПЛК, на котором нет необходимости осуществлять сложные вычисления траекторий перемещения промышленного манипулятора, что сильно поднимает быстродействие комплекса и позволяет обеспечить высокие скорости обмена управляющей информацией;

- отсутствие необходимости в разработке специализированных программных пакетов для контроллера робота (взаимодействие с интерфейсом оператора реализуется штатными программными средствами ПЛК, управление лазером и организация связи с элементами комплекса реализуются подачей необходимых дискретных и аналоговых сигналов напрямую с ПЛК либо по промышленным сетям);

- передача команд перемещения контролеру реализуется с применением штатных средств ПЛК и контроллера робота (либо с применением готовых программных пакетов и библиотек);

- хранение управляющей программы может быть организовано на внешнем накопителе, что снимает ограничение на размер управляющей программы.

К недостаткам второго варианта структуры можно отнести усложнение структуры комплекса за счёт добавления дополнительного элемента (ПЛК) и повышение итоговой стоимости оборудования комплекса.

На основании проведённого анализа для дальнейшей реализации был выбран вариант структуры системы управления комплекса с главным устройством в виде отдельного ПЛК.

**Заключение.** В рамках представленной работы решался вопрос разработки структуры системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати металлами. В результате были получены следующие результаты:

- на основе анализа структуры оборудования комплекса сформированы функциональные требования к системе управления комплекса;

- разработано два варианта структур системы управления, отличающиеся распределением функций между элементами системы управления;

- на основе анализа предложенных вариантов структуры системы управления сделан вывод, что, несмотря на повышение сложности системы управления и её стоимости, вариант структуры с главным устройством в виде отдельного ПЛК является предпочтительным для дальнейшей реализации.

Результаты работы будут использованы в дальнейшем при проектировании системы управления роботизированного комплекса и разработке алгоритмов работы элементов данной системы управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Диесперова, Н. А. Применение цифровых и аддитивных технологий в задачах новой индустриализации РФ / Н. А. Диесперова, К. В. Диесперов // Горизонты экономики. – 2022. – № 6 (72). – С. 25-33.
2. Смирнов, В. В. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство / В. В. Смирнов, Е. Ф. Шайхутдинова // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – № 2-2. – С. 90-94.
3. Армашова-Тельник, Г. С. Аддитивные технологии: новационный эффект в промышленности / Г. С. Армашова-Тельник, П. Н. Соколова, Д. В. Дегтерев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. –2020. – Т. 82. – № 4 (86). – С. 347-353.
4. Лебединский, К. В. Порошковые материалы в развитии аддитивных технологий в автомобилестроении / К. В. Лебединский, А. А. Николотов, Д. П. Алексеев // Сурский вестник. – 2019. – № 1 (5). – С. 17-20.
5. Электронно-лучевая сварка // ОАО «НИТИ «Прогресс» 2022. – URL: [https://www.niti-progress.ru/files/catalog\\_elu\\_svarka\\_2022.pdf](https://www.niti-progress.ru/files/catalog_elu_svarka_2022.pdf) (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.

6. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / М. А. Горьковый [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 40-46.
7. Преимущества использования SLM-печати в ракетостроении / Т. А. Федченко, Н. А. Данилов, Я. А. Халеков, М. И. Толстопятов // Chronos. – 2022. – Т. 7. – № 6 (68). – С. 11-12.
8. Применение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в конструкции малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинной установки / Ю. С. Елисеев [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18. – № 1. – С. 174-183.
9. Гребенщикова, Т. Д. Применение аддитивных технологий при изготовлении турбинных лопаток из сплавов на основе никеля / Т. Д. Гребенщикова, В. В. Рыжков // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2020. – Т. 1. – С. 56-59.
10. Сятчихин, А. А. Оценка возможности применения аддитивных технологий при производстве изделий ракетно-космической техники / А. А. Сятчихин, А. И. Смирнов // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. – 2022. – № 1. – С. 41-44.
11. Прямое изготовление металлических деталей с применением LOM-технологии / Н. К. Толочко, А. А. Андрушевич, П. С. Чугаев, Т. А. Богданович // Литьё и металлургия. – 2018. – № 1 (90). – С. 137-143.
12. Chiu, Y.Y. Automatic fabrication for bridged laminated object manufacturing (LOM) process / Chiu Y. Y., Liao Y. S., Hou C. C. // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 140. Issues 1–3. 2003. pp. 179-184. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00710-6.
13. Svetlizky, D. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications / Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A. L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schœnning J. M., Lavernia E. J., Eliaz N. // Materials Today. Vol. 49. 2021. pp. 271-295. doi: 10.1016/j.mattod.2021.03.020.
14. Czink, S. Process development for the hybrid additive manufacturing of metallic structures on polymer substrates / Czink S., Lubkowitz V., Dietrich S., Schulze V. // Additive Manufacturing Letters. 2023. 100132. doi: 10.1016/j.addlet.2023.100132.
15. Ghorbani, H. R. Hybrid additive manufacturing of an electron beam powder bed fused Ti6Al4V by transient liquid phase bonding / Ghorbani H. R., Mosallanejad M. H., Atapour M., Galati M., Saboori A. // Journal of Materials Research and Technology. Volume 20. 2022. pp. 180-194. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.009.
16. Korkmaz, M. E. A technical overview of metallic parts in hybrid additive manufacturing industry / Korkmaz M. E., Waqar S., Garcia-Collado A., Gupta M. K., Krolczyk G. M. // Journal of Materials Research and Technology. Vol. 18. 2022. pp. 384-395. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.085.
17. KUKA System Software 8.3: инструкция по эксплуатации и программированию для конечного пользователя / KUKA Roboter GmbH. – 2016. – 279 с.
18. KUKA System Software 8.3: Operating and Programming Instructions for System Integrators / KUKA Roboter GmbH. – 2014. – 487 p.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**  
**MECHANICAL ENGINEERING**

**Кабалдин Ю. Г., Саблин П. А.**  
**Yu. G. Kabaldin, P. A. Sablin**

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРИ РЕЗАНИИ**

**INFLUENCE OF MACHINED MATERIAL STRUCTURE ON THE FORMATION  
OF SURFACE LAYER AND QUALITY OF MACHINED SURFACE DURING CUTTING**

**Кабалдин Юрий Георгиевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород).

**Yuriy G. Kabaldin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod).

**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.

**Аннотация.** Показано, что шероховатость поверхностного слоя стальных заготовок зависит от степени деформации и размера зерна основной структурной составляющей сталей, в частности феррита и аустенита. Параметры  $R_a$  и  $R_Z$  по размерам меньше зёрен упрочняющих фаз (частиц) в феррите и аустените и не могут определять высоту неровностей поверхностного слоя.

**Summary.** It is shown that the roughness of the surface layer of steel billets depends on the degree of deformation and grain size of the main structural component of steels, in particular, ferrite and austenite. The parameters  $R_a$  and  $R_Z$  are smaller than the grains of the hardening phases (particles) in ferrite and austenite and cannot determine the height of the surface layer irregularities.

**Ключевые слова:** резание, поверхностный слой, структурные элементы материалов, параметры  $R_a$  и  $R_Z$ , цифровой двойник шероховатости.

**Key words:** cutting, surface layer, structural elements of materials, parameters  $R_a$  and  $R_Z$ , digital roughness double.

УДК 621.9

Вопросам влияния условий резания на механизм формирования поверхностного слоя и шероховатость обработанной поверхности посвящено большое количество работ [1–9] как отечественных, так и зарубежных исследователей. Работы учёных были направлены на установление зависимостей параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_Z$  от режимов резания и их влияния на эксплуатационные свойства деталей машин.

Структурное состояние материала при прочих равных условиях зачастую может оказаться наиболее важным фактором, влияющим на выходные параметры процесса резания. Если деформационное поведение материала на макроуровне можно описать на основе кривых «напряжение-деформация», определяя значения предела прочности  $\sigma_B$  и предела текучести  $\sigma_T$ , то исследование эволюции дефектной структуры на микроуровне в зоне стружкообразования и вторичной дефор-

мации представляет определённую сложность и обуславливает необходимость применения тонких методов металлографических исследований.

В фундаментальных работах [1; 2] на основе механики процесса резания показано, что формирование поверхностного слоя при резании связано с системой сил на передней поверхности, действующих на зону стружкообразования, создавая у режущего лезвия определённое напряжённо-деформированное состояние, вызывая при этом сдвиг элемента стружки.

На рис. 1 представлены структуры стали 20, полученные на оптическом и электронном микроскопах.

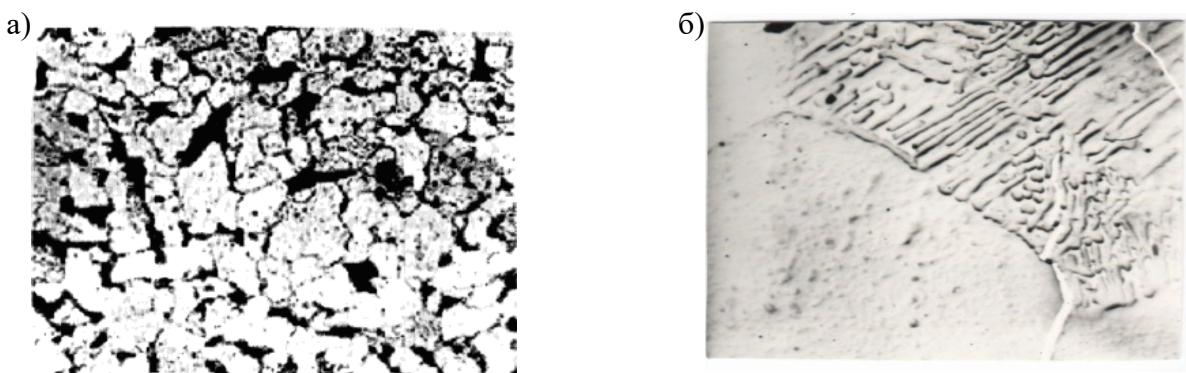


Рис. 1. Микрофотографии структуры стали 20: а – исходная микроструктура (x300); б – исходная микроструктура (x3000)

В углеродистых сталях [9–12] размеры цементита находятся в диапазоне 5…15 нм, а средний размер феррита составляет порядка 13…15 мкм (по ГОСТ 5639-82). На рис. 1 видно, что размеры феррита существенно больше, чем зёрен  $\text{Fe}_3\text{C}$ , образующих колонии в перлите.

В аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т (см. рис. 2), размер зёрен аустенита [11] достигает 300 мкм, а размеры упрочняющих частиц (нитридов, карбидов легирующих элементов) – нескольких нанометров.

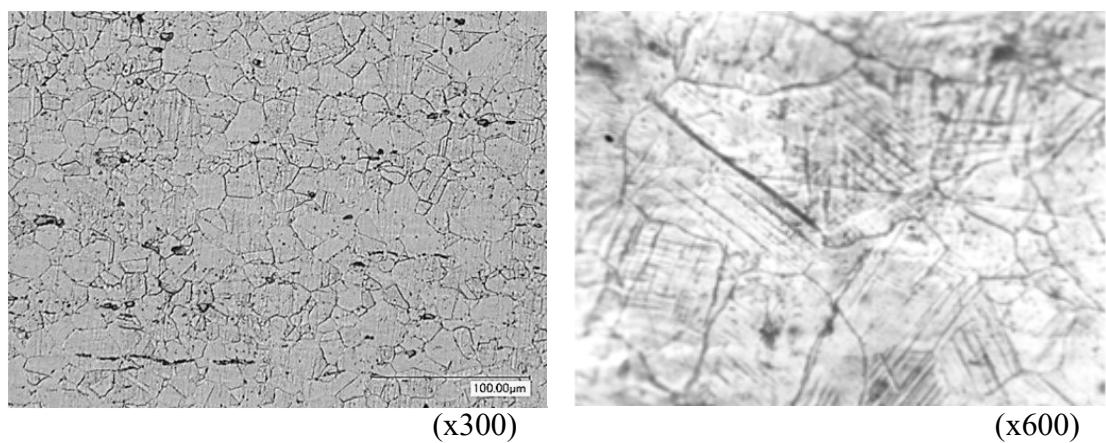


Рис. 2. Микрофотографии структуры нержавеющей стали 12Х18Н10Т

В алюминиевых сплавах [12] средний размер зёрен чистого алюминия достигает 1200 мкм, а упрочняющей фазы – нескольких нанометров. Поэтому параметры  $R_a$  и  $R_z$ , как будет показано ниже, по размерам больше упрочняющих фаз (частиц) в феррите и аустените. В этой связи твёрдые упрочняющие фазы не могут определять высоту неровностей поверхностного слоя.

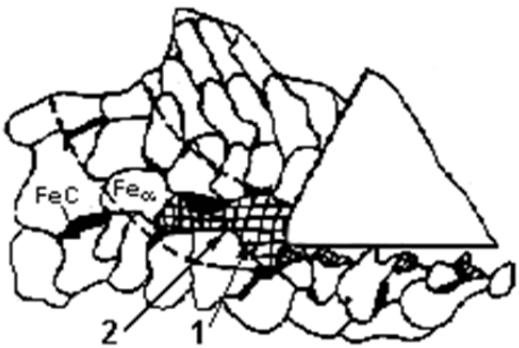
Как показывают исследования, шероховатость поверхностного слоя определяют особенности пластической деформации основной фазы, в частности структурных основных составляющих

сталей – феррита и аустенита – в зоне стружкообразования. При этом известно [6], что пластические свойства аустенита выше, чем феррита, в частности, по параметру относительного удлинения ( $\delta, \%$ ). Поэтому процесс резания аустенитной нержавеющей стали сопровождается сильным деформационным упрочнением, высокой адгезией с инструментальным материалом и затормаживанием стружки в зоне вторичной деформации. При этом шероховатость обработанной поверхности оказывается высокой.

Таким образом, структура металлов – это очень сложная динамическая система, прочность которой в значительной степени определяется размером зёрен упрочняющих частиц и их распределением в матрице основной структурной фазы, например, в углеродистых сталях это  $\alpha$ -феррит.

На рис. 3 показана схема процесса резания углеродистой стали с учётом её структуры (см. рис. 1).

Высокие степени деформации в зоне стружкообразования обусловливают фрагментацию зёрен феррита (на рис. 3, зерна  $\alpha$ -Fe заштрихованы в виде сетки). При перемещении стружки по передней поверхности из-за вторичной деформации в приконтактных слоях стружки формируется текстура. В результате зёрна феррита и колонии цементита (см. рис. 4) вытягиваются, т. е. обе эти структурные фазы интенсивно деформируются.



1 – фрагментация зёрен; 2 – микротрешины,

формирующие неровности поверхности

Рис. 3. Схема, иллюстрирующая механизм образования неровностей на обработанной поверхности при резании углеродистой стали

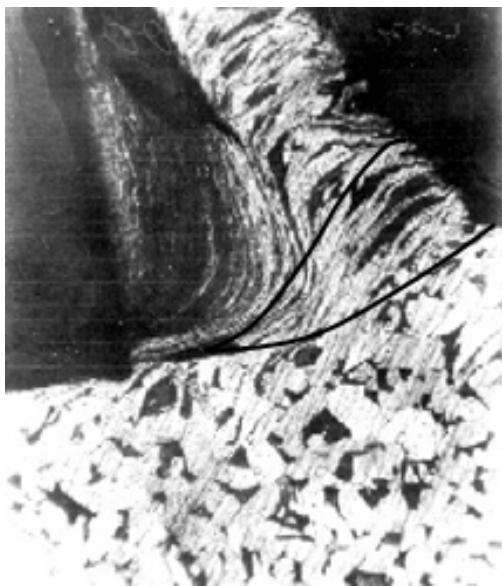


Рис. 4. Микрофотография шлифа корня стружки при резании стали 20 (x300)

Длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента, как известно [1], определяется уровнем удельных контактных нагрузок на передней поверхности инструмента и адгезионными свойствами обрабатываемого и инструментального материалов. Степень деформации (относительный сдвиг) здесь может достигать [1] высоких значений (до 40), что более чем в 20 раз превышает деформацию основной массы стружки. Это в значительной степени может быть связано с пластическими свойствами обрабатываемых материалов, которые, например в углеродистых сталях, определяет содержание в них феррита. Поэтому имеется связь относительного удлинения ( $\delta, \%$ ) с длиной контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента (см. рис. 5).

Однако при резании исходная структура металлов, как показано выше, подвергается большему пластическим деформациям, и в литературе [1–8] нет объяснения причин столь высоких значений относительного сдвига в приконтактных слоях стружки.

Можно предположить, что это связано с особенностями формирования здесь дислокационной структуры в металлах, в частности с её фрагментацией, что обеспечивает ей возможность достигать столь высоких степеней деформации в приконтактных слоях стружки.

На рис. 6 представлены микрофотографии дислокационной структуры в зоне стружкообразования, полученные с использованием микроскопии тонких фольг.

Из рис. 6 следует, что на верхней границе (см. рис. 4) зоны стружкообразования плотность дислокаций достигает  $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 7 представлена микрофотография дислокационной структуры на приконтактной поверхности стружки. Как видно, в отличие от рис. 6, дислокационная структура здесь не выявляется, зёра металла вытянуты в направлении высоких сдвиговых деформаций.

Можно полагать, что при столь высокой (см. рис. 6,  $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) плотности дислокаций локальные объёмы стружки находятся в аморфном состоянии (см. рис. 7), т. к. кристаллическая структура не выявляется. Например, в работах [15–17] отмечается, что высоким степеням деформации металлов свойственны фрагментация структуры, т. е. образование высокоугловых границ зёрен, аморфизация и фазовые изменения. Поэтому в результате указанных явлений в приконтактных слоях стружки в процессе резания реализуются структурные и фазовые превращения [5].

Выявленная связь длины контакта стружки с пластичностью материалов (см. рис. 5) позволяет утверждать, что длина контакта, в частности длина  $C_{\text{пл}}$  пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента, влияет на формирование поверхностного слоя заготовки. Её влияние связано как с формированием на ней нароста, так и с высокими удельными нормальными давлениями вблизи режущего лезвия [1].

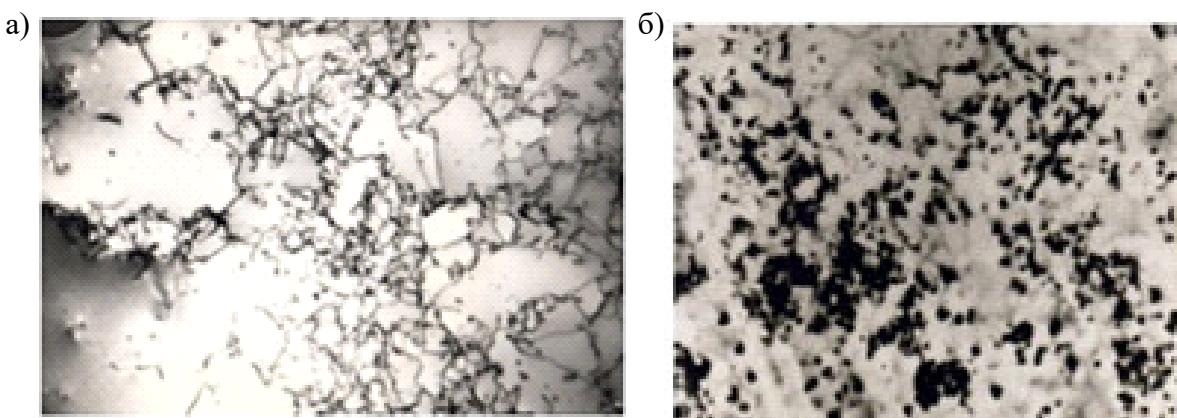


Рис. 6. Микрофотографии дислокационной структуры стали 20 вблизи ( $x15\ 000$ ) нижней границы стружкообразования  $\rho = 10^6 \text{ см}^{-2}$  (а), верхней границы стружкообразования  $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (б)

На рис. 8 и 9 представлены результаты экспериментальных исследований шероховатости ( $R_a$ ) обработанной поверхности при резании стали 45 и У8 от скорости резания.

Исследования проводились на токарном станке 1К62, в качестве обрабатываемого материала применялись заготовки из стали 45 и У8 диаметром 80 мм, длиной 500 мм. В качестве инструмента использовался токарный проходной резец со сменной четырёхгранной пластиной толщиной 4 мм из твёрдого сплава Т15К6 с механическим креплением ( $\alpha = 5^\circ$ ,  $\gamma = 8^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ). Шероховатость поверхности измерялась на профилометре мод. 170622.

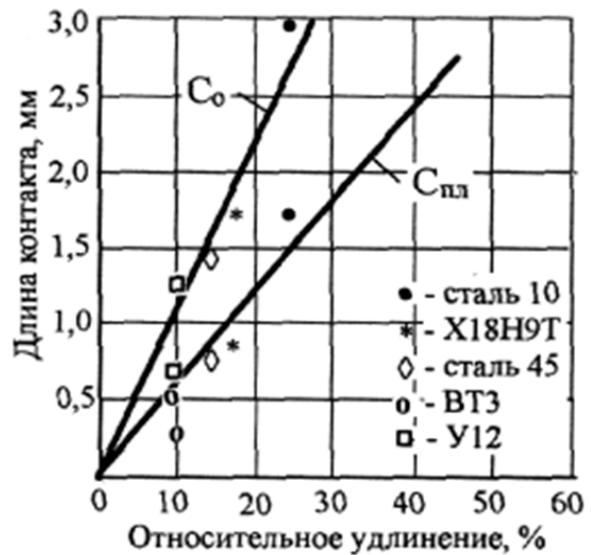


Рис. 5. Зависимость длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента от относительного удлинения  $\delta$  обрабатываемых металлов

Рис. 6. Микрофотографии дислокационной структуры стали 20 вблизи ( $x15\ 000$ ) нижней границы стружкообразования  $\rho = 10^6 \text{ см}^{-2}$  (а), верхней границы стружкообразования  $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (б)

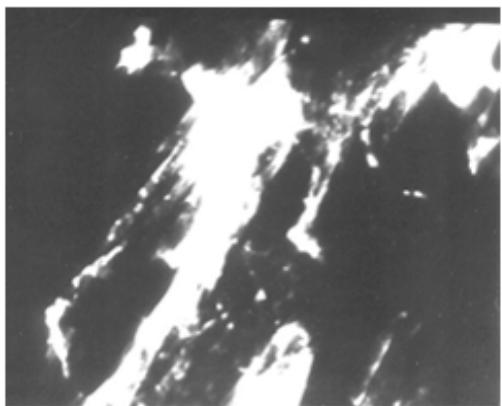


Рис. 7. Микрофотографии дислокационной структуры в приконтактном слое стружки при резании стали 20

ется в меньшей степени. Это обусловлено тем, что сталь У8 менее пластична, чем сталь 45. В результате параметр  $R_a$  при резании этой стали меньше.

Сравнение значений  $R_a$  (см. рис. 8) при резании стали 45 со структурными элементами этой стали в исходном состоянии показывает, что  $R_a$  при резании на средних скоростях ( $V = 20 \dots 50$  м/мин) больше, чем размер зёрен карбida железа, но соизмерим с размером зерна основной структурной фазы  $\alpha$ -феррита в исходном состоянии. Однако при резании этой стали на высоких скоростях размер  $R_a$  меньше, чем размер зёрен феррита в исходном состоянии сталей.

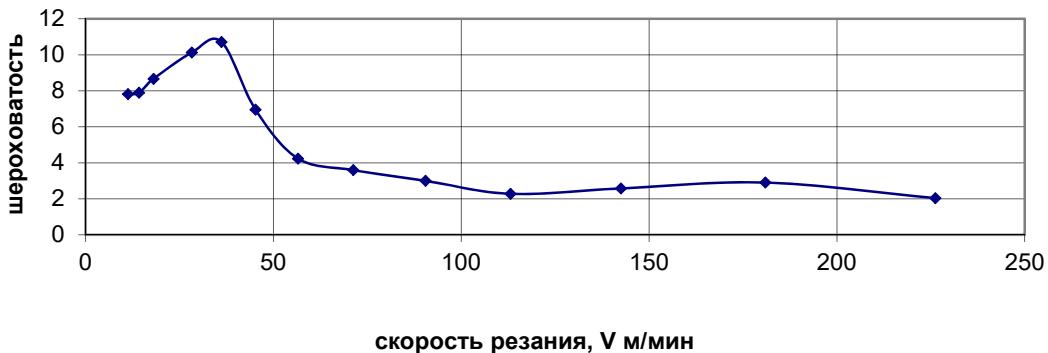


Рис. 8. Зависимость  $R_a$  шероховатости от скорости резания для стали 45.  $S = 0,11$  мм/об.

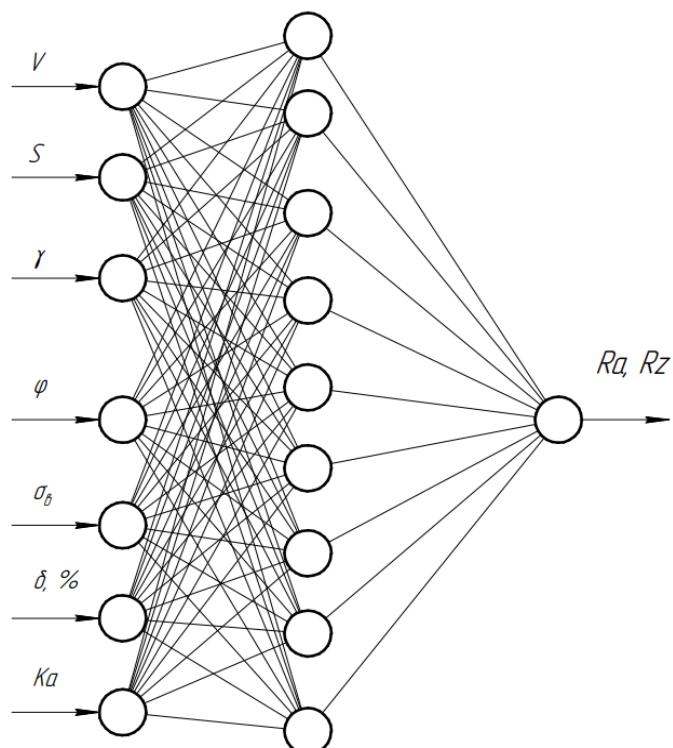
На наш взгляд, это обусловлено фрагментацией зёрен феррита (см. рис. 1 и 6) при их деформации в зоне стружкообразования и последующем частичном разрушении по границам фрагментов (размер фрагмента – несколько нанометров) в результате исчерпания пластичности при формировании поверхностного слоя (см. рис. 1).

Поскольку формирование поверхностного слоя заготовки при резании происходит в условиях высоких степеней и скоростей деформации, то влияние вторичных механических свойств обрабатываемого металла в результате интенсивной деформации и фрагментации основных структурных элементов оказывается определяющим при рассмотрении влияния их на параметры, характеризующие качество поверхностного слоя, т. е. на значения  $R_a$  и  $R_z$ .

Рис. 9. Зависимость шероховатости  $R_a$  от скорости резания для стали У8.  $S = 0,11$  мм/об.

Таким образом, контактные процессы, протекающие на передней поверхности инструмента, формируют, как отмечалось выше [1], на ней систему сил, которые передаются на зону стружкообразования, определяя структурные изменения в зоне стружкообразования, в частности, фрагментацию дислокационной структуры (см. рис. 3 и 6), влияющую на величину  $\tau_{\text{сдв}}$  сопротивления сдвигу при резании и формирование  $R_a$  поверхностного слоя (см. рис. 8 и 9) заготовки.

Управление качеством поверхностного слоя при резании обеспечивается за счёт нейронно-сетевого моделирования [1]. На рис. 10 представлена нейронная сеть, где на вход устанавливаются выявленные основные параметры, определяющие шероховатость обработанной поверхности. Это режимы обработки, свойства инструментального и обрабатываемого материала, а также  $K_a$  усадка стружки, которая косвенно характеризует степень деформации срезаемого слоя и важный показатель структуры металла — относительное удлинение  $\delta$ , определяющее развитие контактных процессов при резании.

Рис. 10. Нейронная сеть для управления шероховатостью обработанной поверхности  $R_a$  и  $R_z$



Разработанная нейронная сеть (см. рис. 10), выполняющая роль цифрового двойника, позволяет прогнозировать значения параметра  $R_a$  в зависимости от режимов обработки и свойств обрабатываемого материала, его структуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зорев, Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. – М.: Машиностроение, 1956. – 367 с.
2. Исаев, А. И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием / А. И. Исаев. – М.: Машгиз, 1950. – 215 с.
3. Бобров, В. Ф. Особенности образования суставчатой и элементной стружек при высокой скорости резания / В. Ф. Бобров, А. И. Сидельников // Вестник машиностроения. – 1976. – № 7. – С. 61-66.
4. Подураев, В. Н. Обработка резанием жаропрочных и нержавеющих материалов / В. Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1965. – 518 с.
5. Кабалдин, Ю. Г. Исследование процессов деформации и разрушения срезаемого слоя при резании на основе атомного подхода к процессу резания / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Кузьмишина // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 5. – С. 31-40.
6. Розенберг, А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, Ю. А. Розенберг. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
7. Вейц, В. Л. Математическое моделирование процесса стружкообразования при лезвийной обработке / В. Л. Вейц, В. В. Максаров, Е. Б. Козлова // Машиностроение и автоматизация производства: межвуз. сб. Вып. 14. – СПб.: СЗПИ, 1999. – С. 139-145.
8. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н. И. Резников, Г. В. Бурмистров, И. Г. Жарков и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 200 с.
9. Цементит в углеродистых сталях: коллектив. моногр. / под ред. В. М. Счастливцева. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. – 380 с.
10. Халикова, Г. Р. Структура и механические свойства стали 09Г2С в кольцевой заготовке, изготовленной центробежным электрошлаковым литьем / Г. Р. Халикова, Д. Н. Шерматов, Е. А. Наумкин // Материаловедение и защита от коррозии. – 2020. – Т. 18. – № 5. – С. 104-113.
11. Ганеев, А. В. Особенности формирования сегрегаций и карбидов железа на границах зёрен и механизмы упрочнения в ультрамелкозернистых углеродистых сталях, полученных интенсивной пластической деформацией кручением: автореф. ... канд. физико-математических наук: 05.16.08 / Ганеев Артур Вилевич. – Уфа, 2019. – 20 с.
12. Влияние размеров вводимых в расплав частиц на измельчение зерна в конечной структуре алюминиевых сплавов / И. А. Жуков, А. И. Потекаев, А. Б. Ворожцов, А. Е. Матвеев, О. Б. Кудряшова // Известия вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 79-86.
13. Гольштейн, М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов / М. И. Гольштейн, В. С. Литвина, Б. М. Бронфин. – М.: Металлургия, 1988. – 312 с.
14. Павлов, В. А. Аморфизация структуры металлов и сплавов с предельно высокой степенью пластической деформации / В. А. Павлов // ФММ. – 1985. – Т. 59. – Вып. 4. – С. 629-649.
15. Бриджмен, П. У. Исследования больших пластических деформаций и разрыва / П. У. Бриджмен. – М.: ЛИБРОКОМ, 2010. – 444 с.
16. Метлов, Л. С. Неравновесная эволюционная термодинамика и ее приложения / Л. С. Метлов. – Донецк: Ноуледж, 2014. – 176 с.
17. Основы пластической деформации наноструктурных материалов / Э. В. Козлов, А. М. Глезер, Н. А. Конева и др. – М.: Физматлит, 2016. – 360 с.
18. Кабалдин, Ю. Г. Управление киберфизическими системами в цифровом производстве на основе искусственного интеллекта и облачных технологий / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, П. В. Колчин; под ред. Ю. Г. Кабалдина. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 293 с.

Лиманкин В. В., Старцев Е. А., Бельский В. В.

V. V. Limankin, E. A. Startsev, V. V. Belskii

## НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### DIRECTIONS FOR PROCESSING TECHNOGENIC WASTE FROM FAR EASTERN METALLURGICAL ENTERPRISES

Лиманкин **Владимир Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(962)297-06-28. E-mail: vladimir.limankin@mail.ru.

**Vladimir V. Limankin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)297-06-28. E-mail: vladimir.limankin@mail.ru.

Старцев **Егор Андреевич** – старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)188-05-45. E-mail: egorstarts@inbox.ru.

**Egor A. Startsev** – Senior Lecturer, Department of Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyov, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)188-05-45. E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Бельский **Валерий Владимирович** – доцент кафедры «Химия и химические технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(962)297-81-31. E-mail: v.belskiy63@mail.ru.

**Valerii V. Belskii** – Associate Professor, Chemistry and Chemical Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)297-81-31. E-mail: v.belskiy63@mail.ru.

**Аннотация.** Рассмотрены основные направления переработки техногенных отходов дальневосточных металлургических предприятий. Приводится анализ технологий переработки техногенных отходов, таких как шлак дуговых электросталеплавильных печей, шлак агрегатов ковш-печь, пыль газоочистки, окалина металлургическая и т. д. Приводятся возможности внедрения новых технологий для переработки техногенных отходов дальневосточных металлургических предприятий.

**Summary.** The main directions of processing man-made waste from Far Eastern metallurgical enterprises are considered. The analysis of technologies for processing man-made waste, such as slag from electric arc furnaces, slag from ladle furnace units, gas purification dust, metallurgical scale, etc. is given. The possibilities of introducing new technologies for processing man-made waste from Far Eastern metallurgical enterprises are presented.

**Ключевые слова:** металлургические предприятия, техногенные отходы, шлак ДСП, шлак АКП, пыль газоочистки, окалина металлургическая, шлам, переработка.

**Key words:** metallurgical enterprises, industrial waste, chipboard slag, automatic transmission slag, gas cleaning dust, metallurgical scale, sludge, processing.

УДК 669.054.8

При достигнутом уровне индустриального развития защита и сохранение окружающей среды являются основными проблемами современности [1]. Наибольший урон природе наносят промышленные предприятия, среди которых металлургические заводы занимают далеко не последнее место [2]. Современные природоохранные технологии (системы газоочистки, замкнутые циклы оборотного водоснабжения и т. п.), внедряемые при модернизации и реконструкции металлургических предприятий, значительно снижают вредное воздействие металлургического производства на окружающую среду, но не устраняют его полностью [3–5]. Интенсивное развитие промышлен-



ного потенциала российского Дальнего Востока обостряет экологические вызовы и требует поиска путей их решения.

Современное производство на металлургических предприятиях, таких как действующий в г. Комсомольске-на-Амуре Хабаровского края завод «Амурсталь», планируемый к вводу в строй в текущем десятилетии «Приморский металлургический завод» («ПМЗ») в г. Большой Камень Приморского края, литейное производство на дальневосточных машиностроительных заводах сопровождаются образованием значительного количества побочных продуктов, не находящих применения в основной технологии и классифицируемых как техногенные отходы. К таким побочным продуктам относятся:

- шлак дуговых электросталеплавильных печей (шлак ДСП), норма образования около 0,165 т/т стали;
- шлак агрегатов ковш-печь (шлак АКП), норма образования около 0,026 т/т стали;
- пыль газоочистки, норма образования около 0,025 т/т стали;
- окалина металлургическая, норма образования около 0,04 т/т проката;
- шлам из отстойников систем оборотного водоснабжения (замасленная мелкодисперсная окалина), норма образования около 0,004 т/т проката;
- отходы от зачистки железнодорожных вагонов и контейнеров из-под металломолома, норма образования около 0,01 т/т металломолома.

С учётом достигнутой годовой производственной мощности ООО «Амурсталь» (около 1 млн т стали, 600 тыс. т проката), проектной годовой мощности «ПМЗ» (1,5 млн т проката, 220 тыс. т труб) речь идёт об образовании ежегодно более 340 тыс. т техногенных отходов, из которых более 150 тыс. т пока не имеют отработанных технологий утилизации и будут накапливаться на полигонах и в отвалах.

Ориентировочные объёмы образования техногенных отходов металлургического производства представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Объёмы образования техногенных отходов на заводах ДФО

Предприятие	Шлак ДСП, т	Шлак АКП, т	Пыль г/о, т	Окалина, т	Шлам, т	Зачистка ж/д вагонов, т	Всего, т
Амурсталь	165 000	26 000	25 000	64 000	2400	12 000	294 400
ПМЗ	-	-	-	40 000	6500	-	46 500
<b>Итого</b>	<b>165 000</b>	<b>26 000</b>	<b>25 000</b>	<b>104 000</b>	<b>8900</b>	<b>12 000</b>	<b>340 900</b>

Утилизация техногенных отходов металлургического производства является актуальной проблемой современности, требующей кардинального решения. В то же время при грамотном подходе техногенные отходы могут использоваться как ценное минеральное сырьё, из которого после переработки можно получить товарную продукцию, востребованную определёнными сегментами рынка [6–9]. В настоящее время найдены приемлемые технологии переработки для ограниченного числа побочных продуктов: для шлака ДСП, пыли газоочистки и металлургической окалины.

Шлак ДСП перерабатывается в шлаковые песок и щебень различных фракций, которые затем используются в строительной отрасли [10–12]. Также в последнее время активно исследуются способы переработки шлаков ДСП в сварочные материалы, такие как сварочные флюсы и порошковые проволоки, и их влияние на металл шва [13–14].

Следует отметить, что благодаря усилиям специалистов заводской экологической службы на комсомольском металлургическом предприятии, одном из немногих в стране, успешно решена проблема утилизации пыли газоочистки. В настоящее время пыль газоочистки с добавлением небольшого количества шлама из отстойников используется в качестве железосодержащей добавки на дальневосточных цементных заводах. Однако в ближайшей перспективе с увеличением в шихте

ДСП доли лома от переработки оцинкованных кузовов автомобилей из-за повышения содержания вредной для цементного оборудования окиси цинка риск отказа от этого способа утилизации пыли газоочистки значительно возрастает, следовательно, возникает необходимость в разработке альтернативной технологии.

Самый распространённый способ утилизации металлургической окалины – использование в качестве сырьевой добавки в доменном производстве, но транспортное плечо более 5000 км до ближайшего металлургического комбината с полным циклом и существующие железнодорожные тарифы делают для предприятий Дальнего Востока этот способ переработки окалины экономически нецелесообразным.

Остальные побочные продукты металлургического производства не находят применения и, как правило, складируются без переработки на шлаковых отвалах или полигонах, нанося невосполнимый ущерб окружающей среде.

В качестве возможных вариантов предлагается рассмотреть следующие направления переработки побочных продуктов, не находящих в настоящее время применения:

1. Шлак АКП представляет собой порошкообразный материал, содержащий около 40 % CaO.

После отделения магнитной фракции и отсева остатков печного шлака (~1 %) предлагается проработать возможность использования шлака АКП в технологии Амурского гидрометаллургического комбината (ООО «АГМК», г. Амурск) в качестве частичной замены извести, завозимой из Сибири.

После предварительного брикетирования шлак АКП предлагается повторно использовать при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи для раннего шлакообразования с целью снижения расхода свежеобожжённой извести.

2. Металлургическая окалина, шлам из отстойников оборотного водоснабжения имеют одинаковую природу происхождения и являются окислами железа, отличаясь только фракцией.

В качестве основного направления переработки этих побочных продуктов предлагается разработать технологию получения товарного чугуна методом восстановительной плавки в дуговой печи небольшой ёмкости. В качестве восстановителя окислов железа предлагается использовать кокс, содержащий более 90 % углерода и получаемый на нефтеперерабатывающем заводе г. Комсомольска-на-Амуре (РН-Комсомольский НПЗ) [15], или такие восстановители, как графит, электродный бой и др. Эту же технологию можно будет использовать в качестве альтернативной для переработки пыли газоочистки в случае отказа цементных заводов от её использования.

3. Отходы от зачистки железнодорожных вагонов и контейнеров из-под металломолома представляют собой сложную смесь минеральных и органических соединений с небольшим (до 10 %) содержанием чёрных и цветных металлов. Основной задачей технологии переработки данного побочного продукта является разделение этой смеси на органическую и минеральную составляющие с отделением металлов для дальнейшей их переработки.

Имеющийся опыт показывает, что существенное влияние на стоимость переработки техногенных отходов оказывают транспортные расходы. Поэтому центры по переработке необходимо располагать в непосредственной близости от источника образования отходов. В случае с техногенными отходами ООО «Амурсталь» сложилась ситуация, когда сочетание нескольких благоприятных факторов позволяет реализовать их переработку с минимальными эксплуатационными затратами.

Ожидаемый объём образования отходов на «Приморском металлургическом заводе» гораздо ниже, чем на ООО «Амурсталь», и после ввода его в эксплуатацию достаточно будет масштабировать отработанную технологию переработки металлургической окалины и шлама и реализовать её в непосредственной близости от места их образования.

Конечно, перечень предлагаемых технологий переработки техногенных отходов металлургического производства не является исчерпывающим и может быть значительно расширен после детального изучения сути проблемы, для чего необходимо активно использовать интеллектуальные и технические ресурсы как вузовской, так и академической науки ДФО.



## ЛИТЕРАТУРА

- Снижение экологической нагрузки при обращении со шлаками чёрной металлургии: моногр. / К. Г. Пугин [и др.]. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2008. – 316 с.
- Панфилов, М. И. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М. И. Панфилов [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 238 с.
- Румянцева, Г. А. Анализ технологий комплексной переработки сталеплавильных шлаков / Г. А. Румянцева, Б. М. Немененок, Т. Х. Джураев // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып. 36. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 30-39.
- Современные технологии и оборудование по переработке и использованию техногенных отходов металлургического производства / Л. А. Смирнов [и др.] // Труды Конгресса с международным участием и Конференции молодых учёных «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов». – Екатеринбург: УрО РАН, 2017. – С. 29-33.
- Экологически чистые технологические процессы и оборудование для переработки металлургических шлаков / Ю. В. Сорокин [и др.] // Международная конференция «Чёрная металлургия в XXI веке». – М.: Металлургия, 1994. – С. 273-276.
- Демин, Б. Л. Техногенные образования из металлургических шлаков как объект комплексной переработки / Б. Л. Демин, Ю. В. Сорокин, А. И. Зимин // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 99-102.
- Шешуков, Ю. А. Безотходная переработка ковшевого и электропечного шлака / Ю. А. Шешуков, Д. К. Егиазарьян, Д. А. Лобанов // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 3. – С. 192-199.
- Tsakiridis P. E., Papadimitriou G. D., Tsivilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 152. No. 2. P. 805-811. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.
- Бардин, И. П. Шлаки – ценнейший материал / И. П. Бардин // Строительная газета. – 1955. – № 7. – С. 10.
- ГОСТ 3344-83. Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия = Slag crushed stone and slag sand for road construction. Specifications: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 20 октября 1983 г. № 281: взамен ГОСТ 3344-73 и ГОСТ 23759-79: дата введения 1985-01-01 / Госстрой России. – М.: Стандартинформ, 2007. – 11 с.
- ГОСТ 5578-2019. Щебень и песок из шлаков чёрной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия = Slag crushed stone and slag sand of ferrous and non-ferrous metallurgy for cements. Specifications: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 ноября 2019 г. №11107-ст: взамен ГОСТ 5578-94: дата введения 2020-06-01 / Разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 144 «Строительные материалы и изделия». – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.
- ГОСТ 32826-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Технические требования = Automobile roads of general use. Slag rubble and sand. Technical requirements: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 февраля 2015 г. № 48-ст: введён впервые: дата введения 2015-07-01 / Разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Центр метрологии, испытаний и стандартизации», Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 418 «Дорожное хозяйство». – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
- 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.
- Старцев, Е. А. Разработка и исследование сварочной порошковой проволоки, полученной с использованием переработанных отходов металлургического предприятия / Е. А. Старцев, П. В. Бахматов, К. А. Михайлов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № V (61). – С. 117-122.
- ГОСТ 22898-78. Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия = Low-sulphur petroleum cokes. Specifications: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 05 января 1978 г. № 20: взамен ГОСТ 3278-62 и ГОСТ 15833-70: дата введения 1979-01-01 / Разработан и внесён Министерством химической и нефтеперерабатывающей промышленности СССР. – М.: Стандартинформ, 2007. – 14 с.

**К 85-летию со дня рождения Одинокова Валерия Ивановича**



16 апреля 2024 г. исполнилось 85 лет главному научному сотруднику КнАГУ, доктору технических наук, профессору, Заслуженному деятелю науки РФ, известному отечественному учёному в области механики твёрдого тела, математического моделирования технологических процессов в машиностроении, авиастроении, металлургии Валерию Ивановичу Одинокову.

Валерий Иванович Одиноков является автором более 500 научных работ, в том числе более 20 монографий, 223 изобретений, патентов и программ по моделированию различных процессов.

В. И. Одиноков родился 16 апреля 1939 г. в г. Свердловске (ныне Екатеринбург). В 1963 г. окончил Уральский политехнический институт им. С. М. Кирова, а в 1970 г. – аспирантуру. Защищил кандидатскую (1970 г.) и докторскую (1983 г.) диссертации.

Трудовую деятельность начал в 1963 г. с должности инженера в трубопрокатном отделе института «Уралгипромез», далее в Уральском политехническом институте им. С. М. Кирова прошёл путь от аспиранта (1966 г.) до старшего научного сотрудника (сентябрь 1971 г.).

С сентября 1972 г. – старший научный сотрудник лаборатории сортопрокатного производства в Уральском научно-исследовательском институте чёрных металлов, с января 1976 г. – старший преподаватель, а с февраля 1977 г. – доцент кафедры технических средств архитектурного проектирования в Свердловском архитектурном институте.

С сентября 1981 г. – доцент кафедры технической механики, с октября 1984 г. – заведующий кафедрой «Сопротивление материалов и деталей машин» Свердловского инженерно-педагогического института.

С апреля 1992 по 2013 гг. – директор Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения РАН.

С 2005 по 2013 гг. – заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

С апреля 2016 г. – профессор-консультант, а с июля 2020 г. – главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета. В. И. Одиноков, являясь членом двух диссертационных советов при Комсомольском-на-Амуре государственном университете, осуществляет научное консультирование соискателей и аспирантов, продолжает проводить фундаментальные исследования в области проблем механики, металлургии и литейного производства.



Основные направления научной деятельности:

– математическое моделирование технологических процессов металлургии и машиностроения на базе фундаментальных уравнений механики деформируемого твёрдого тела и уравнений математической физики;

– разработка новых технологических процессов и устройств по деформации материалов.

В. И. Одиноковым разработан численный метод расчёта напряжённо-деформированного состояния при упруго-пластической деформации тел под действием силовых и тепловых нагрузок. На основании этого метода автором совместно с его учениками предложены математические модели по деформации тел сложной конфигурации под действием внешних статистических и динамических полей.

В. И. Одиноков является автором уникального устройства литейно-ковочного модуля, аналогов которому нет ни в России, ни за рубежом. Устройство позволяет получать из жидкого металла непрерывно-деформируемый профиль.

В соответствии с результатами исследований В. И. Одинокова модернизированы и унифицированы существующие технологии изготовления элементов летательных аппаратов, получения осесимметричных поковок, резания, кристаллизации и деформации металла. Разработанные пакеты программ прошли апробацию и включены в технологический, образовательный и научно-исследовательские процессы на Комсомольском-на-Амуре авиационном производственном объединении, в Комсомольском-на-Амуре государственном университете, в ИМиМ ДВО РАН для научных исследований при разработке новых технологий получения изделий пластической деформацией.

Результаты многолетних научных исследований, проводимых В. И. Одиноковым и его единомышленниками, внедрены на предприятиях различного профиля России и СНГ.

От имени руководства ФГБОУ ВО «КнАГУ», коллег и друзей поздравляем Валерия Ивановича Одинокова с 85-летием, желаем крепкого здоровья и творческих успехов в работе.

# Содержание

## АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Бобков А. В., Миташова Т. А.

ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ САМОЛЁТНОГО ТИПА .....4

## ЭНЕРГЕТИКА

Знаенок В. Н., Мельниченко О. В., Портной А. Ю.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА К ПЛЕЧУ  
ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ .....10

Фролов А. В., Боцманов А. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ МОСТОВОГО  
ВЫПРЯМИТЕЛЯ С АКТИВНО-ЁМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ .....20

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Андреанов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ  
ТУРБИННОЙ ЛОПАТКИ С ДЕФЕКТОМ .....32

Просолович А. А.

ПРИМЕНЕНИЕ WEBGL ПРИ РАЗРАБОТКЕ  
ГИС КАМПУСА УНИВЕРСИТЕТА .....38

Петрова А. Н., Фролов Д. О.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ  
В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ .....43

Петрова А. Н., Фролов Д. О.

РАЗРАБОТКА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СКВОЗНОГО ОБУЧЕНИЯ  
МОДЕЛЕЙ ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ .....48

Фролов А. В., Савин А. Е., Нестерова Н. С., Жданова С. М.

УПРАВЛЕНИЕ ДРАЙВЕРОМ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ  
С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ДЕЛИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ  
С ПЕРЕМЕННЫМ ДРОБЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДЕЛЕНИЯ .....53

Гумунюк П. В.

СРАВНЕНИЕ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ НА РАЗРАБОТКУ ПРОГРАММНОГО  
ПРОДУКТА РУЧНЫМ СПОСОБОМ И СРЕДСТВАМИ  
АВТОМАТНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ .....63

Базилевский М. П.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕКСА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ  
ЦЕН ПО ДАННЫМ СУБЪЕКТОВ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА  
С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЬНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ .....74

Ефремов М. А., Ткачук А. А., Монастырский Д. Я., Ким К. К., Иванов С. Н.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
ПРИВОДА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА .....82

Космынин А. В., Щетинин В. С., Марынин С. Б.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА ГАЗОМАГНИТНЫХ ОПОРАХ  
ЗА СЧЁТ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИЛОЙ .....93

Саялина П. О., Крупский Р. Ф., Черный С. П., Савельев Д. О.

АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ .....97

Сухоруков С. И., Годяев А. И., Овсянников А. Р.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО  
КОМПЛЕКСА ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ .....103

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Кабалдин Ю. Г., Саблин П. А.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА  
НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РЕЗАНИИ .....112

Лиманкин В. В., Старцев Е. А., Бельский В. В.

НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ .....119

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

К 85-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

ОДИНОКОВА ВАЛЕРИЯ ИВАНОВИЧА .....123

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ  
2024 № III (75)  
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор  
С. Н. Иванов

Подписано в печать 25.06.2024  
Дата выхода в свет 28.06.2024

Формат А4.  
Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.  
Усл. печ. л. 13,63.  
Уч.-изд. л. 17,18.  
Тираж 200. Заказ 31145

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

