

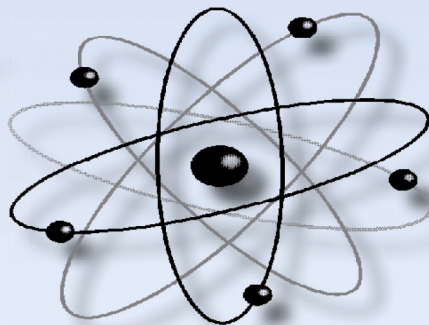
# Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ I (89)

2026

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.

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

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

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

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

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КнАГУ», находящейся на сайте <https://uzknastu.ru>

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

Адрес учредителя и издателя: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27  
Телефон для справок: +7 (4217) 528-548

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

Индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090. Цена свободная.

© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КнАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

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

Журнал основан в 2010 году

### Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:	<b>Сергей Петрович Черный</b> , доктор технических наук, доцент. E-mail: keparu@knastu.ru
Заместитель главного редактора журнала:	<b>Александр Витальевич Космынин</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:	<b>Евгения Павловна Иванкова</b> , кандидат технических наук. E-mail: journal@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	<b>Галина Алексеевна Шушарина</b> , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Ответственный секретарь:	<b>Алина Валерьевна Бузикаева</b> , кандидат технических наук. E-mail: keparu@knastu.ru
Литературный редактор:	<b>Татьяна Николаевна Карпова</b> . E-mail: karpovat@list.ru
Технический редактор:	<b>Татьяна Николаевна Карпова</b> . E-mail: karpovat@list.ru
Перевод на английский язык:	<b>Галина Алексеевна Шушарина</b> , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Дизайн и верстка:	<b>Оксана Вадимовна Приходченко</b> , кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru
Менеджер информационных ресурсов:	<b>Татьяна Владимировна Степанова</b> . E-mail: osnid@knastu.ru
Администратор сайта:	<b>Никита Станиславович Шушарин</b> . E-mail: web_dev@knastu.ru

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

<b>Отделы:</b>	
1. Авиационная и ракетно-космическая техника (2.5.13 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов)	<b>Сергей Иванович Феоктистов</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail: ssf@knastu.ru <b>Сергей Борисович Марьин</b> , доктор технических наук, доцент. E-mail: maryinsb@mail.ru
2. Электротехнические комплексы и системы (2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы)	<b>Константин Константинович Ким</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail: kimkk@inbox.ru <b>Александр Владимирович Сериков</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail: em@knastu.ru <b>Сергей Николаевич Иванов</b> , доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
3. Управление в технических системах (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	<b>Вячеслав Алексеевич Соловьев</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail: keparu@knastu.ru <b>Сергей Петрович Черный</b> , доктор технических наук, доцент. E-mail: keparu@knastu.ru <b>Андрей Юрьевич Торгашов</b> , доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)	<b>Валерий Иванович Одинокоев</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: osnid@knastu.ru <b>Александр Витальевич Космынин</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru <b>Константин Сергеевич Бормотин</b> , доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru
5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)	<b>Борис Яковлевич Мокрицкий</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail: boris@knastu.ru <b>Владимир Сергеевич Щетинин</b> , доктор технических наук, доцент. E-mail: schetynin@mail.ru
6. Материаловедение и химические технологии (2.6.17 - Материаловедение)	<b>Эдуард Анатольевич Дмитриев</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail: 013696@togudv.ru <b>Олег Викторович Башков</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (1.1.8 - Механика деформируемого твёрдого тела)	<b>Анатолий Александрович Буренин</b> , доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru <b>Олег Евгеньевич Сысов</b> , доктор технических наук, профессор. E-mail: sia@knastu.ru

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

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

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

# Содержание

## АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Феоктистов С. И., Марьин С. Б., Лозовский И. В., Кравченко А. К.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ С РАДИАЛЬНЫМ СЖАТИЕМ .....	4
---	---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Фролов А. В., Пукас А. Ю.

ИМПУЛЬСНЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛА ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ .....	11
--	----

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Стельмашук С. В., Лакеев Ю. И.

ОГРАНИЧЕНИЕ МОМЕНТА УПРУГОСТИ В ДВУХМАССОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЧАСТОТНО-ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ .....	22
--	----

Сысоев С. Н., Сидоров В. С.

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОРРЕКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ВТУЛКА-ВТУЛКА» .....	35
---	----

Пухов А. А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРАМЕТРАМИ ВХОДЯЩЕГО В ДВИГАТЕЛИ ВОЗДУХА .....	44
---	----

Урасов Д. В.

МЕТОД ОЦЕНКИ СТАБИЛИЗАЦИИ ДУГИ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЁХФАЗНОГО ТОКА .....	50
---	----

Сбитнев Н. Р., Савельев Д. О., Черный С. П.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ .....	55
--	----

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Магола Д. С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВЕ БИОИНСПИРИРОВАННОГО АГЕНТНОГО ПОДХОДА .....	64
---	----

Хряпенко К. Д., Григорьева А. Л.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ПЛАСТИНАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ РАСТЯЖЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ .....	72
--	----

Иванов Б. С., Копытов С. М., Ульянов А. В.

ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОЙ ГАЗОМАГНИТНОЙ ОПОРЫ .....	77
---	----

Липанов И. Д.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДИАГНОСТИКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ RGB- И ПСЕВДО-LIDAR ДАННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ .....	86
--	----

Петрова А. Н., Фролов Д. О.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ШУМОВ И ПРОПУСКОВ ДАННЫХ НА КАЧЕСТВО НЕЙРОСЕТЕВОГО РАНЖИРОВАНИЯ .....	94
---	----

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Максимов И. С., Галанский С. А., Рахчеев В. Г., Кушнир А. И.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА ФАСОННЫМИ АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ .....	105
--	-----

Ваниев Э. Р., Джемилев Э. Ш., Бекиров Э. Л., Тимофеев С. А., Башкова Т. И.

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЁТ ПРИРАБОТКИ .....	115
---	-----

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

**Феоктистов С. И., Марьин С. Б., Лозовский И. В., Кравченко А. К.**  
**S. I. Feoktistov, S. B. Maryin, I. V. Lozovsky, A. K. Kravchenko**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ С РАДИАЛЬНЫМ СЖАТИЕМ**

**DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES AT ELASTIC-PLASTIC BENDING OF SHEET STOCK WITH RADIAL COMPRESSION**

**Феоктистов Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: serg\_feo@mail.ru.

**Sergey I. Feoktistov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Research Scientist, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: serg\_feo@mail.ru.

**Марьин Сергей Борисович** – доктор технических наук, доцент кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Sergey B. Maryin** – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Aircraft and Computer Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

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

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

**Кравченко Андрей Константинович** – аспирант кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

**Andrey K. Kravchenko** – Postgraduate Student, Aircraft and Computer Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

**Аннотация.** Определены остаточные напряжения при упругопластическом изгибе листовой заготовки с радиальным сжатием. Анализ остаточных напряжений показал, что при различных радиусах изгиба и различных усилиях радиального сжатия они всегда являются самоуравновешенными. Получены выражения, позволяющие методом последовательных приближений определить скорректированные на величину пружинения геометрические параметры оснастки, при которых получают требуемые размеры детали.

**Summary.** Residual stresses at elastic-plastic bending of sheet blank with radial compression are determined. Analysis of residual stresses has shown that at different bending radii and different radial compression forces, they are always self-balanced. Expressions are obtained that allow using the method of successive approximations to determine the geometric parameters of the equipment corrected for the spring value, at which the required dimensions of the part are obtained during bending with radial compression.

**Ключевые слова:** изготовление труб и профилей, летательные аппараты, свёртывание листовой заготовки, упругопластический изгиб, эластосыпучая среда, моделирование напряжённо-деформированного состояния.

**Key words:** pipes and profiles manufacture, aircraft, sheet blank rolling, elastic-plastic bending, elastic loose medium, stress-strain modeling.

УДК 621.7.043:629.73.063

В авиационной отрасли большая часть деталей гидрогазовых систем летательных аппаратов изготавливается из полупатрубок с последующим соединением посредством сварки. Присутствие двух сварных швов при окончательном формообразовании заготовки до прямой трубы приводит к

нежелательному увеличению её массы и снижению надёжных характеристик всей бортовой системы. Актуальным путём решения проблем по уменьшению массы конструкций летательных аппаратов, себестоимости изготовления технологической оснастки и подготовительного периода производства считается активное внедрение в авиационном производстве технологических процессов свёртывания (гибки) листовых заготовок в эластичной и эластосыпучей среде. Данная технология даёт возможность обеспечить высокопроизводительный выпуск одношовных тонкостенных трубных деталей гидрогазовых систем летательных аппаратов, характеризующихся нестандартным профилем.

Отличительной особенностью предложенной технологии гибки в эластосыпучей среде от обычной свободной гибки является то, что деформируемая заготовка после нагружения приобретает форму деформирующей оснастки, испытывая со стороны эластичной среды сжимающие радиальные усилия. Одна из ключевых задач технологии изготовления подобных элементов заключается в определении правильной геометрии деформирующей оснастки с учётом эффекта пружинения материала заготовки и достижения необходимой формы детали. Для успешного достижения требуемой геометрической точности детали после снятия нагрузок необходимо точно рассчитать величину остаточных напряжений, возникающих при упругопластическом изгибе листовой заготовки под воздействием радиального сжатия.

Рассмотрим полученные результаты исследования данной задачи.

**1. Определение остаточных напряжений при изгибе с радиальным сжатием.** Согласно теории пластичности, остаточные напряжения после пластической деформации определяются с помощью теоремы Генки, доказанной А. Ильюшиным [1]. Теорема утверждает, что величина остаточных напряжений равна разнице между истинными напряжениями в упругопластическом материале и фиктивными напряжениями. Под фиктивными напряжениями мы понимаем те напряжения, которые возникли бы при приложении аналогичных сил и моментов, предполагая абсолютную упругость материала.

Основой для анализа деформационного состояния листовой заготовки при изгибе с радиальным сжатием послужит гипотеза плоских сечений [2; 3; 4], постулирующая сохранение плоскости первоначальных сечений заготовки на протяжении всего процесса деформирования [5].

Так как радиальное давление на внешнюю поверхность заготовки при упругопластическом изгибе и упругой разгрузке равно, то, без учёта давления слоёв заготовки при изгибе, можно считать, что радиальные остаточные напряжения равны нулю:

$$\sigma_{\rho, \text{ост}} = 0.$$

Истинные тангенциальные  $\sigma'_{\varphi}$  напряжения, возникающие при упругопластическом изгибе, известны, представлены на рис. 1 и определяются уравнением

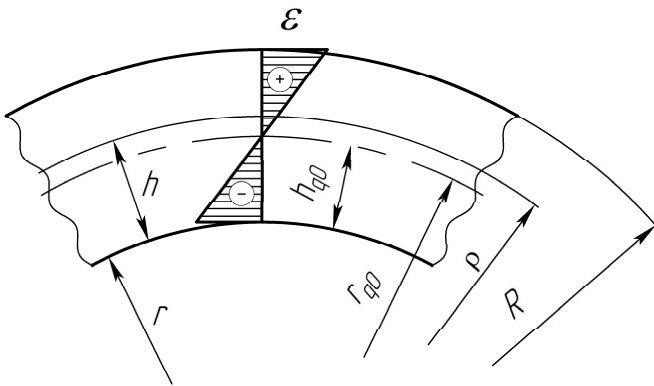
$$\sigma'_{\varphi} = \begin{cases} \sigma'_{\rho} - 4G \ln \frac{r_{q0}}{\rho} & \text{при } \rho'_{\text{пл}} \leq \rho < r_{q0} \\ \sigma'_{\rho} - \frac{2}{\sqrt{3}} K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_{q0}}{\rho} \right)^n & \text{при } r \leq \rho < \rho'_{\text{пл}} \end{cases},$$

где  $\sigma'_{\rho}$  – радиальные напряжения;  $G$  – модуль упругости второго рода;  $r_{q0}$  – радиус изгиба нейтрального слоя, т. е. слоя, конечная длина которого равна его исходной длине при изгибе с радиальным сжатием;  $\rho$  – текущий радиус произвольного слоя заготовки;  $\rho'_{\text{пл}}$  – радиус границы между упругой и пластической зонами в сжатой области;  $K$  – параметр степенной функции, который выражается через основные механические характеристики материала;  $r = r_{\text{осн}}$  – внутренний радиус заготовки, равный радиусу оснастки.

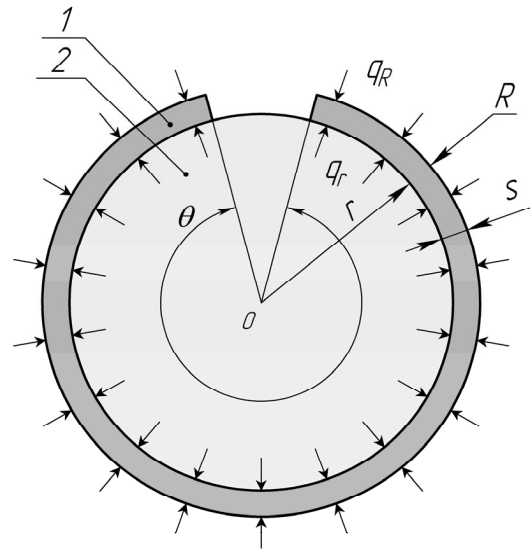
Фиктивный радиус нейтрального слоя при разгрузке  $\rho_{\text{оразг}}$  определяется по формуле

$$\rho_{\text{оразг}} = \sqrt{R r},$$

где  $R$  – наружный радиус заготовки;  $r$  – внутренний радиус заготовки (см. рис. 2).



$h$  – положение текущего слоя заготовки по толщине;  $h_{q0}$  – положение нейтрального слоя заготовки по толщине;  $r_{q0}$  – радиус нейтрального слоя заготовки;  $\rho$  – текущий радиус произвольного слоя заготовки  
Рис. 1. Схема распределения относительных тангенциальных деформаций по толщине заготовки при изгибе с радиальным сжатием



1 – заготовка; 2 – цилиндрическая оснастка;  
 $R$  – наружный радиус заготовки;  
 $r = r_{очн}$  – внутренний радиус заготовки, равный радиусу оснастки;  $q_R$  – радиальное давление на заготовку рабочей среды;  $q_r$  – радиальное давление на заготовку со стороны оснастки;  $s$  – толщина заготовки;  $\theta = \theta_{очн}$  – угол изгиба заготовки, равный углу изгиба по оснастке  
Рис. 2. Схема процесса гибки листовой заготовки по жёсткому пуансону с радиальным сжатием

Далее находится фиктивный радиус внутренней поверхности заготовки при упругой разгрузке  $r_{разг}$  по формуле

$$r_{разг} = \sqrt{\rho_{0разг}^2 + \frac{s^2}{4}} - \frac{s}{2},$$

где  $s$  – толщина заготовки.

Фиктивные тангенциальные напряжения, которые создавались бы с известными значениями изгибающего момента и радиального сжатия при изгибе идеально упругой заготовки, определяются по формуле

$$\sigma_\varphi = \begin{cases} 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho}{\rho_{q0}} \right)^2 - \left( \ln \frac{R}{\rho_{q0}} \right)^2 \right] - q_R + 4G \ln \frac{\rho}{\rho_{q0}} & \text{при } \rho_{q0} \leq \rho \leq R \\ 2G \left[ \left( \ln \frac{\rho_{q0}}{\rho} \right)^2 - \left( \ln \frac{\rho_{q0}}{r} \right)^2 \right] - q_r - 4G \ln \frac{\rho_{q0}}{\rho} & \text{при } r \leq \rho < \rho_{q0} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\rho_{q0}$  – радиус нейтрального слоя при упругом изгибе с радиальным сжатием;  $q_R$  – радиальное давление на заготовку рабочей среды;  $q_r$  – радиальное давление на заготовку со стороны оснастки.

Радиус нейтрального слоя при упругой разгрузке численно находится из уравнения

$$\left(\ln \frac{R}{\rho_{0\text{разг}}}\right)^2 - \left(\ln \frac{\rho_{0\text{разг}}}{r}\right)^2 - \frac{(qr - qR)}{2G} = 0. \quad (2)$$

Принимая в выражении (2), что  $r = r_{\text{разг}}$  и  $R = R_{\text{разг}} = r_{\text{разг}} + s$ , определяем численно положение нейтрального слоя  $\rho_{0\text{разг}}$  при упругой разгрузке. Затем по уравнениям (1) с учётом сделанных замен определяем фиктивные тангенциальные напряжения при разгрузке  $\sigma_{\varphi\text{разг}}$ . Теперь, зная фиктивные напряжения упругой разгрузки и истинные напряжения  $\sigma_{\varphi}$ , возникающие при упругопластическом изгибе, можем определить остаточные тангенциальные напряжения:

$$\sigma_{\varphi\text{ост}} = \sigma_{\varphi} - \sigma_{\varphi\text{разг}}$$

Рис. 3 демонстрирует эпюры остаточных тангенциальных напряжений при разных значениях радиального сжатия [6]. Видно, что увеличение радиального сжатия вызывает почти вертикальное смещение эпюры остаточных напряжений вниз.

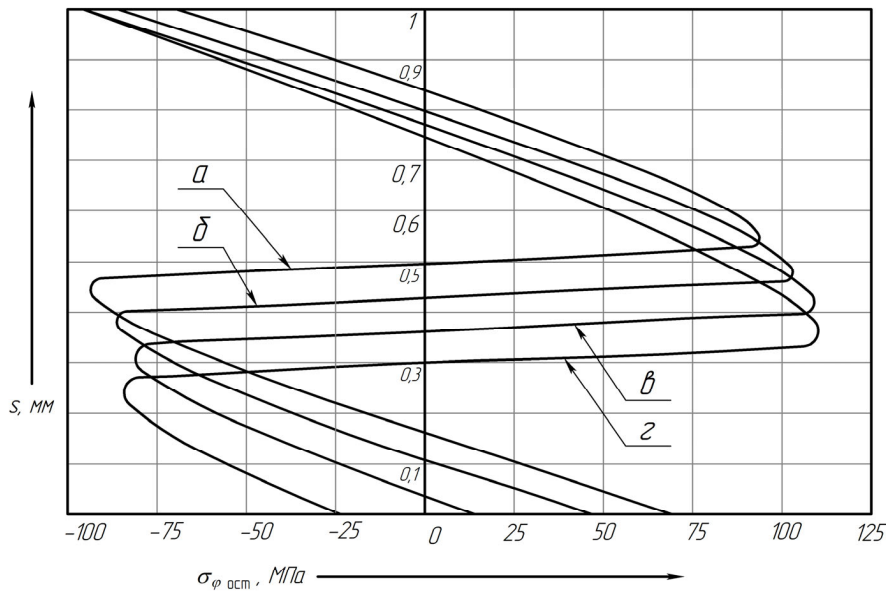


Рис. 3. Эпюры остаточных тангенциальных напряжений при различных величинах радиального сжатия: а –  $qR = 0$  МПа; б –  $qR = 25$  МПа; в –  $qR = 50$  МПа; г –  $qR = 75$  МПа

Согласно теореме Генки о разгрузке [1], можно заключить, что эпюра остаточных напряжений всегда находится в состоянии самоуравновешенности, т. е. равнодействующие силы и моменты равны нулю.

Как показали расчёты, для эпюр, представленных на рис. 4, вне зависимости от величины радиального сжатия будут выполняться следующие условия:

$$\bar{P}_{q\text{ост}\varphi} = \int_{r_{\text{ост}}}^{R_{\text{ост}}} \sigma_{\varphi\text{ост}}(\rho) d\rho = 0,$$

$$\bar{M}_{q\text{ост}\varphi} = \int_{r_{\text{ост}}}^{R_{\text{ост}}} \sigma_{\varphi\text{ост}}(\rho)\rho d\rho = 0,$$

что подтверждает правильность построенных эпюр остаточных тангенциальных напряжений.

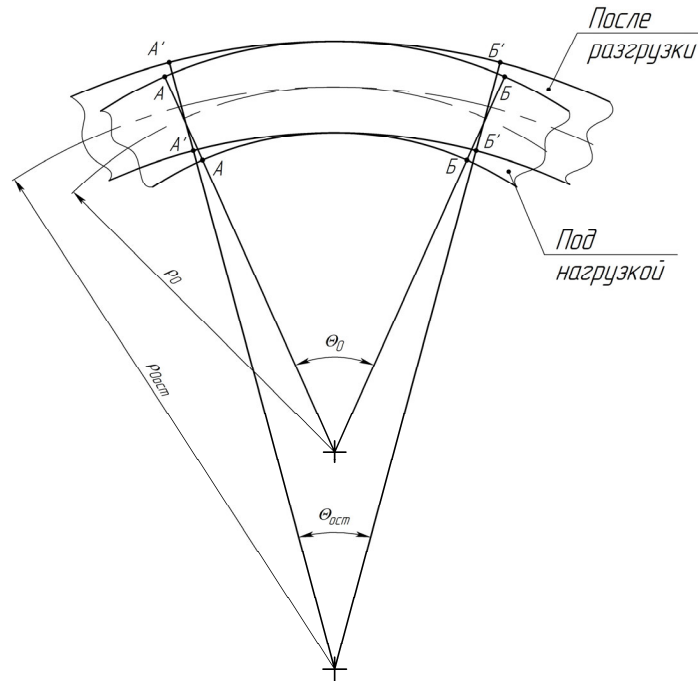


Рис. 4. Действие упругих деформаций на изогнутую деталь в процессе разгрузки

**2. Определение требуемого радиуса оснастки с учётом пружинения при изгибе с радиальным сжатием.** Для технологов основной задачей является определение радиуса оснастки при условии, что после снятия нагрузки заготовка примет требуемую форму, т. е. её кривизна будет соответствовать кривизне детали, заданной чертежом [7].

Существует определённое соотношение, связывающее радиус слоя заготовки при изгибе по оснастке с радиусом этого же слоя, но уже готовой разгруженной. Именно разность между кривизной этого слоя под нагрузкой и его кривизны при разгрузке определяет конечную кривизну указанного слоя разгруженной заготовки:

$$\frac{1}{\rho_{\text{ост}}} = \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{\text{разг}}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{разг}}$  – фиктивный радиус кривизны нейтрального слоя абсолютно упругой заготовки при воздействии изгибающего момента и радиального сжатия, эквивалентного изгибающему моменту и радиальному сжатию при нагружении;  $\rho_0$  – радиус слоя заготовки под нагрузкой, соответствующий  $\rho_{\text{разг}}$ ;  $\rho_{\text{ост}}$  – остаточный радиус слоя заготовки после разгрузки, соответствующий  $\rho_{\text{разг}}$ .

В выражении (3) остаточный радиус  $\rho_{\text{ост}}$  будет равен радиусу детали  $\rho_{\text{дет}}$ , а радиус изгиба  $\rho_0$  будет равен искомому радиусу оснастки  $\rho_{\text{осн}}$ . Тогда, определяем изменение кривизны нейтрального слоя при разгрузке с учётом момента внутренних сил при изгибе с учётом радиального сжатия  $\bar{M}_{q\phi}$ , формулой

$$\frac{1}{\rho_{\text{разг}}} = \frac{3\bar{M}_{q\phi}}{GS^3 \left(1 + \frac{q_R}{4G}\right)},$$

получим

$$\frac{1}{\rho_{\text{дет}}} = \frac{1}{\rho_{\text{осн}}} - \frac{3\bar{M}_{q\phi}}{GS^3 \left(1 + \frac{q_R}{4G}\right)}.$$

Как было сказано ранее, при разгрузке нейтральный слой практически совпадает со срединной поверхностью изогнутого элемента, поэтому данное уравнение можно представить в виде

$$\frac{1}{r_{\text{дет}} + \frac{s}{2}} = \frac{1}{r_{\text{осн}} + \frac{s}{2}} - \frac{3\bar{M}_{q\varphi}(r_{\text{осн}})}{Gs^3 \left(1 + \frac{q_R}{4G}\right)}. \quad (4)$$

Так как момент внутренних сил при изгибе  $\bar{M}_{q\varphi}(r_{\text{осн}})$  зависит от радиуса оснастки, из выражения (4) выразить  $r_{\text{осн}}$  в явном виде невозможно, поэтому для определения  $r_{\text{осн}}$  воспользуемся методом последовательных приближений и запишем выражение (4) в рекуррентной форме:

$$\frac{1}{r_{\text{осн}}^{(k+1)} + \frac{s}{2}} = \frac{1}{r_{\text{дет}} + \frac{s}{2}} + \frac{3\bar{M}_{q\varphi}(r_{\text{осн}}^{(k)})}{Gs^3 \left(1 + \frac{q_R}{4G}\right)},$$

или

$$r_{\text{осн}}^{(k+1)} = \frac{Gs^3 \left(1 + \frac{q_R}{4G}\right) \left(r_{\text{дет}} + \frac{s}{2}\right)}{Gs^3 \left(1 + \frac{q_R}{4G}\right) + 3\bar{M}_{q\varphi}(r_{\text{осн}}^{(k)}) \left(r_{\text{дет}} + \frac{s}{2}\right)} - \frac{s}{2}, \quad (5)$$

где  $r_{\text{осн}}^{(k+1)}$  – значение радиуса оснастки в  $(k+1)$ -м приближении;  $r_{\text{дет}}$  – внутренний радиус детали по чертежу;  $\bar{M}_{q\varphi}(r_{\text{осн}}^{(k)})$  – момент внутренних сил при изгибе заготовки с радиальным сжатием при внутреннем радиусе изгиба  $r = r_{\text{осн}}^{(k)}$ ;  $r_{\text{осн}}^{(k)}$  – значение радиуса оснастки в  $k$ -м приближении.

Как показали вычисления, формула (5) даёт очень большую скорость сходимости процесса последовательных приближений: после трёх приближений разность между предыдущим и последующим значением  $r_{\text{осн}}$  не превышает 0,01 %.

После определения радиуса оснастки можно определить требуемый угол изгиба по оснастке. Для получения формулы, определяющей требуемый угол изгиба при гибке, воспользуемся уравнением

$$\theta_{\text{ост}} = \theta \frac{(r + h_{\text{оразг}})}{(r_{\text{ост}} + h_{\text{оразг}})},$$

в котором заменим параметры остаточные на параметры детали, параметры изгиба – на параметры оснастки:

$$\theta_{\text{осн}} = \theta_{\text{дет}} \frac{\left(r_{\text{дет}} + \frac{s}{2}\right)}{\left(r_{\text{осн}} + \frac{s}{2}\right)}. \quad (6)$$

Таким образом, при помощи уравнений (5) и (6) можно определить геометрические параметры оснастки, позволяющие получать детали с размерами, указанными на чертеже.

Численное моделирование по разработанной методике проводится посредством разработанной программы по определению остаточного радиуса и остаточных напряжений в заготовке при изгибе с учётом радиального сжатия, права на которую официально закреплены свидетельством о государственной регистрации [8].

Обобщая вышесказанное, можем отметить, что изгиб заготовки происходит посредством действующего на технологическую оснастку деформирующего усилия, в ответ на которое с её стороны возникает сжимающая нагрузка. Общая картина напряжённо-деформированного состояния меняется за счёт дополнительных нормальных напряжений, возникающих при сжатии заготовки и меняющих положение нейтрального слоя нормальных напряжений при изгибе. Распределённая сжимающая нагрузка принимается постоянной по всей длине изгиба. Достижение представленных положений реализуется использованием технологической среды в виде эластичных или эластосыпучих материалов.

Представленные результаты исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Анализ показал, что остаточные напряжения при различных радиусах изгиба и различных усилиях радиального сжатия всегда являются самоуравновешенными, т. е. равнодействующие силы и моменты равны нулю. Это подтверждает достоверность полученных результатов.



2. Получены выражения в рекуррентной форме, позволяющие методом последовательных приближений определить скорректированные на величину пружинения геометрические параметры оснастки, при которых при изгибе с радиальным сжатием получают требуемые размеры детали.

3. Разработана программа для определения остаточного радиуса и остаточных напряжений в заготовке при изгибе с учётом радиального сжатия, права на которую закреплены свидетельством о государственной регистрации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильюшин, А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 270 с.
2. Горбунов, М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолётов / М. Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
3. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
4. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки: учеб. пособие для вузов / Е. А. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
5. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
6. Андрианов, И. К. Основы построения диаграмм деформирования с учётом сжимаемости материала и эффекта Баушингера: учеб. пособие / И. К. Андрианов, С. И. Феоктистов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – 103 с.
7. Метод решения обратной задачи раздачи средней части трубы для расчёта формы штампа / К. С. Бормотин, Д. А. Потянихин, А. А. Синельщиков [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № V (61). – С. 40-45.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662681 Российская Федерация. Программа для определения остаточного радиуса и остаточных напряжений в заготовке при изгибе с учётом радиального сжатия: заявл. 24.04.2025; опубл. 22.05.2025 / Лозовский И. В., Феоктистов С. И., Марьин С. Б.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».
9. Моделирование напряжённо-деформированного состояния при упругопластическом изгибе листовой заготовки и оценка кривизны в процессе её упругой разгрузки / С. И. Феоктистов, С. Б. Марьин, И. В. Лозовский, А. К. Кравченко // Вестник Московского авиационного института. – 2025. – Т. 32. – № 4. – С. 112-125.

**Фролов А. В., Пукас А. Ю.**  
**A. V. Frolov, A. Y. Pukas**

**ИМПУЛЬСНЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛА ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**PULSE SIMULATOR OF THE RESISTANCE THERMOMETER SIGNAL FOR ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES VENTILATION SYSTEMS**

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

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

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

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

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования работы импульсного потенциометра на переключаемых резисторах с транзисторной оптопарой для электротехнических комплексов управления вентиляционными системами. Исследования выполнены теоретическими расчётами, моделированием в программе SimInTech, а также натурными испытаниями на регистраторе ОВЕН 2TRM1. Показано, что регулировочная характеристика зависит практически от всех элементов схемы, а также от напряжения и сопротивления внешней цепи и тока схемы управления. Теоретически рассчитана математическая модель импульсного потенциометра. При моделировании в программе SimInTech определены зависимости эквивалентного сопротивления импульсного потенциометра от параметров элементов схемы и внешних цепей. Представлены результаты проверки работы схемы при её использовании в качестве имитатора сигнала термопреобразователя при двухпроводной схеме подключения к реальному регистратору температуры.

**Summary.** There are presented the results of research of the switched resistors pulse potentiometer with a transistor optocoupler operation for ventilation electrical control systems. The research was carried out using theoretical calculations, SimInTech program modeling, and tests on the OWEN 2TRM1 recorder. It is shown, that the control characteristic depends on almost all circuit elements, as well as on the external circuit voltage and resistance, and the control circuit current. A pulse potentiometer mathematical model has been theoretically calculated. It were determined the dependences of the pulse potentiometer equivalent resistance on the circuit elements and external circuits parameters by SimInTech program modeling. There are presented the results of testing the circuit operation, when it is used as a temperature transducer signal simulator, with a real temperature recorder.

**Ключевые слова:** потенциометр, импульсный, электротехническая система, термометр сопротивления, расчёт, моделирование, SimInTech, регулировочная характеристика, математическая модель.

**Key words:** potentiometer, pulse, electrical system, resistance thermometer, calculation, modeling, SimInTech, control characteristic, mathematical model.

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

УДК 621.314.6

**Введение.** В современных электротехнических системах различного назначения часто применяются схемы измерения температуры, в том числе для контроля температуры обмоток электродвигателя, трансформатора, корпусов радиаторов охлаждения силовых транзисторов и тири-

стором с целью исключения их выхода из строя вследствие перегрева; для контроля температуры теплоносителя в системах автоматического управления тепловыми пунктами; для контроля температуры воздуха в помещении в системах управления вентиляцией, обогревом и кондиционированием; для контроля температуры пищевых продуктов в системах хранения; для контроля температурных условий выполнения различных технологических процессов и т. д. В промышленных системах измерения температуры достаточно часто используют в качестве датчиков температуры термометры сопротивлений на основе платины или меди с номинальным сопротивлением 50, 100, 500, 1000 Ом. В климатических системах в основном используются датчики температуры типа Pt1000, т. к. они менее чувствительны к сопротивлению линии связи и, следовательно, включаются по двухпроводной схеме.

При проведении пусконаладочных, ремонтных работ, при контрольных испытаниях вышеописанных систем управления часто требуется имитировать сигналы нескольких датчиков температуры для определения корректности показаний регистрирующего прибора и правильности реакции системы управления на различные изменения сигналов датчиков. Для этого требуются гальванически развязанные между собой имитаторы сигналов датчиков температуры с программным либо дистанционным управлением.

Для имитации сигналов термометров сопротивлений обычно используются калибраторы. Наибольшая часть калибраторов представляет собой набор коммутируемых высокоточных резисторов, которые воспроизводят передаточную характеристику термометра сопротивления. Но количество воспроизводимых температурных точек, как правило, мало. Более сложные устройства выполнены на цифровых потенциометрах [3; 5; 7], благодаря чему способны воспроизводить гораздо больше температурных точек. Но подавляющее большинство этих устройств являются одноканальными, без гальванической развязки и не предназначены для интеграции в более сложные устройства контроля и испытаний, т. е. не имеют входов дистанционного управления. Кроме того, цена таких калибраторов достаточно высока. Вышеуказанное не позволяет использовать существующие имитаторы в составе сложных стендов контроля систем управления, содержащих несколько схем измерения температуры.

Теоретически можно использовать схемы на основе цифровых потенциометров, которые представляют собой цифроаналоговые преобразователи с делителем Кельвина. Но указанные микросхемы нуждаются в электропитании, что влечёт необходимость усложнения схемы за счёт применения дополнительных гальванически изолированных источников вторичного электропитания. Для управления цифровым потенциометром применяются стандартизированные шины различных типов: параллельная, SPI, UART, I<sup>2</sup>C. Указанные шины данных и управления также необходимо гальванически изолировать с помощью оптопар, что ещё дополнительно усложняет схему. Количество ступеней регулирования цифровых потенциометров, как правило, мало (от 64 до 256), ряд номиналов сопротивлений цифровых потенциометров широкого применения достаточно мал (1, 5, 10, 50, 100 кОм). В результате это приводит к большой дискретности воспроизводимых температурных точек. Максимально допустимое напряжение не должно превышать напряжение питания (как правило, 5 В), что также ограничивает возможности применения цифровых потенциометров для имитации сигналов датчиков термометров сопротивления [11].

Заслуживает внимания импульсный принцип регулирования сопротивления потенциометра. Так, известна схема на переключаемом конденсаторе [2; 4; 8; 9] (см. рис. 1, а), которая позволяет изменять эквивалентное сопротивление за счёт изменения скважности сигналов управления, что используется для управления характеристиками аналоговых фильтров, усилителей, генераторов и других функциональных блоков аналоговой схемотехники. Но эта схема требует использования дополнительной третьей клеммы – общей точки схемы. При двухпроводной схеме подключения имитатора сигнала термодатчика это условие не может быть выполнено.

В [11] предложена схема импульсного потенциометра на переключаемых резисторах (см. рис. 1, б), которая свободна от вышеуказанных недостатков и может быть эффективно использована. Но анализ работы этой схемы был выполнен при допущении, что коммутатор S1 идеальный, т. е. в разомкнутом положении ток через него равен нулю, а в замкнутом положении падение

напряжения на нём равно нулю. Обычно в качестве коммутатора с гальванической развязкой используются транзисторные оптопары, для которых в «закрытом» режиме транзистора током коллектора можно пренебречь, но в «открытом» режиме транзистор находится либо в режиме насыщения, и на нём падает напряжение порядка 1 В, либо в активном режиме, в котором транзистор фактически работает как стабилизатор тока. Поэтому полученные в [11] аналитические выражения требуют корректировки для применения в схемах с транзисторной оптопарой в качестве коммутатора.

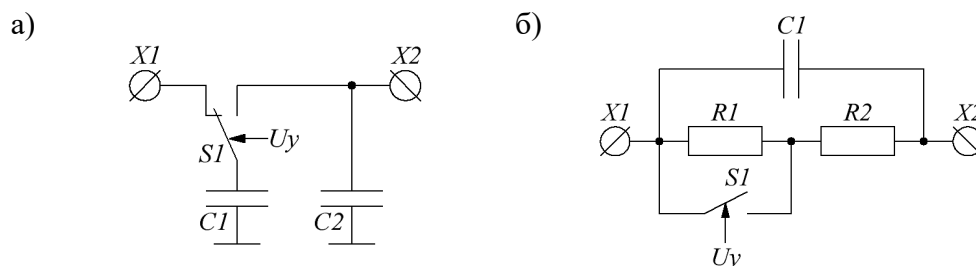


Рис. 1. Схемы импульсного потенциометра: а – на переключаемом конденсаторе; б – на переключаемых резисторах

В связи с вышеизложенным в настоящей статье приводятся результаты исследования работы схемы импульсного потенциометра с транзисторной оптопарой.

**Теоретические расчёты.** В качестве коммутатора выбрана транзисторная оптопара РС817В с коэффициентом передачи тока 130...260, максимальным входным и выходным токами 50 мА, максимальным выходным напряжением 80 В. Характеристики оптопары представлены на рис. 2 [13]. На рис. 2 использованы следующие обозначения:  $I_c$  – ток коллектора;  $U_{ce}$  – напряжение «коллектор-эмиттер»;  $U_{ce.sat}$  – напряжение «коллектор-эмиттер» в режиме насыщения;  $I_{vd}$  – ток светодиода.

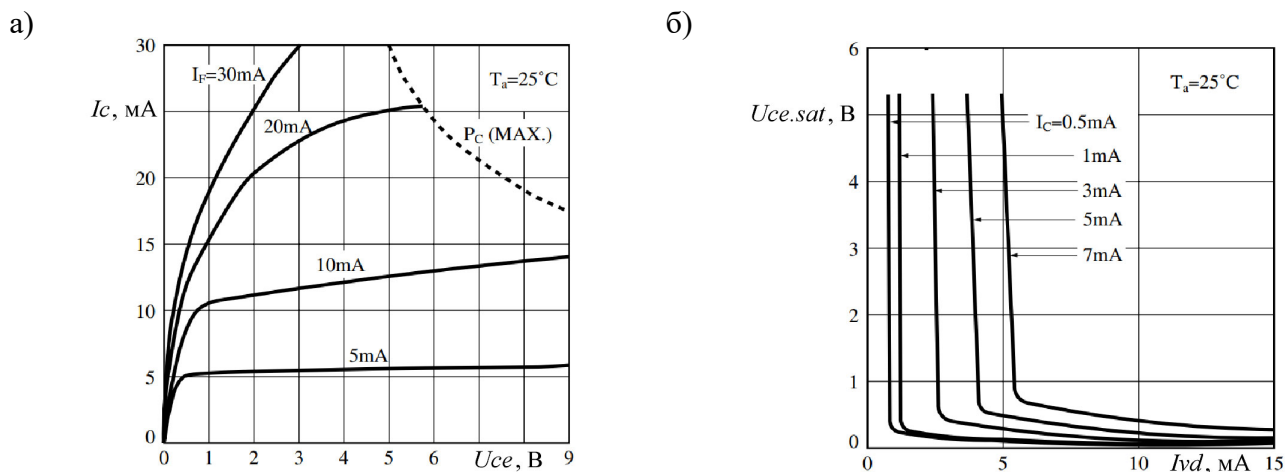


Рис. 2. Характеристики оптопары РС817В: а – выходные вольт-амперные характеристики; б – зависимости напряжения насыщения от тока коллектора и тока светодиода

Для приближения режима работы оптопары к режиму работы идеального ключа необходимо, чтобы транзистор в «открытом» состоянии находился в режиме насыщения. Как видно из рис. 2, для этого необходимо, чтобы ток светодиода был не менее 7 мА, а ток коллектора – не более 7 мА. При этом напряжение насыщения не будет превышать 0,5 В. Для снижения напряжения насыщения необходимо увеличивать ток светодиода и уменьшать ток коллектора.

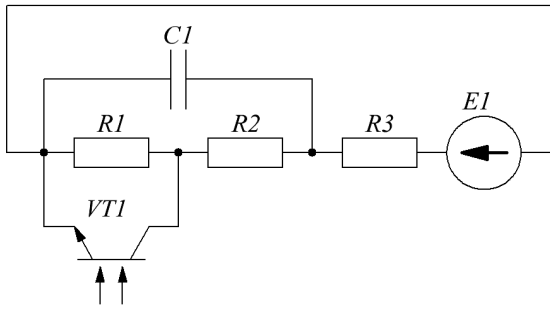


Рис. 3. Эквивалентная схема

В экспериментах внешняя (по отношению к импульсному потенциометру) схема заменялась на эквивалентное сопротивление  $R3 = 1$  кОм и эквивалентный источник ЭДС  $E1 = 10$  В (см. рис. 3), что обеспечивает ток коллектора оптопары не более 1 мА. Номинальное значение тока светодиода оптопары – 20 мА. Используя правила Кирхгофа, закон Ома, дифференциальное уравнение, описывающее работу конденсатора, получаем следующие уравнения для исследуемой схемы. В режиме отсечки транзистора:

$$\begin{cases} i_c(t) + i_2(t) = i_3(t) \\ E1 = R3 \cdot i_3(t) + u_c(t) \\ u_c(t) = i_2(t) \cdot R' \\ i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \\ R' = R1 + R2 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $i_c(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  – соответственно токи конденсатора и резисторов  $R2$  и  $R3$ , А;  $E1$  – напряжение источника ЭДС, В;  $C$  – ёмкость конденсатора, Ф;  $u_c(t)$  – напряжение на конденсаторе, В;  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  – сопротивления резисторов, Ом.

Решение системы уравнений относительно  $i_3(t)$  и  $u_c(t)$ :

$$\begin{cases} u_c(t) = (u_c(0) - U) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + U \\ \tau = C1 \frac{R3 \cdot R'}{R3 + R'} \\ i_3(t) = \frac{E1 - u_c(t)}{R3} \\ U = E1 \frac{R'}{R' + R3} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $u_c(0)$  – напряжение на конденсаторе в момент перехода транзистора в режим отсечки, В;  $\tau$  – постоянная времени цепи в режиме отсечки, с;  $U$  – установившееся значение напряжения конденсатора, В.

Зависимость напряжения насыщения транзистора от тока коллектора в первом приближении можно заменить на линейную зависимость:  $u_{ce,sat}(i_{VT}) = R_{VT} \cdot i_{VT}$ , где  $R_{VT}$  – сопротивление транзистора в режиме насыщения. По данным рис. 1, б, при токе светодиода 15 мА сопротивление транзистора в режиме насыщения:  $R_{VT} \approx \frac{U_{ce,sat}}{i_k}$ ,  $R_{VT} \approx \frac{0,25}{7 \cdot 10^{-3}} = 35,7$  Ом.

В режиме насыщения транзистора работа схемы описывается системой уравнений (1), но при условии

$$R' = R2 + \frac{R1 \cdot R_{VT}}{R1 + R_{VT}}. \quad (3)$$

Решение этой системы уравнений описывается формулами (2) с учётом выражения (3).

Транзисторная оптопара управляется импульсами с регулируемой длительностью импульса:  $\gamma = \frac{t_1}{t_1 + t_0} = \frac{t_1}{T}$ , где  $\gamma$  – коэффициент заполнения (или ширина импульса);  $t_1$ ,  $t_0$  – соответственно длительности режима насыщения и отсечки транзистора, с;  $T$  – период импульсов, с.

В установившемся режиме (см. рис. 4) с учётом законов коммутации справедливы выражения:  $u_{c,1}(0) = u_{c,0}(t_0)$  и  $u_{c,0}(0) = u_{c,1}(t_1)$ , где  $u_{c,1}(0)$ ,  $u_{c,0}(0)$  – соответственно напряжения на

конденсаторе в момент перехода транзистора в режимы насыщения и отсечки, В;  $u_{c.0}(t_0), u_{c.1}(t_1)$  – соответственно напряжения на конденсаторе в моменты завершения работы в режимах отсечки и насыщения, В. Из этих выражений определим напряжения в точках коммутации:

$$u_{c.1}(0) = \frac{-U_1 \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1} - \frac{t_0}{\tau_0}\right) + (U_1 - U_0) \exp\left(-\frac{t_0}{\tau_0}\right) + U_0}{1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1} - \frac{t_0}{\tau_0}\right)},$$

$$u_{c.0}(0) = \frac{-U_0 \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1} - \frac{t_0}{\tau_0}\right) + (U_0 - U_1) \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right) + U_1}{1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1} - \frac{t_0}{\tau_0}\right)}.$$

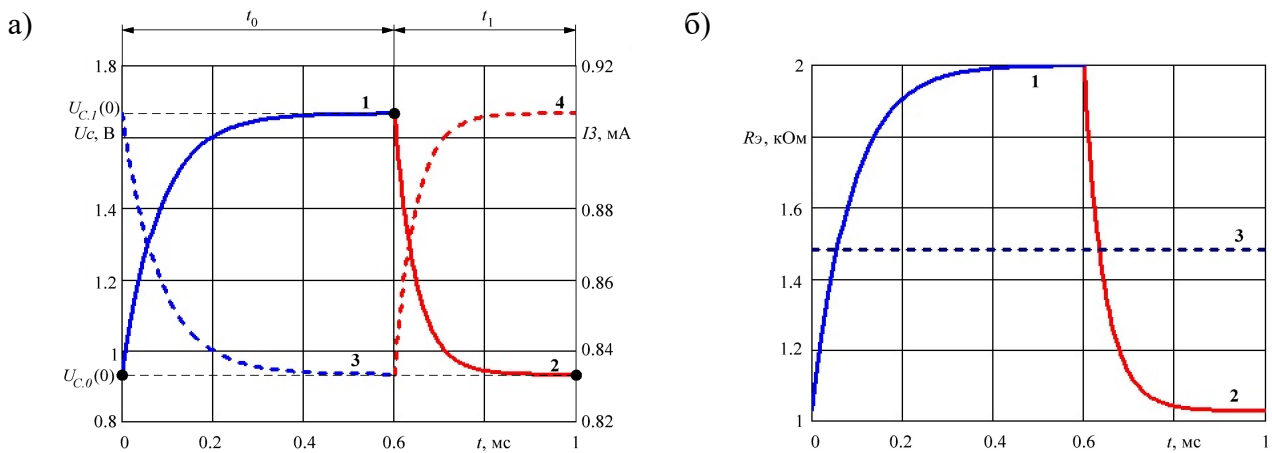


Рис. 4. Диаграммы работы импульсного потенциометра в режиме  $E1 = 10$  В;  $C1 = 50$  нФ;  $R1 = 1$  кОм;  $R2 = 1$  кОм;  $R3 = 10$  кОм;  $R_{VT} = 30$  Ом;  $T = 1$  мс;  $\gamma = 0,4$ : а – диаграммы напряжений и токов: 1 –  $u_{c.0}$ ; 2 –  $u_{c.1}$ ; 3 –  $i_{3.0}$ ; 4 –  $i_{3.1}$ ; б – диаграммы эквивалентного сопротивления: 1 –  $R_{э.0}$ ; 2 –  $R_{э.1}$ ; 3 –  $R_э$

Среднее значение эквивалентного сопротивления импульсного потенциометра

$$R_э = R3 \frac{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} u_{c.0}(t) dt + \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} u_{c.1}(t) dt}{2E1 - \left( \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} u_{c.0}(t) dt + \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} u_{c.1}(t) dt \right)} = \frac{R3}{\frac{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} u_{c.0}(t) dt + \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} u_{c.1}(t) dt}{2E1} - 1},$$

где  $R_э$  – среднее значение эквивалентного сопротивления импульсного потенциометра, Ом;  $u_{c.0}(t), u_{c.1}(t)$  – соответственно мгновенные значения напряжений конденсаторов при работе в режимах отсечки и насыщения транзистора, В;

$$R_э = \frac{R3}{\frac{(U_0 - u_{c.0}(0)) \cdot \tau_0 \cdot \left(\exp\left(-\frac{t_0}{\tau_0}\right) - 1\right)}{t_0} + U_0 + \frac{(U_1 - u_{c.1}(0)) \cdot \tau_1 \cdot \left(\exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right) - 1\right)}{t_1} + U_1} - 1} \quad (4)$$

где  $U_0, U_1$  – соответственно установившиеся значения напряжения конденсатора в режимах отсечки и насыщения транзистора, В;  $\tau_0, \tau_1$  – соответственно постоянные времени  $RC$ -цепи в режимах отсечки и насыщения транзистора, с.

Анализ выражения (4) показывает (см. рис. 5), что эквивалентное сопротивление импульсного потенциометра изменяется в пределах  $R_3 = \left( R2 + \frac{R1 \cdot R_{VT}}{R1 + R_{VT}} \right) \dots (R1 + R2)$  при изменении сигнала управления оптопарой  $\gamma = 1 \dots 0$ . Вид регулировочной характеристики сильно зависит от сопротивлений резисторов  $R1$  и  $R2$ , но не зависит от напряжения источника питания  $E1$  и практически не зависит от сопротивления внешней цепи  $R3$  при условиях  $R3 > R1$  и  $R3 > R2$ .

Пульсации эквивалентного сопротивления:

$$\begin{aligned} \Delta R_3 &= R_{3,\max} - R_{3,\min} = \frac{u_{c,\max}}{i_{3,\min}} - \frac{u_{c,\min}}{i_{3,\max}} = \frac{u_{c,1}(0)}{\frac{E1 - u_{c,1}(0)}{R3}} - \frac{u_{c,0}(0)}{\frac{E1 - u_{c,0}(0)}{R3}} = \\ &= R3 \left( \frac{1}{\frac{E1}{u_{c,1}(0)} - 1} - \frac{1}{\frac{E1}{u_{c,0}(0)} - 1} \right). \end{aligned}$$

Пульсации эквивалентного сопротивления зависят как от разности значений  $U_1, U_0$ , так и от соотношений  $\frac{t_0}{\tau_0}, \frac{t_1}{\tau_1}$ . Для снижения пульсаций необходимо выполнение условий:  $\tau_0 \gg t_0$  и  $\tau_1 \gg t_1$ .

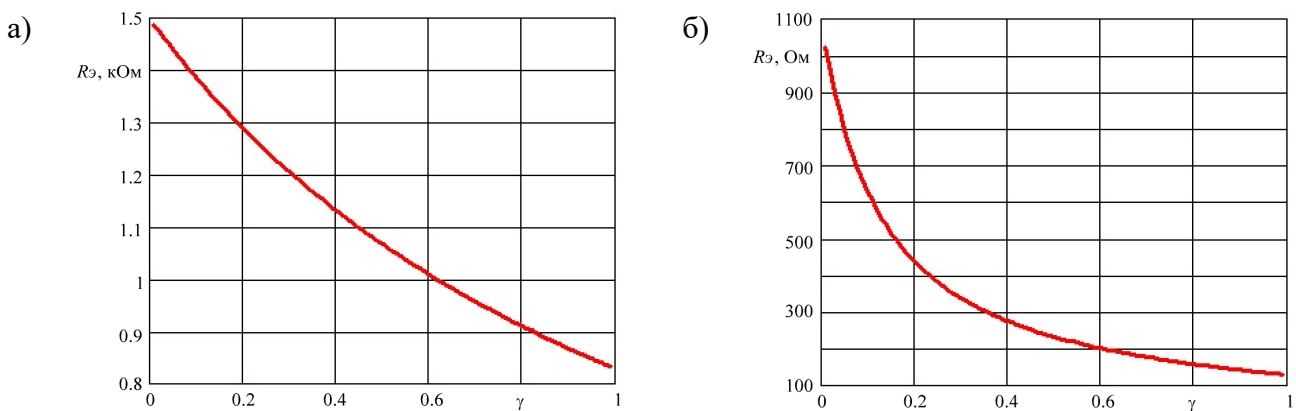


Рис. 5. Регулировочные характеристики импульсного потенциометра:  
а – при  $R1 = 700 \text{ Ом}$ ,  $R2 = 800 \text{ Ом}$ ; б – при  $R3 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R2 = 100 \text{ Ом}$

**Методика исследований.** Моделирование работы схемы проводилось в программе SimInTech [1; 6; 10; 12]. Исследуемая схема представлена на рис. 6, а.

Параметры элементов схемы:  $R1 = 700 \text{ Ом}$ ,  $R2 = 800 \text{ Ом}$ ,  $R3 = 1 \text{ кОм}$ ,  $C1 = 5 \text{ мкФ}$ ,  $U_{п} = 10 \text{ В}$ ,  $f = 1 \text{ кГц}$ . Так как в программе SimInTech отсутствует модель транзисторной оптопары, она была заменена на модель IGBT-транзистора с сопротивлением  $35,7 \text{ Ом}$  и падением напряжения  $0,25 \text{ В}$ .

Модель измеряет мгновенные значения напряжения и тока импульсного ключа, по которым рассчитывает мгновенное значение эквивалентного сопротивления, усредняет его с помощью фильтра нижних частот (инерционного звена первого порядка) с коэффициентом усиления 1 и постоянной времени  $10 \text{ мс}$ . Результаты расчёта отображаются на рис. 6, б. По диаграмме определяются среднее значение эквивалентного сопротивления и время переходного процесса.

Проверка результатов расчётов и моделирования проводилась путём подключения схемы импульсного потенциометра по двухпроводной схеме к измерителю-регулятору ОВЕН 2ТРМ1. Напряжение на измерительных клеммах в режиме холостого хода  $3,7 \text{ В}$ . Внутреннее сопротивление  $300 \text{ Ом}$ . Режим измерения – термометр сопротивления  $100\text{М}$ . Схема импульсного потенциометра модифицировалась в соответствии с рис. 3.

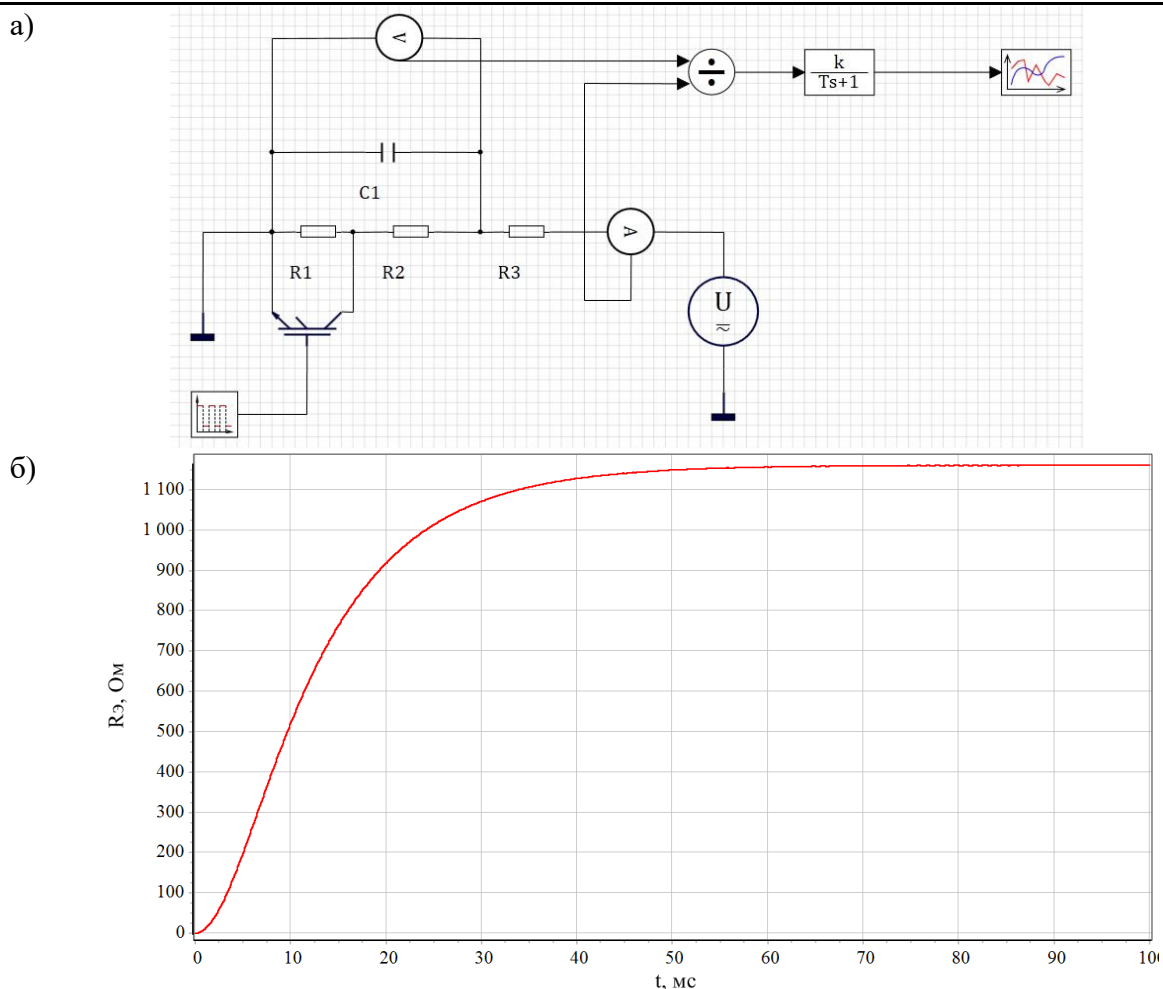


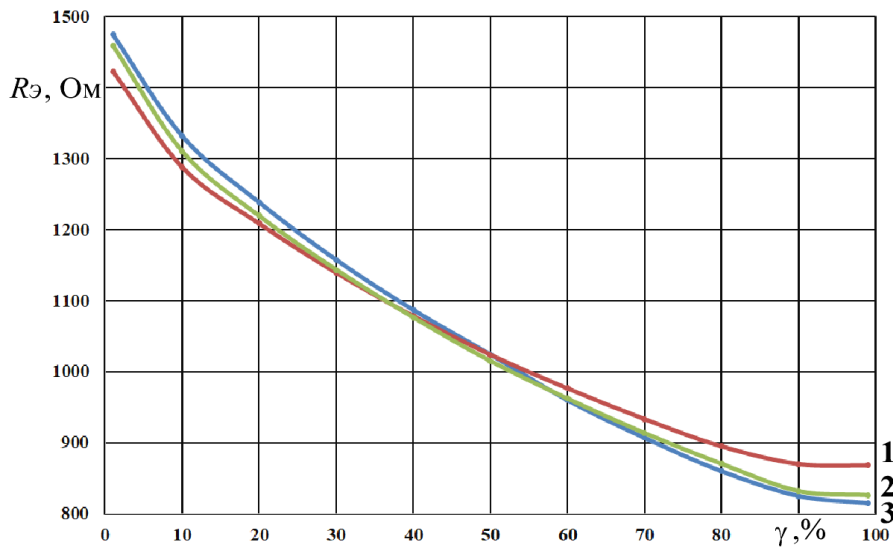
Рис. 6. Моделирование в программе SimInTech: а – схема; б – график изменения эквивалентного сопротивления при  $\gamma = 0,4$

**Результаты исследований и их обсуждение.** В программе SimInTech было выполнено моделирование работы схемы импульсного потенциометра при разных режимах работы. Результаты эксперимента показаны на рис. 7-9.

Анализ результатов эксперимента показывает, что вид регулировочной характеристики совпадает с рассчитанным по формуле (4). Регулировочная характеристика малочувствительна к сопротивлению внешней цепи при условии, что оно не превышает 1 кОм (для исследованной схемы). Более высокие значения сопротивления внешней цепи, равно как и снижение напряжения питания внешней цепи, снижают ток цифрового потенциометра, что приводит к значительному изменению эквивалентного сопротивления транзистора в режиме насыщения и к значительному изменению регулировочной характеристики. Малые значения тока светодиода оптопары приводят к выходу фототранзистора из режима насыщения в активный режим, что оказывает значительное влияние на эквивалентное сопротивление импульсного потенциометра.

Для исследованной схемы можно считать оптимальными следующие значения элементов схемы: ток светодиода – не менее 20 мА; напряжение внешней цепи – 3...10 В; сопротивление внешней цепи – не более 1 кОм. Соблюдение этих условий позволит минимизировать чувствительность регулировочной характеристики к изменению внешних факторов (напряжению и сопротивлению внешней цепи). Если напряжение и сопротивление внешней цепи не меняются во время работы, то импульсный потенциометр может работать и с другими параметрами схемы (при обеспечении гарантированной работы транзистора в режиме насыщения), но перед эксплуатацией схе-

ма нуждается в наладке, заключающейся в настройке системы управления под регулировочную характеристику реальной схемы.



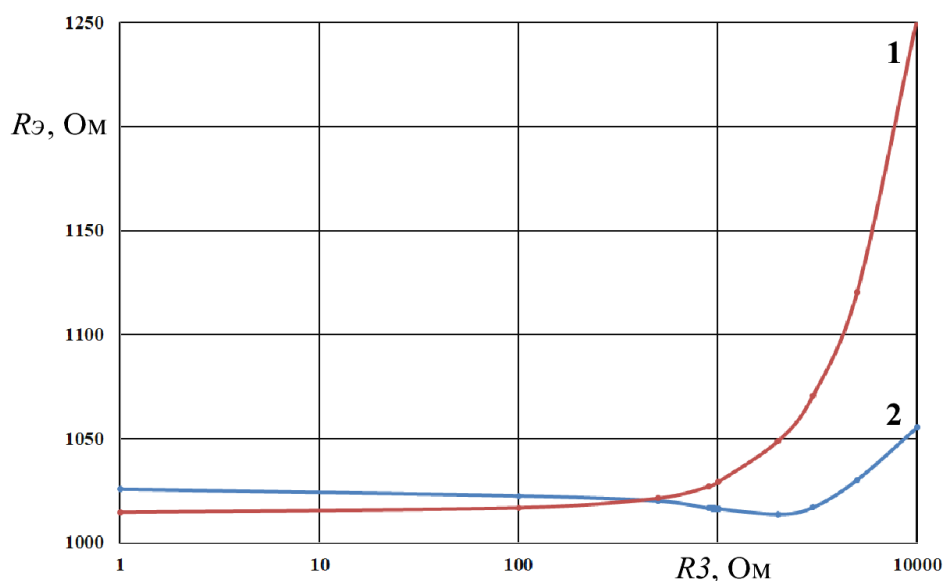
1 –  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ; 2 –  $R_3 = 1 \text{ кОм}$ ; 3 –  $R_3 = 5 \text{ кОм}$

Рис. 7. Регулировочные характеристики импульсного потенциометра при  $E_1 = 10 \text{ В}$

Результаты тестирования работы реальной схемы импульсного потенциометра (см. рис. 10) в качестве имитатора сигнала термометра сопротивления для измерителя ОВЕН 2ТРМ1 показаны на рис. 11. Вид полученной регулировочной характеристики соответствует графикам теоретических расчётов (см. рис. 5, а) и математического моделирования (см. рис. 7). Полученные регулировочные характеристики могут быть аппроксимированы с точностью  $R^2 = 0,998$  следующими функциями:

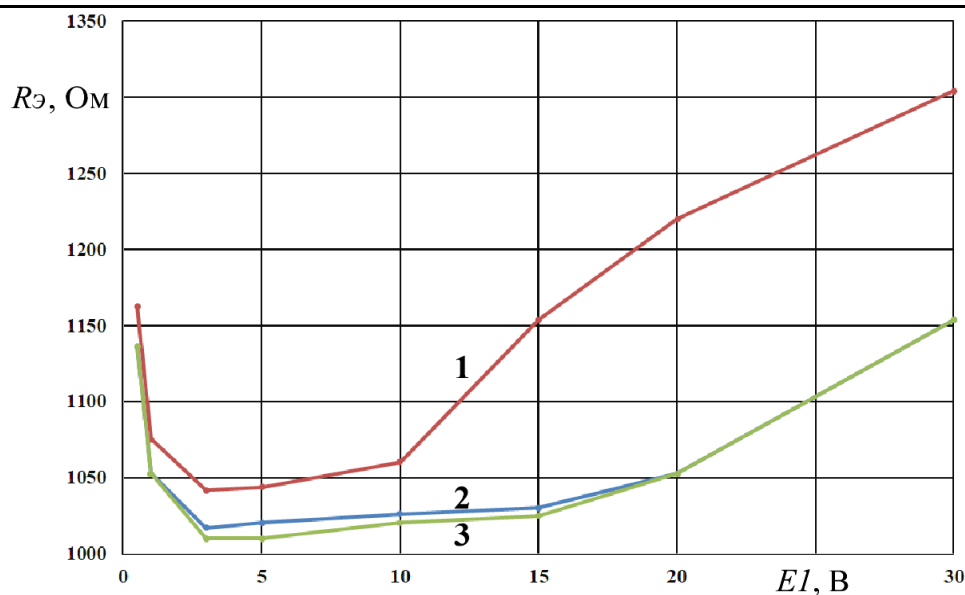
$$T(\gamma) = 0,0179 \cdot \gamma^2 - 4,9337 \cdot \gamma + 255,93, \quad (5)$$

$$R_3(\gamma) = 0,0071 \cdot \gamma^2 - 2,0243 \cdot \gamma + 206,44. \quad (6)$$



1 –  $E_1 = 3 \text{ В}$ ; 2 –  $E_1 = 10 \text{ В}$

Рис. 8. Зависимость эквивалентного сопротивления от сопротивления внешней цепи и напряжения питания при  $\gamma = 50 \%$



1 –  $I_{VD} = 10$  мА; 2 –  $I_{VD} = 20$  мА; 3 –  $I_{VD} = 40$  мА

Рис. 9. Зависимость эквивалентного сопротивления от напряжения питания и тока светодиода оптопары при  $\gamma = 50\%$

**Выводы:**

1. Схема импульсного потенциометра на коммутируемом резисторе работоспособна и обеспечивает регулирование эквивалентного сопротивления в диапазоне  $R_э = \left( R_2 + \frac{R_1 \cdot R_{VT}}{R_1 + R_{VT}} \right) \dots (R_1 + R_2)$  при изменении коэффициента заполнения ШИМ-сигнала управления  $\gamma = 1 \dots 0$ . При этом схема отличается простотой, имеет только один вход управления, управляется ШИМ-сигналом и подключается во внешнюю цепь с помощью двух клемм аналогично аналоговому потенциометру, обеспечивает гальваническую развязку цепи управления, не требует дополнительного источника электропитания, дискретность изменения эквивалентного сопротивления определяется разрешающей способностью ШИМ (шагом изменения коэффициента заполнения).

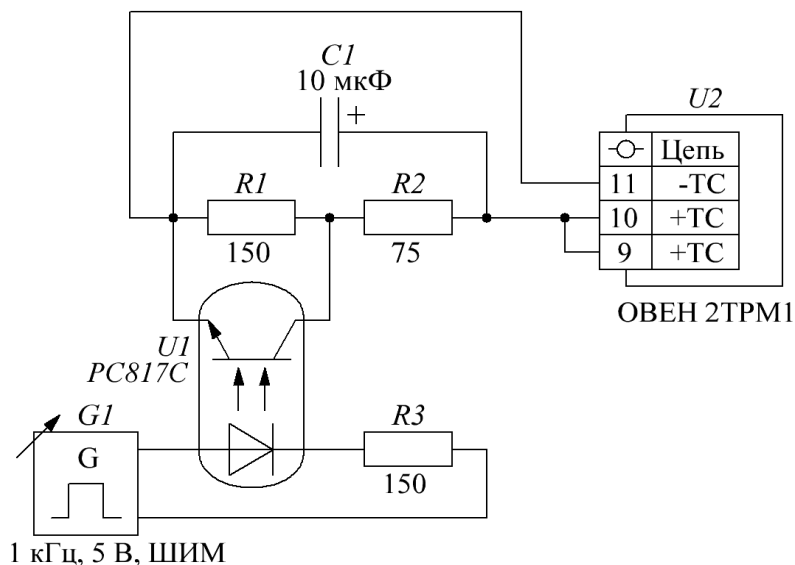
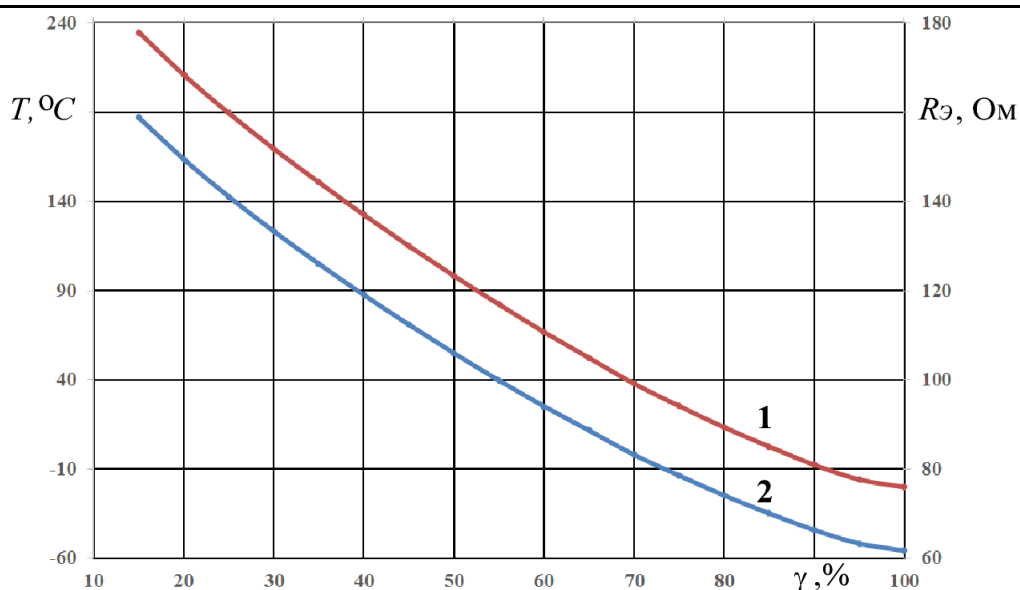


Рис. 10. Схема экспериментальной установки



1 – эквивалентное сопротивление; 2 – температура

Рис. 11. Регулировочная характеристика импульсного потенциометра

2. Регулировочная характеристика схемы отличается значительной нелинейностью, зависит от множества факторов и описывается выражением (4), но может быть аппроксимирована квадратичной зависимостью типа (5), (6) с точностью 0,998 типа. Регулировочная характеристика зависит не только от элементов схемы импульсного потенциометра, но и от параметров внешней цепи: тока управления светодиодом транзисторного оптрона, напряжения и сопротивления внешней цепи. Поэтому перед эксплуатацией схема нуждается в настройке регулировочной характеристики на работу в конкретной внешней цепи. Для минимизации влияния параметров внешней цепи на регулировочную характеристику необходимо: обеспечить работу транзистора оптрона в режиме насыщения (для исследованной схемы – не менее 20 мА); исключить работу схемы при малых и очень больших токах внешней цепи (для исследованной схемы напряжение внешней цепи – 3...10 В и сопротивление внешней цепи – не более 1 кОм).

3. Пульсации эквивалентного сопротивления определяются диапазоном регулирования эквивалентного сопротивления и постоянными времени цепи схемы. Для снижения пульсаций необходимо задать постоянные времени цепи много больше длительности импульса и паузы сигнала управления. Но повышение постоянных времени цепи приводит к увеличению длительности переходных процессов при изменении режима работы схемы. Схема характеризуется низким быстродействием (для исследованной схемы время установления составляет порядка 50 мс при частоте ШИМ 1 кГц).

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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-1 (51). – С. 29-38.
2. Беспятов, А. Б. Сложная динамика схемы на переключаемых конденсаторах / А. Б. Беспятов, В. И. Пономаренко. – Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1998. – 26 с.
3. Власенко, А. Применение цифровых потенциометров фирмы Analog Devices / А. Власенко // Компоненты и технологии. – 2005. – № 8 (52). – С. 58-60.
4. Гауси, М. С. Активные фильтры с переключаемыми конденсаторами / М. С. Гауси, К. Р. Лакер. – М.: Радио и связь, 1986. – 168 с.
5. Деревягин, А. Российская микросхема двухканального цифрового потенциометра на 256 положений с трёхпроводным последовательным интерфейсом / А. Деревягин, В. Бодров // Компоненты и технологии. – 2006. – № 11 (64). – С. 70-74.

Фролов А. В., Пукас А. Ю.

ИМПУЛЬСНЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛА ТЕРМОМЕТРА СОПРОТИВЛЕНИЯ СИСТЕМ  
ВЕНТИЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

6. Иванкова, Е. П. Исследование электромеханического привода возвратно-поступательного движения в пакете имитационного моделирования / Е. П. Иванкова, М. Б. Колесник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 54-62.
7. Пушкарев, М. Цифровые потенциометры / М. Пушкарев // Компоненты и технологии. – 2006. – № 5 (58). – С. 74-81.
8. Рембеза, С. И. Секционный цифро-аналоговый преобразователь для проектирования конвейерных КМОП-КНИ-АЦП при минимизации переключаемых конденсаторов / С. И. Рембеза, В. С. Кононов // Моделирование систем и процессов. – 2013. – № 3. – С. 32-34.
9. Торопчин, Д. С. Синтез перестраиваемых фильтров высокого порядка на переключаемых МОП-конденсаторах в однородном базисе / Д. С. Торопчин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12. – № 2. – С. 35-40.
10. Фролов, А. В. Исследование особенностей работы мостового выпрямителя с активно-ёмкостной нагрузкой / А. В. Фролов, А. В. Боцманов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 20-31.
11. Фролов, А. В. Исследование схемы импульсного цифрового потенциометра с использованием программы SimInTech / А. В. Фролов, А. Ю. Пукас // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № VII (87). – С. 15-22.
12. Фролов, А. В. Применение модифицированного сигма-дельта-модулятора для деления частоты цифровых сигналов / А. В. Фролов, А. Н. Швец, Ю. Ф. Мусихин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 63-67.
13. Data sheet PC817x series. – SHARP Corporation, 2003. – 15 p. // АО «ЧИП и ДИП», 2006-2026. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/332/DOC004332917.pdf> (дата обращения: 18.02.2026). – Текст: электронный.

**Стельмашук С. В., Лакеев Ю. И.**  
**S. V. Stelmashchuk, Yu. I. Lakeev**

**ОГРАНИЧЕНИЕ МОМЕНТА УПРУГОСТИ В ДВУХМАССОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЧАСТОТНО-ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**LIMITING THE ELASTIC TORQUE IN A TWO-MASS MECHANICAL SYSTEM OF AN INDUCTION ELECTRIC DRIVE WITH FREQUENCY-VECTOR CONTROL**

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

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

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

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

**Аннотация.** Разработка систем электроприводов с упругой многомассовой механической частью играет ключевую роль в совершенствовании методов проектирования агрегатов в машиностроении, способствуя повышению производительности механизмов. В этой связи исследование многомассовых электроприводов остаётся актуальной научной и инженерной задачей. В статье рассматривается двухмассовый одиночный электропривод. Предложен способ реализации контура момента упругости, возникающего между двумя массами. Ключевое преимущество подхода – возможность введения ограничения момента упругости на входе контура. Подобные электроприводы целесообразно применять в механизмах, где превышение момента упругости способно привести к разрушению упругого рабочего органа. В качестве примеров таких рабочих органов можно назвать барабаны больших размеров или длинные вращающиеся трубы. Введение ограничения момента упругости позволяет снизить требования к проектированию подобных механизмов и создавать агрегаты с более высокой производительностью. В рамках данной статьи не рассматриваются методы измерения момента упругости и способы определения коэффициента упругости.

**Summary.** The design of electric drive systems with an elastic multi-mass mechanical part plays a key role in improving the design methods of aggregates in mechanical engineering, contributing to increased productivity of mechanisms. In this regard, the study of multi-mass electric drives remains an urgent scientific and engineering task. The article discusses a two-mass single electric drive. A method for implementing a contour of the elastic torque arising between two masses is proposed. The key advantage of the approach is the possibility of introducing a limitation of the elastic torque at the contour inlet. It is advisable to use such electric drives in mechanisms where exceeding the elastic torque can lead to the destruction of the elastic working body. Examples of such working bodies include large drums or long rotating pipes. The introduction of elastic torque limitation makes it possible to reduce the requirements for the design of such mechanisms and create units with higher productivity. This article does not consider methods for measuring the elastic torque and methods for determining the coefficient of elasticity.

**Ключевые слова:** цилиндрический рабочий орган, модальный регулятор, стандартная настройка, контур момента упругости.

**Key words:** cylindrical working body, modal regulator, standard tuning, elastic torque contour.

УДК 62-523.8

**Введение.** В промышленности имеются механизмы, где рабочий орган имеет форму полого цилиндра существенных размеров. Например, для измельчения материалов в энергетике, горнодобывающей промышленности и других областях используются шаровые мельницы или центрифуги-

ги. Для перемещения материалов в производстве стройматериалов, пищевой промышленности и других областях используются транспортирующие трубы. Здесь рабочим органом является барабан или труба, которые имеют цилиндрическую форму. В динамических режимах вращения в обечайке цилиндра возникают моменты упругости, которые прямо пропорциональны длине цилиндра. При возникновении значительных величин моментов упругости при кручении цилиндра возникают критические ситуации, которые приводят к поломке и разрушению корпуса цилиндра. Для предотвращения аварийной ситуации на этапе конструирования рабочего органа (барабана, трубы) выполняют укрепление обечайки цилиндра, что приводит к утяжелению рабочего органа, а следовательно, уменьшению быстродействия и увеличению мощности привода вращения. Другой мерой снижения нежелательных упругих воздействий является уменьшение габаритных размеров цилиндра по длине или диаметру, что приводит к снижению производительности механизма. Для повышения производительности механизмов с рабочим органом в форме полого цилиндра возникает необходимость в контроле упругих усилий, возникающих в обечайке цилиндра, что делает задачу разработки электропривода, контролирующего упругие усилия, актуальной [1–3].

В статье предлагается автоматизированный электропривод с двухмассовой механической частью, где реализован контур момента упругости. Это даёт возможность ограничивать момент упругости по аналогии с осуществлением ограничения тока якоря в приводе постоянного тока с подчинённым регулированием [4; 5]. Ограничение момента упругости позволит конструировать рабочие органы цилиндрической формы повышенных размеров без использования излишних укреплений. Это приведёт к созданию механизмов с большей производительностью при использовании той же приводной мощности.

**Постановка задачи.** Рассмотрим электропривод с двухмассовой упругой механической частью, рабочий орган которой представляет собой полый цилиндр (см. рис. 1). Примем, что обечайка цилиндра является упругой с коэффициентом упругости  $C_{12}$ . Таким образом, электропривод, вращающий цилиндр, представляет собой двухмассовую систему, где первой массой является ротор двигателя и половина цилиндра  $J_1 = J_D + \frac{J_{PO}}{2}$ , а второй массой – другая половина цилиндра без ротора двигателя  $J_2 = \frac{J_{PO}}{2}$ .

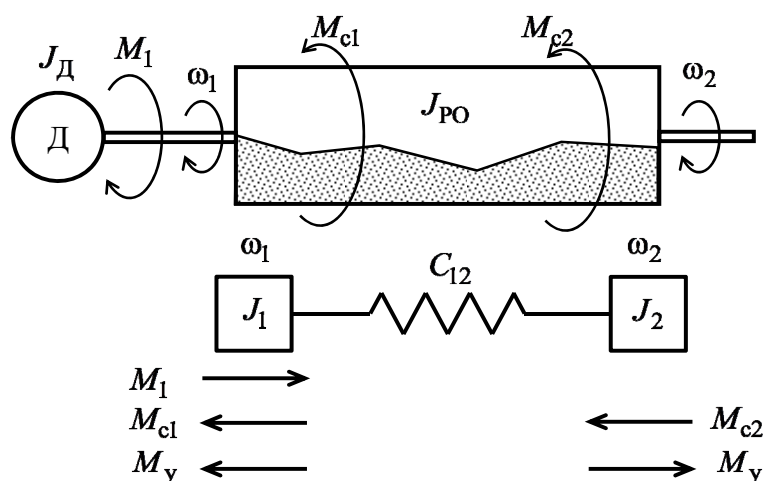


Рис. 1. Кинематическая и расчётная схемы двухмассовой упругой механической части электропривода

Внутри цилиндра транспортируемый или обрабатываемый материал неравномерно распределён внутри барабана, что вызывает различные моменты нагрузки  $M_{c1}$  и  $M_{c2}$  на массы механи-

ческой системы и, соответственно, различные скорости масс  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Разность углов вращения приводит к возникновению упругих сил в обечайке цилиндра, которые могут привести к разрушению корпуса рабочего органа в виде полого цилиндра с толщиной стенок обечайки намного меньше, чем радиус цилиндра.

При вращении полого цилиндра одним электродвигателем, прикреплённым к одному фланцу цилиндра, обязательно будут возникать упругие силы в обечайке цилиндра. В этом случае возникает задача: если невозможно убрать, то необходимо ограничить значение упругого момента в обечайке цилиндра. Это реализуется введением в электропривод контура упругого момента с ограничением на входе контура. Здесь становится ясно, почему для этих целей используется именно векторно-частотный электропривод с короткозамкнутым асинхронным двигателем [6–8]. Такой двигатель выдерживает многократное увеличение тока статора, и нет необходимости в ограничении тока. Контроль двух ограничений – тока статора и момента упругости – в одной системе регулирования затруднён, и поэтому целесообразно использовать именно этот тип электропривода. Также примем, что коэффициент упругости известен либо имеется техническое средство для его идентификации, а также момент упругости измеряем прямым или косвенным способом.

На рис. 2 представлен фрагмент структурной схемы частотного асинхронного электропривода с векторным управлением с настройкой контура тока статора КТ1 на модульный оптимум и с двухмассовой механической частью электропривода [9]. В таком приводе ток статора  $I_1$  и потокосцепление ротора  $\Psi_2$  связаны линейной зависимостью с моментом двигателя:  $M_1 = K_m \Psi_2 I_1$ . Поэтому контур тока статора КТ1 заменяется на контур момента двигателя КМ1.

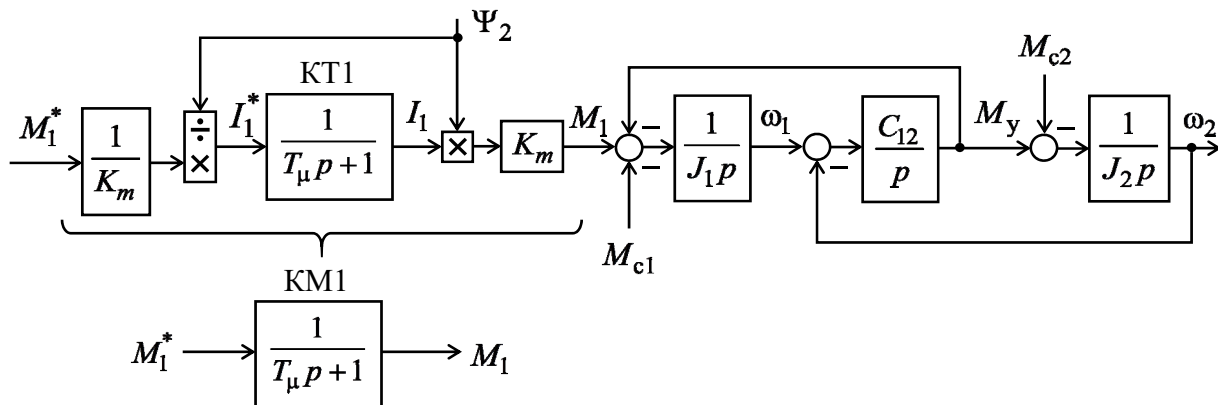


Рис. 2. Структурная схема электропривода с двухмассовой упругой механической частью и с контуром тока статора (КТ1), представленным как контур момента двигателя (КМ1)

**Объект управления.** Рассмотрим структурную схему, представленную на рис. 2, как объект управления. Без учёта моментов нагрузки перенесём внутреннюю обратную связь по скорости второй массы  $\omega_2$  на момент упругости и представим объект управления в следующем виде (см. рис. 3). Здесь  $\gamma$  и  $T_{12}$  это параметры упругой механической части электропривода [4]:

$$\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_2}; \quad T_{12} = \sqrt{\frac{J_1}{C_{12}\gamma}}$$

Перенос внутренней обратной связи по скорости второй массы приводит к синтезу системы регулирования без учёта влияния момента нагрузки второй массы  $M_{c2}$  на момент упругости  $M_y$ . В этом случае возникает некоторая погрешность в вычислении точности регулирования.

Система регулирования скорости второй массы электропривода реализуется с помощью контуров момента двигателя, который представлен на рис. 3 в замкнутом виде как звено с малой постоянной времени контура тока  $T_\mu$ , затем контуром момента упругости, где объектом управления является звено контура момента двигателя и второе звено, моделирующее момент упругости, и контуром скорости второй массы привода, где реализуется ограничение момента упругости.

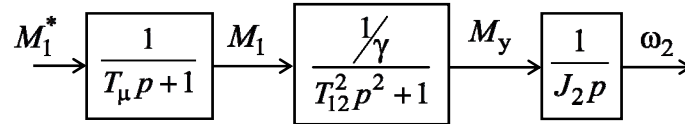


Рис. 3. Структурная схема объекта управления

**Модальное управление контура момента упругости.** В данной статье для регулирования момента упругости предлагается использовать не классический подход с подчинённым регулированием, а модальный регулятор для регулирования момента упругости при сигнале управления моментом двигателя [10]. При этом контур момента упругости с модальным управлением является частью объекта управления для внешнего контура скорости второй массы привода. То есть принцип подчинённого регулирования в данном случае выполняется.

На рис. 4 представлена структурная схема системы модального управления моментом упругости в детализированном виде. В качестве переменных состояния используются момент упругости  $M_y$ , его производная  $\dot{M}_y$  и момент двигателя  $M_1$ .

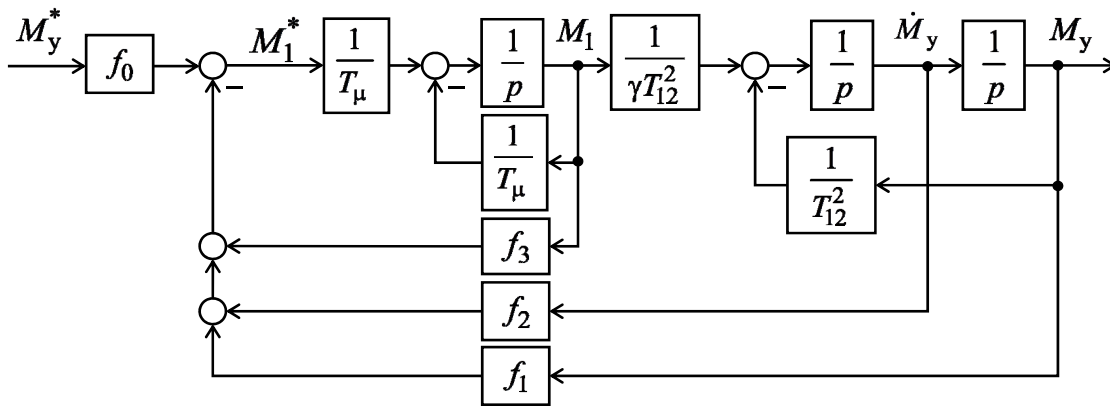


Рис. 4. Детализированная структурная схема контура момента упругости

Контур момента упругости настраивается на форму Баттерворта третьего порядка, характеристическое уравнение которого описывает динамику:

$$p^3 + \frac{1+f_3}{T_\mu} p^2 + \frac{\gamma T_\mu + f_2}{\gamma T_{12}^2 T_\mu} p + \frac{\gamma(1+f_3)+f_1}{\gamma T_{12}^2 T_\mu} = p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3.$$

В системах подчинённого регулирования контур имеет второй (при настройке на модульный оптимум) или третий порядок (при настройке на симметричный оптимум). При среднегеометрическом корне  $\omega_0 = \frac{1}{2T_\mu}$  характеристический полином формы Баттерворта будет совпадать с характеристическим полиномом передаточной функции контура с настройкой на симметричный оптимум и с фильтром на входе контура. Но астатизм контура момента упругости, в отличие от кон-

тура с настройкой на симметричный оптимум, имеет первый порядок. Коэффициенты модального регулятора при данном значении среднегеометрического корня имеют следующее выражение:

$$f_1 = \frac{\gamma T_{12}^2}{8T_{\mu}^2} - \gamma; \quad f_2 = \frac{\gamma}{2T_{\mu}} (T_{12}^2 - 2T_{\mu}^2); \quad f_3 = 0.$$

Коэффициент усиления замкнутого контура момента упругости равен

$$K_{\text{зам}} = \frac{8T_{\mu}^2}{\gamma T_{12}^2}.$$

Для контура с астатизмом первого порядка коэффициент  $K_{\text{зам}}$  должен быть равен единице. Для этого необходимо на входе контура с модальным регулятором использовать коэффициент

$$f_0 = \frac{1}{K_{\text{зам}}} = \frac{\gamma T_{12}^2}{8T_{\mu}^2}.$$

В этом случае видно, что коэффициент модального регулятора в обратной связи по моменту упругости можно представить выражением  $f_1 = f_0 - \gamma$ .

Выполним некоторые структурные преобразования относительно сигналов задания момента двигателя  $M_1^*$  и момента упругости  $M_y$ , а также сигналов обратной связи по моменту упругости  $M_y$  и его производной  $\dot{M}_y$ :

$$\begin{aligned} M_1^* &= f_0 M_y^* - f_1 M_y - f_2 \dot{M}_y = f_0 M_y^* - (f_0 - \gamma) M_y - f_2 p M_y = \\ &= f_0 (M_y^* - M_y) - (f_2 p - \gamma) M_y. \end{aligned}$$

На рис. 5 представлен контур момента упругости с учётом структурных преобразований.

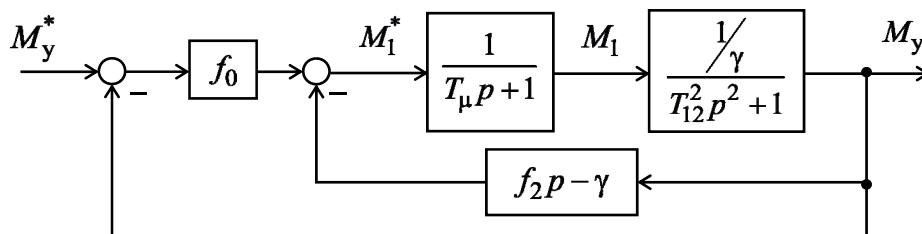


Рис. 5. Контур регулирования момента упругости

Контур момента упругости включает обратную связь по моменту упругости с П-регулятором в прямом канале  $f_0$  и неминимально-фазовый ПД-регулятор во внутреннем обратном канале  $f_2 p - \gamma$ .

**Настройка контура скорости второй массы.** Контур момента упругости является внутренним контуром для контура скорости второй массы. В соответствии с принципами подчинённого регулирования [4] звено контура момента упругости представляется в упрощённом виде, без учёта членов высшего порядка (см. рис. 6). Контур момента упругости имеет инерционность в четыре раза выше, чем контур момента двигателя  $4T_{\mu}$ .

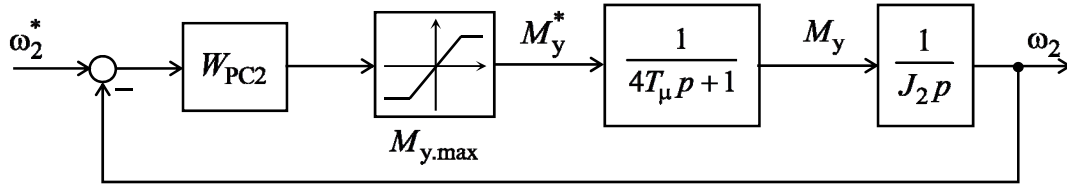


Рис. 6. Контур регулирования скорости второй массы привода

Ограничение момента упругости осуществляется введением звена ограничения на входе контура момента упругости со значением ограничения  $M_{y,max}$ , которое определяется исходя из конструктивных особенностей цилиндрического рабочего органа. При настройке контура скорости второй массы на модульный оптимум регулятор скорости второй массы

$$W_{PC2}(p) = \frac{J_2}{8T_\mu},$$

на симметричный оптимум –

$$W_{PC2}(p) = \frac{J_2}{8T_\mu} \cdot \frac{16T_\mu p + 1}{16T_\mu p}.$$

**Механическая характеристика системы регулирования.** Структурная схема системы регулирования с учётом моментов нагрузки на обе массы представлена на рис. 7. Здесь пренебрегается влияние момента нагрузки второй массы  $M_{c2}$  на момент упругости  $M_y$ .

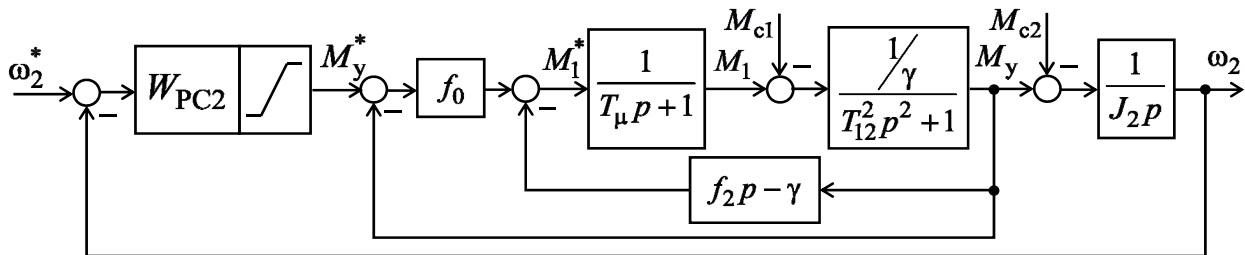


Рис. 7. Система регулирования с учётом моментов нагрузки

Выполнив преобразования структурной схемы на рис. 7 для определения общих передаточных функций относительно скорости второй массы и задающего и возмущающих воздействий, приняв  $p = 0$ , получим уравнение механической характеристики системы регулирования. Для привода с настройкой контура скорости второй массы на симметричный оптимум механическая характеристика абсолютно жёсткая. При настройке контура скорости второй массы на модульный оптимум

$$\omega_2 = \omega_2^* - \frac{M_{c1}}{\beta_1} - \frac{M_{c2}}{\beta_2}, \quad (1)$$

где  $\beta_1 = \frac{J_1 J_2}{64 T_\mu^3 C_{12}}$ ,  $\beta_2 = \frac{J_2}{8 T_\mu}$  – соответственно жёсткости механической характеристики привода по моментам нагрузки на первой и второй массе.

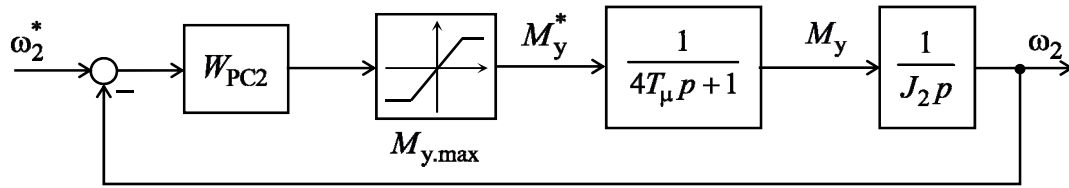


Рис. 6. Контур регулирования скорости второй массы привода

Ограничение момента упругости осуществляется введением звена ограничения на входе контура момента упругости со значением ограничения  $M_{y,max}$ , которое определяется исходя из конструктивных особенностей цилиндрического рабочего органа. При настройке контура скорости второй массы на модульный оптимум регулятор скорости второй массы

$$W_{PC2}(p) = \frac{J_2}{8T_\mu}$$

на симметричный оптимум –

$$W_{PC2}(p) = \frac{J_2}{8T_\mu} \cdot \frac{16T_\mu p + 1}{16T_\mu p}$$

**Механическая характеристика системы регулирования.** Структурная схема системы регулирования с учётом моментов нагрузки на обе массы представлена на рис. 7. Здесь пренебрегается влияние момента нагрузки второй массы  $M_{c2}$  на момент упругости  $M_y$ .

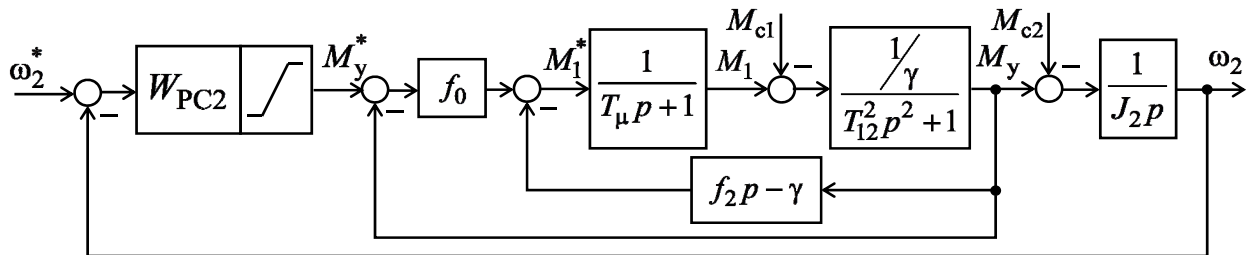


Рис. 7. Система регулирования с учётом моментов нагрузки

Выполнив преобразования структурной схемы на рис. 7 для определения общих передаточных функций относительно скорости второй массы и задающего и возмущающих воздействий, приняв  $p = 0$ , получим уравнение механической характеристики системы регулирования. Для привода с настройкой контура скорости второй массы на симметричный оптимум механическая характеристика абсолютно жёсткая. При настройке контура скорости второй массы на модульный оптимум

$$\omega_2 = \omega_2^* - \frac{M_{c1}}{\beta_1} - \frac{M_{c2}}{\beta_2}, \quad (1)$$

где  $\beta_1 = \frac{J_1 J_2}{64 T_\mu^3 C_{12}}$ ,  $\beta_2 = \frac{J_2}{8 T_\mu}$  – соответственно жёсткости механической характеристики привода по моментам нагрузки на первой и второй массе.

Если учитывать влияние  $M_{c2}$  на  $M_y$ , то жёсткость механической характеристики привода

$$\beta_2 = \frac{J_2}{8T_\mu \left( 1 - \frac{8T_\mu^2 C_{12}}{J_2} \right)}.$$

Из этого выражения видно, что при выполнении условия  $C_{12} \ll \frac{J_2}{8T_\mu^2}$  жёсткость равна соот-

ветствующей жёсткости из уравнения (1) и, следовательно, влияние  $M_{c2}$  на  $M_y$  незначительно. С учётом больших масс цилиндра и значения малой постоянной времени данное условие будет выполняться.

Из выражения (1) видно, что график механической характеристики зависит не только от нагрузки в цилиндре, но и от распределения этой нагрузки в цилиндре между массами механической части электропривода. При выполнении граничного условия по упругости

$$C_{12} = \frac{J_1}{8T_\mu^2} \quad (2)$$

жёсткость  $\beta_1 = \beta_2$  и уравнение (1) представится в виде

$$\omega_2 = \omega_2^* - \frac{M_c}{\beta_2},$$

где  $M_c = M_{c1} + M_{c2}$  – общая нагрузка в цилиндре. В этом случае ясно, что график механической характеристики зависит только значения общей нагрузки и не зависит от упругости цилиндра, а следовательно, от распределения общей нагрузки между массами механической части электропривода. Назовём выражение в (2) граничным коэффициентом упругости цилиндра  $C_{гр}$ . При значении коэффициента упругости обечайки цилиндра  $C_{12} > C_{гр}$  будем называть жёстким цилиндром, а при  $C_{12} < C_{гр}$  – упругим цилиндром.

Не трудно видеть, что для упругого цилиндра  $\beta_1 > \beta_2$ , а для жёсткого цилиндра  $\beta_1 < \beta_2$ . Также следует указать, что коэффициент модального регулятора можно представить выражением

$$f_0 = \frac{C_{гр}}{C_{12}}. \quad (3)$$

Тогда для упругого цилиндра  $f_0 > 1$ , а для жёсткого –  $f_0 < 1$ .

Если рассмотреть распределение материала в цилиндре, которое оказывает нагрузку на электропривод, то целесообразнее представить моменты нагрузки на каждой массе через общую нагрузку в цилиндре  $M_c$  и неравномерность распределения нагрузки в цилиндре  $\Delta M_c = M_{c2} - M_{c1}$ . Тогда моменты нагрузки на массах будут определяться следующими выражениями:

$$M_{c1} = \frac{M_c - \Delta M_c}{2}; \quad M_{c2} = \frac{M_c + \Delta M_c}{2}. \quad (4)$$

При этом для неравномерности распределения нагрузки должно выполняться условие

$$-M_c < \Delta M_c < M_c.$$

Здесь можно сделать важное заключение, что представленную в статье систему электропривода нецелесообразно использовать для жёстких цилиндров. Для абсолютно жёсткой механической части привода механическая характеристика привода с рассматриваемой системой регулирования стремится к оси ординат и становится абсолютно мягкой.

**Ограничения по моменту нагрузки.** Рассмотрим контур момента упругости на рис. 7 в режиме установившейся работы привода. Тогда структурную схему контура необходимо рассматривать при  $p = 0$ . В результате определим следующие закономерности:

$$M_y = M_y^* - \frac{M_{c1}}{f_0}; \quad M_1 = \gamma M_y^* + \frac{f_0 - \gamma}{f_0} M_{c1}. \quad (5)$$

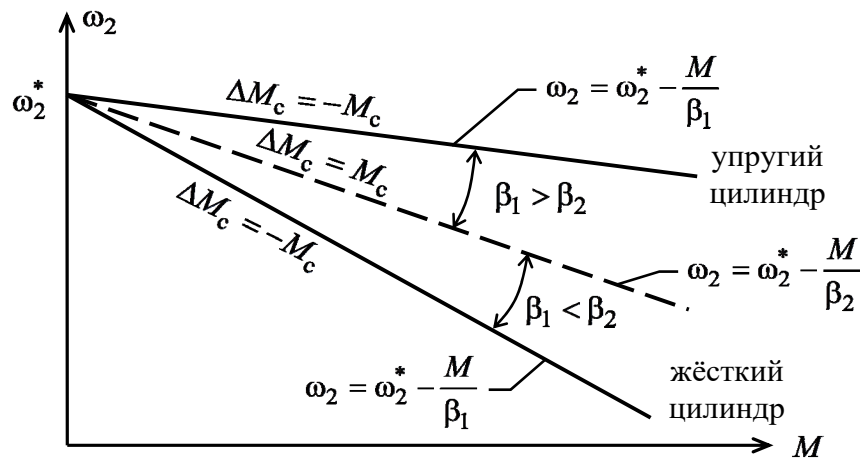


Рис. 9. Изменение механической характеристики в зависимости от упругости и распределения нагрузки в цилиндре

Значения моментов нагрузки должны соответствовать следующим условиям:

$$M_{c1} < M_1^{\max}; \quad M_{c2} < M_y^{\max}, \quad (6)$$

где  $M_1^{\max}$  и  $M_y^{\max}$  – максимальные значения моментов двигателя и упругости на выходе контура соответственно.

Максимальное значение момента двигателя не должно превышать максимально допустимое значение двигателя  $M_1^{\max} \leq M_{1\max} = K_m \Psi_2^* I_{1\max}$ , где  $\Psi_2^* \leq \Psi_{2н}$  – задающее значение потокосцепление ротора;  $I_{1\max}$  – максимальный ток статора.

Выражения (5) при насыщении звена ограничения, когда  $M_y^* = M_{y,\max}$  и  $M_1 = M_1^{\max}$ , при условии (6)

$$M_{c1} < \frac{f_0}{f_0 - \gamma} (M_1^{\max} - \gamma M_{y,\max}); \quad M_{c2} < \frac{1}{f_0 - \gamma} (f_0 M_{y,\max} - M_1^{\max}). \quad (7)$$

Из выражения (7) можно сделать заключение, что с учётом (3) данные неравенства могут иметь место только при выполнении условия

$$C_{12} < \frac{C_{гр}}{\gamma}. \quad (8)$$

Подставляя зависимость (4) в выражение (7) и решая полученную систему неравенств относительно  $M_1^{\max}$  и  $M_{y,\max}$ , получим

$$M_1^{\max} > \frac{\gamma+1}{2}M_c + \frac{\gamma-1}{2}\Delta M_c; \quad M_{y,\max} > \frac{f_0+1}{2f_0}M_c + \frac{f_0-1}{2f_0}\Delta M_c. \quad (9)$$

Изменяя неравномерность нагрузки в диапазоне предельных значений  $\Delta M_c = \pm M_c$ , можно получить графики зависимости значений  $M_1^{\max}$  и  $M_{y,\max}$  от  $\Delta M_c$  (см. рис. 10).

Видно, что при распределении нагрузки в цилиндре в сторону второй массы необходим двигатель с большим моментом  $M_{1\max}$ . Для заданного максимального момента упругости  $M_{y,\max}^{\text{тр}}$ , значения которого необходимо ограничивать, определим допустимое значение неравномерности распределения нагрузки  $\Delta M_c^{\text{доп}}$  и подставим его в первое неравенство выражения (9). В результате получим предел для требуемого максимального значения момента двигателя  $M_{1\max}^{\text{тр}}$  для заданной нагрузки  $M_c^{\text{тр}}$  и заданного ограничения на момент упругости  $M_{y,\max}^{\text{тр}}$ :

$$M_{1\max}^{\text{тр}} \geq \frac{f_0-\gamma}{f_0-1}M_c^{\text{тр}} + \frac{\gamma-1}{f_0-1}f_0M_{y,\max}^{\text{тр}}. \quad (10)$$

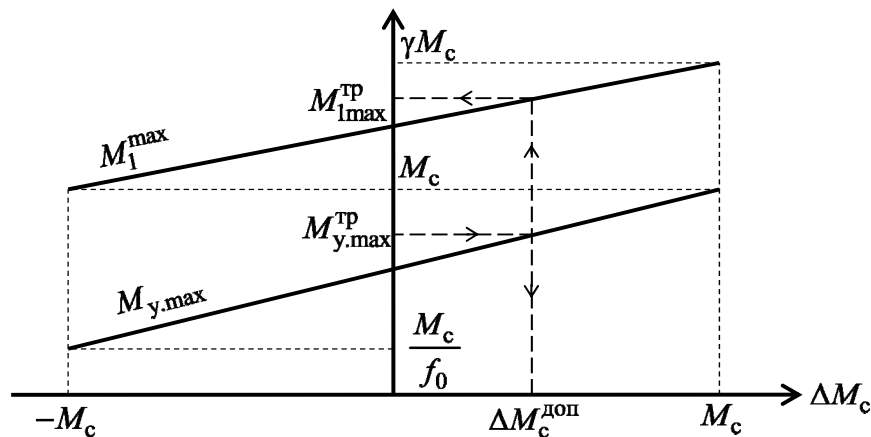


Рис. 10. Зависимости максимальных значений моментов двигателя  $M_1^{\max}$  и упругости  $M_{y,\max}$  от неравномерности распределения нагрузки  $\Delta M_c$

Допустимая неравномерность нагрузки в цилиндре в сторону второй массы составит

$$\Delta M_c^{\text{доп}} = \frac{2f_0}{f_0-1}M_{y,\max}^{\text{тр}} - \frac{f_0+1}{f_0-1}M_c^{\text{тр}}. \quad (11)$$

В случае превышения допустимой неравномерности нагрузки в цилиндре возникает ситуация, когда момент нагрузки на второй массе превышает ограничение момента упругости  $M_{c2} > M_{y,\max}^{\text{тр}}$ . Это приведёт к снижению скорости привода и, в силу реактивности нагрузки в цилиндре, к полной его остановке.

**Моделирование системы регулирования.** Проведём моделирование структурной схемы электропривода без учёта влияния момента нагрузки второй массы  $M_{c2}$  на момент упругости  $M_y$

(см. рис. 7). Сравнительный анализ при моделировании структурной схемы, где учитывается влияние  $M_{c2}$  на  $M_y$ , показал, что графики переходных процессов не отличаются от графиков моделирования структуры, где нет учёта данного влияния. Ограничение по моменту упругости установлено  $M_{y,max}^* = 150$  Нм. Общая нагрузка в цилиндре  $M_c = 200$  Нм.

На рис. 11 представлены результаты моделирования при неравномерной нагрузке в сторону второй массы  $M_{c1} = 60$  Нм и  $M_{c2} = 140$  Нм, возникающей в момент времени 1 с. Здесь видно, что при задающем воздействии в режиме холостого хода действует ограничение момента упругости. Графики скорости второй массы соответствуют стандартным настройкам по аналогии, как при ограничении тока статора частотного привода. При возмущающем воздействии видно, что при настройке на симметричный оптимум также действует ограничение момента упругости.

При увеличении неравномерности нагрузки наблюдается увеличение максимального момента двигателя до значения 410 Нм, что соответствует значению, вычисленному по формуле (10). Допустимая неравномерность, вычисленная по формуле (11), составляет 100 Нм. Это означает, что нагрузка на вторую массу не должна составлять более, чем 150 Нм, т. е. не более ограничения по моменту упругости.

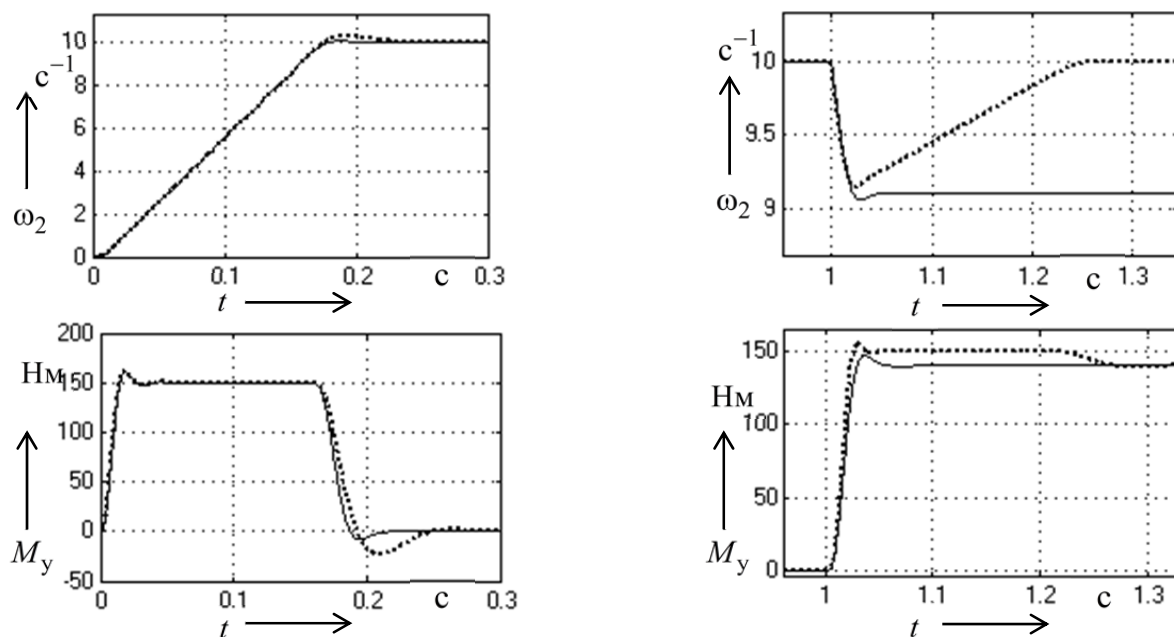


Рис. 11. Графики переходных процессов скорости второй массы и момента упругости при задающем воздействии (слева) и возмущающем воздействии (справа) при настройке контура скорости второй массы на модульный оптимум (сплошная линия) и симметричный оптимум (пунктирная линия)

Здесь возникает задача контроля распределения нагрузки в цилиндре рабочего органа. Способ решения данной задачи зависит от технологии применения цилиндрического рабочего органа. Например, если это шаровая мельница, где загрузка обрабатываемого материала осуществляется с одного конца (как правило, это первая масса), а выгрузка – с другого (вторая масса), то неравномерность нагрузки в барабане может быть вызвана неравномерной подачей материала в барабан. Регулируя подачу материала в барабан, а возможно, и выгрузку материала из барабана, можно убрать неравномерную нагрузку в барабане.

Другим способом решения данной задачи может быть использование двухдвигательного электропривода, где двигатели расположены с обеих сторон цилиндра рабочего органа [11]. При

согласованном управлении вращением двигателей можно решать задачу не только ограничения, но и устранения момента упругости [12–14].

**Выводы.** Применение системы регулирования скорости вращения рабочего органа в форме полого цилиндра с ограничением момента упругости, возникающей в обечайке цилиндра, даёт возможность проектировать такие рабочие органы цилиндрической формы, которые могут использоваться без усиленных креплений. Это приведёт к повышению массогабаритных показателей цилиндров и, как следствие, к увеличению производительности механизма. Приведённое выше исследование системы регулирования скорости второй массы в электроприводе с двухмассовой механической частью с ограничением момента упругости позволяет сделать следующие выводы:

1. Для ограничения момента упругости необходим синтез системы регулирования скорости вращения цилиндра, которая состоит из следующих контуров: контур тока или момента с настройкой на модульный оптимум; контур момента упругости с настройкой на форму Баттерворта при среднегеометрическом корне, равном  $\omega_0 = \frac{1}{2T_\mu}$ ; контур скорости второй массы с настройкой на модульный или симметричный оптимум. Контур момента упругости с модальным регулятором интегрируется в контур скорости второй массы со стандартной настройкой. Это достигается привязкой среднегеометрического корня  $\omega_0$  с малой постоянной времени  $T_\mu$ .

2. При возникновении существенной неравномерности нагрузки в сторону второй массы может возникнуть ситуация, когда нагрузка на второй массе станет превышать ограничение на момент упругости и привод остановится. Данная проблема должна решаться либо технологически, либо применением двухдвигательного электропривода.

3. Представленную систему регулирования следует применять только для электропривода механизма с цилиндрическим рабочим органом с упругой обечайкой, где выполняется условие (8).

4. В системе регулирования отсутствует ограничение на момент, а следовательно, на ток статора двигателя. Применение ограничений на два физически разных параметра не приводит к достижению целей регулирования. Это ограничивает применение рассмотренной системы регулирования в асинхронных электроприводах с короткозамкнутым ротором, которые позволяют выдерживать многократное превышение тока, а следовательно, момента двигателя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Логинов, Б. М. Наблюдатель упругого момента электропривода клетки прокатного стана на основе фильтра Калмана с дополненным вектором состояния / Б. М. Логинов, В. Р. Храмшин, С. С. Воронин // Электротехнические системы и комплексы. – 2025. – № 4 (69). – С. 4-14.
2. Прохоренко, Н. Я. Проблемы электроприводов с упругим валопроводом / Н. Я. Прохоренко // Булатовские чтения. – 2021. – Т. 2. – С. 224-226.
3. Оптимальное по быстродействию управление позиционным электроприводом с упругим валопроводом при ограничении по моменту двигателя / Ю. П. Добробаба, Г. А. Кошкин, Ф. В. Коновалов, Н. Я. Прохоренко // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2016. – № 5. – С. 31-40.
4. Ключев, В. И. Ограничение динамических нагрузок электроприводов / В. И. Ключев. – М.: Машиностроение, 1971. – 320 с.
5. Борцов, Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.
6. Дочвири, Д. Н. Настройка системы управления асинхронного электропривода прессов бумагоделательных машин с наблюдательным устройством при наличии упругого звена / Д. Н. Дочвири // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 38-42.
7. Клименко, Ю. М. Синтез системы полеориентированного управления асинхронным электроприводом с демпфированием колебаний упругого передаточного устройства / Ю. М. Клименко, А. В. Садовой // Международный научный журнал. – 2016. – № 9. – С. 56-62.
8. Ещин, Е. К. Управление позиционированием асинхронного электропривода с упругой механической связью / Е. К. Ещин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 4 (92). – С. 137-139.



9. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учеб. для студентов вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – М.: Academia, 2005. – 300 с.
10. Кузовков, Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства: учеб. пособие / Н. Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
11. Стельмашук, С. В. Система подчинённого управления скалярным частотно-регулируемым многодвигательным электроприводом с независимым соединением асинхронных двигателей / С. В. Стельмашук, И. Ю. Лакеев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 57-65.
12. Стельмашук, С. В. Согласованное управление однотипными объектами без учёта перекрёстных связей между сепаратными каналами / С. В. Стельмашук, В. А. Челухин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII (47). – С. 48-58.
13. Стельмашук, С. В. Оценка точности системы согласованного управления с учётом возмущающего воздействия / С. В. Стельмашук // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 9-17.
14. Моделирование многокаскадного нечёткого регулятора для управления многодвигательной системой электроприводов / С. П. Черный, К. А. Емельянов, М. А. Лямин, Д. Ю. Облогин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 4-10.

**Сысоев С. Н., Сидоров В. С.**

**S. N. Sysoyev, V. S. Sidorov**

## **МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОРРЕКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ВТУЛКА-ВТУЛКА»**

### **AUTOMATED CORRECTION OF THE RELATIVE POSITION OF MATED BUSHINGS**

**Сысоев Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор, преподаватель кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, Владимир); тел. 8(905)617-95-59. E-mail: sysoev50@yandex.ru.

**Sergey N. Sysoyev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lecturer, Automation, Mechatronics, and Robotics Department, Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov (Russia, Vladimir); tel. 8(905)617-95-59. E-mail: sysoev50@yandex.ru.

**Сидоров Владислав Сергеевич** – аспирант кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, Владимир). E-mail: vlad1998ss@mail.ru.

**Vladislav S. Sidorov** – Postgraduate Student, Automation, Mechatronics and Robotics Department, Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov (Russia, Vladimir). E-mail: vlad1998ss@mail.ru.

**Аннотация.** В данном исследовании рассматривается проблема повышения эффективности автоматизированного процесса сборки осесимметричных деталей. Ключевой аспект – использование данных о перекосе (угловом отклонении оси) сопрягаемой детали для устранения погрешности их взаимного положения на этапе сборки. Целью работы является расширение области практического применения автоматизированной сборки осесимметричных деталей типа «втулка-втулка» путём разработки более эффективного метода сопряжения. Анализом современного уровня техники в предметной области исследований выявлен метод сборки, в котором в качестве информации для управления используют величину осевого силового взаимодействия деталей. Однако он сложен в реализации и имеет ограниченную универсальность применения, т. к. зависит от массогабаритных характеристик деталей и не учитывает все возможные сценарии процесса сборки. Разработана схема вариантов функциональной структуры сборки деталей, на которой показаны возможные ситуации процесса автоматизированной сборки. Методом исследования функционально-физических связей, анализом вариантов ситуаций, физических процессов, возникающих при сборке, выявлен и формализован существенный признак для управления процессом коррекции – изменение угла наклона оси сопрягаемой детали. По изменению данного угла сформулировано правило определения направления корректирующего перемещения. На основе выявленной закономерности составлена блок-схема алгоритма определения направления коррекции и разработана структурная схема корректирующей системы. Приведена конструктивно-технологическая реализация метода с помощью сильфонного приводного механизма криволинейного перемещения, подтверждающая практическую применимость метода. Метод коррекции сопрягаемых деталей типа «втулка-втулка» с применением сильфонного приводного механизма криволинейного перемещения упрощает определение требуемого направления корректирующего перемещения, расширяя область практического применения автоматизированной сборки осесимметричных деталей.

**Summary.** This research addresses the problem of improving the efficiency of the automated assembly process for axisymmetric parts. The key aspect is the use of data on the misalignment (angular axis deviation) of the mating part to eliminate errors in their mutual positioning during the assembly stage. The work aims to expand the practical application scope of automated assembly for axisymmetric bush-to-bush parts by developing a more efficient mating method. An analysis of the state of the art in the research field revealed an assembly method that uses the magnitude of the axial force interaction between the parts as the control input. However, this method is complex to implement and has limited universality, as it depends on the mass and dimensional characteristics of the parts and does not account for all possible assembly scenarios. A schematic of the functional structure variants for part assembly has been developed, illustrating possible situations in the automated assembly process. Through the method



of investigating functional-physical connections and analyzing variant situations and physical processes arising during assembly, a key feature for controlling the correction process has been identified and formalized — the change in the tilt angle of the mating part's axis. A rule for determining the direction of the corrective movement has been formulated based on the change in this angle. A flowchart for determining the correction direction and a structural diagram of the correction system were developed based on the discovered pattern. A constructive-technological implementation of the method using a bellows-driven curvilinear movement mechanism is presented, confirming its practical applicability. The correction method for bush-to-bush type parts utilizing a bellows-driven curvilinear movement mechanism simplifies determining the required direction of corrective movement, thereby expanding the field of practical application for the automated assembly of axisymmetric parts.

**Ключевые слова:** метод, автоматизированная сборка, коррекция положения, сопрягаемая деталь, втулка-втулка, перекося, осевое силовое взаимодействие, зона неопределённости, угол наклона оси, сильфонный приводной механизм.

**Key words:** method, automated assembly, position correction, conjugated component, bush-to-bush, misalignment, axial force interaction, zone of uncertainty, axis tilt angle, bellows drive mechanism.

УДК 621.7.067

**Введение.** Актуальными являются исследования в области повышения эффективности автоматизированных сборочных операций, выполняемых на завершающих этапах производственного цикла изготовления изделий, т. к. они существенно влияют на качество конечного продукта [1; 2]. Повышение точности и надёжности работы различных автоматических систем — это общая задача для многих областей техники. Аналогичные задачи компенсации отклонений и нестабильности процессов решаются также в области интеллектуальных систем управления, в том числе для компенсации нелинейностей сигналов управления [3].

Проблемным этапом, определяющим качество и надёжность реализации сборки, является устранение возможного рассогласования положения осей осесимметричных деталей в процессе их сопряжения. Известны различные методы [4–8] и средства коррекции положения [9, 196] сопрягаемых осесимметричных деталей.

Для устранения рассогласования осей при сборке осесимметричных деталей типа «вал-втулка» достаточно применения методов, основанных на использовании перекося, возникающего у сопрягаемой детали при сборке. Например, в основе метода сопряжения осесимметричных деталей [9, 196] применяют коррекцию положения втулки валом. В ситуации наличия рассогласования осей сопрягаемых деталей устранение его осуществляется силовым воздействием боковой поверхности вала на втулку. Однако область применения данного метода ограничивается сборкой деталей исключительно типа «вал-втулка».

Сборка деталей типа «втулка-втулка» имеет важную особенность — для корректировки их взаимного расположения недостаточно информации о перекося сопрягаемой детали в радиальном направлении. Для выполнения сборки требуется реализация более сложного функционального репертуара. Знание углового рассогласования осей деталей достаточно только для определения требуемой траектории коррекции взаимного положения, а направление коррекции по данной траектории может как совпадать, так и отличаться от направления перекося сопрягаемой детали.

В основе метода сборки [9, 196] для деталей с ограниченными торцевыми поверхностями лежит следующий принцип: направление коррекции задаётся на основании данных о силовом взаимодействии деталей. Благодаря этому метод способствует расширению области применения автоматизированной сборки осесимметричных деталей.

Анализ эффективности применения указанного метода выявил ряд недостатков, ограничивающих область его практического применения, а именно:

- не учтена ситуация отсутствия процесса перекося сопрягаемой детали при наличии осевого силового взаимодействия между деталями, что вносит фактор неопределённости в процесс сборки;

- направление коррекции определяют по величине осевого силового взаимодействия, зависящей от массогабаритных характеристик деталей, что ограничивает универсальность применения метода.

Отсутствие анализа и учёта всех возможных сценариев процесса сборки не позволяет составить полное представление о возможностях метода, ограничивая его применение.

Таким образом, целью исследований является расширение области практического применения автоматизированной сборки осесимметричных деталей типа «втулка-втулка» путём совершенствования метода сопряжения деталей посредством устранения приведённых выше недостатков.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ ситуаций процесса сборки, включая формализацию возможных сценариев, функциональных структур, физических явлений, выявление из них существенных, использование которых повысит эффективность выполнения сборочных операций;

- разработка конструктивно-технологической реализации метода с использованием сильфонного механизма криволинейного перемещения, обеспечивающего необходимые корректирующие воздействия.

**Анализ ситуаций процесса сборки осесимметричных деталей типа «втулка-втулка».**

Для выявления возможности расширения граничных условий [9, 196] сопряжения осесимметричных деталей типа «втулка-втулка» проведём анализ вариантов ситуаций процесса сборки методом исследования функционально-физических связей (МИФФС) [10].

Объектом исследования является сборка деталей типа «втулка-втулка». Предметом исследования являются процессы, происходящие при манипулировании положением одной втулки относительно другой при их сопряжении.

Анализом и синтезом функционально-физических связей формируют структуры потребностей, функций, физических явлений, возникающих в процессе функционирования системы. Затем выявляют наличие существенных физических явлений и организуют между ними конструктивные причинные взаимосвязи.

Расчётная схема показана на рис. 1.

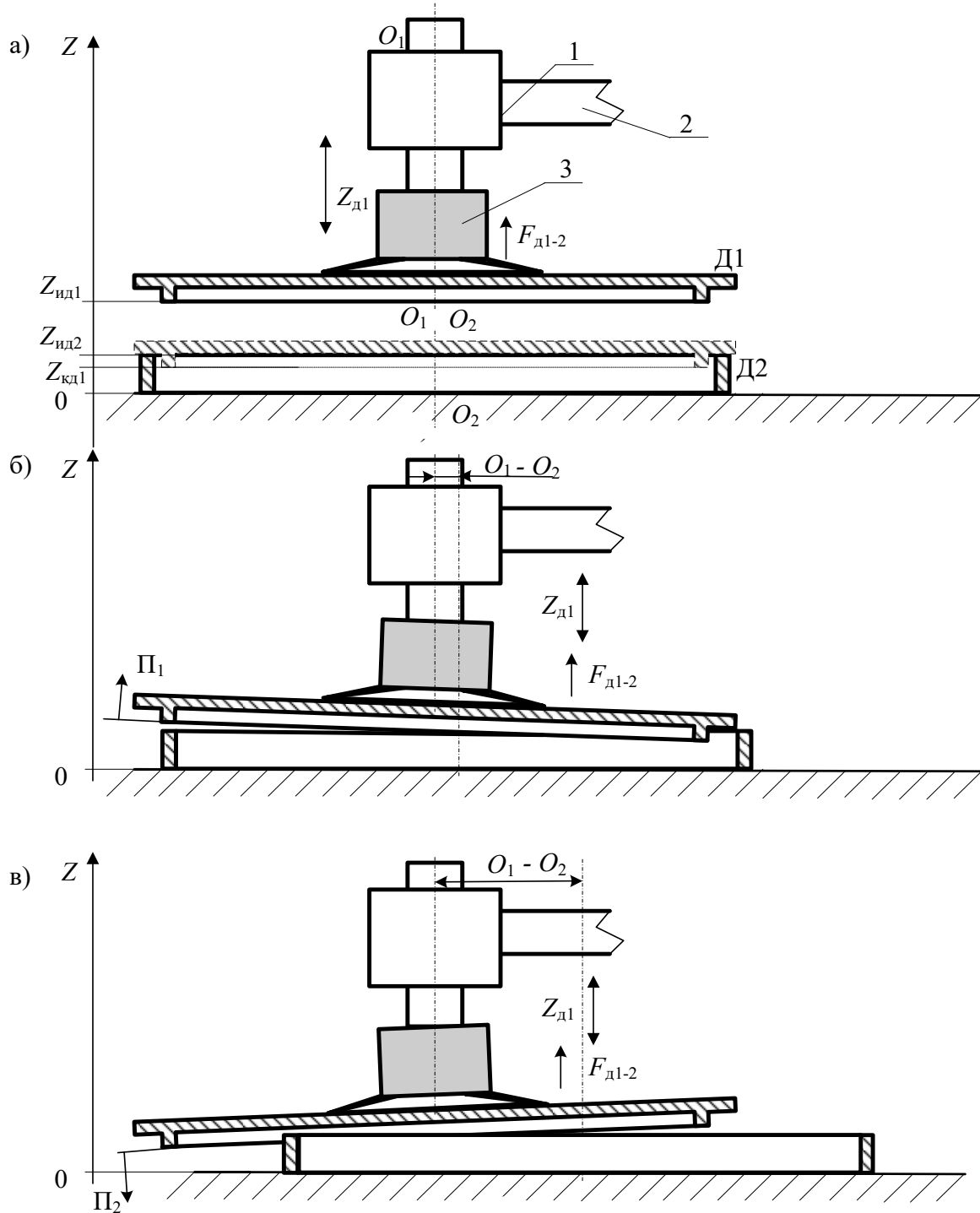
Анализ ситуаций, которые могут возникнуть при сборке осесимметричных деталей, показывает, что в зависимости от параметров сопрягаемых деталей, величины рассогласования их осей  $O_{1-2}$  возможны следующие варианты процесса сборки:

- Величина относительного смещения осей сопрягаемых деталей достаточна для компенсации рассогласования за счёт зазора между деталями (см. рис. 1, а). Перемещение  $D_1$  в направлении торцевой поверхности  $D_2$  в зоне  $Z_{кд1} \leq Z_{д1} < Z_{ид2}$  не приводит к осевому силовому взаимодействию ( $F_{д1-д2} = 0$ ), и перекоса  $D_1$  не происходит. Сборка выполняется без коррекции положения  $D_1$ , а существенным признаком её выполнения является отсутствие перекоса в данной зоне.

- Погрешность расположения сопрягаемых деталей такова, что рассогласование осей  $O_{1-2}$  приводит к торцевому силовому взаимодействию  $F_{д1-д2}$ , приводящему к перекосу П1 (см. рис. 1, б) в направлении требуемой коррекции её радиального положения.

- Погрешность расположения сопрягаемых деталей такова, что рассогласование осей  $O_{1-2}$  приводит к торцевому силовому взаимодействию  $F_{д1-д2}$ , приводящему к перекосу П2 (см. рис. 1, в) в сторону, обратную той, которая необходима для коррекции радиального положения детали  $D_1$ .

- Погрешность взаимного расположения деталей приводит к рассогласованию осей  $O_{1-2}$ , возникает торцевое силовое взаимодействие  $F_{д1-д2}$  (при  $Z_{д1} = Z_{ид2}$ ), которое не вызывает перекоса детали  $D_1$ .



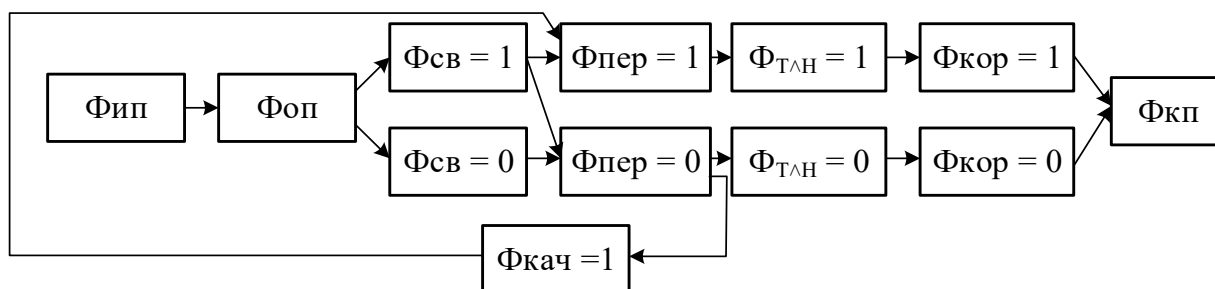
$Z_{ид1}$ ,  $Z_{кд1}$  – соответственно исходная и конечная осевые координаты торцевой поверхности Д1;  
 $Z_{ид2}$  – осевая координата торцевой поверхности детали Д2;  $O_1-O_1$ ,  $O_2-O_2$  – оси положения деталей  
 соответственно Д1 и Д2;  $Z_{д1}$  – текущая осевая координата Д1;  $F_{д1-д2}$  – осевое силовое  
 взаимодействие сопрягаемых деталей;  $O_{1-2}$  – величина рассогласования осей Д1 и Д2;  
 1 – механизм осевого перемещения; 2 – механическая рука; 3 – механизм коррекции  
 положения сопрягаемых деталей

Рис. 1. Схемы вариантов ситуаций сборки осесимметричных деталей типа «втулка-втулка»  
 соответственно исходного положения с перекосами П1, П2 сопрягаемой детали (Д1),  
 совпадающими и не совпадающими с направлением требуемой коррекции положения

При анализе функционирования исследуемой системы сделаны следующие допущения:

- осевое перемещение Д1 в направлении торцевой поверхности Д2 может выполняться перемещением механизмом осевого перемещения 1 относительно механической руки 2, а также перемещением самой механической руки 2;
- механизм коррекции осевого перемещения 3 представлен в виде чёрного ящика, функции которого заключаются в осуществлении коррекции положения детали Д1 в радиальной плоскости относительно оси детали Д2 в процессе их сопряжения;
- известны координаты  $Z_{кд1}$  и  $Z_{ид2}$ , т. е. задана зона непосредственного выполнения сопряжения деталей.

Функциональная структура исследуемой системы показана на рис. 2.



Фип, Фоп, Фсв, Фпер, ФТЛН, Фкор, Фкп, Фкач – соответственно функции исходного положения, опускания, силового взаимодействия, перекоса, определения траектории и направления корректирующего перемещения, коррекции положения сопрягаемой детали, конечного положения, наклона (качания) детали; 1 и 0 – соответственно наличие и отсутствие функции

Рис. 2. Схема обобщённой функциональной структуры сборки деталей

Варианты функциональных структур показаны на рис. 3.

Первый вариант (см. рис. 3, а) состоит из выполнения следующей последовательности функций. Из исходного положения Фип выполняется осевое опускание Фоп вдоль оси Z. В момент касания деталей возникает силовое взаимодействие Фсв, вызывающее перекося Фпер сопрягаемой детали и активирующее функцию определения траектории и направления коррекции ФТЛН. В результате выполнения корректирующего перемещения деталь занимает конечное положение Фкп.

Второй вариант (см. рис. 3, б) отличается тем, что выполнение функции опускания Фоп не приводит к силовому взаимодействию Фсв = 0 торцевых поверхностей деталей при достаточном рассогласовании их осевого положения для сборки без его коррекции.

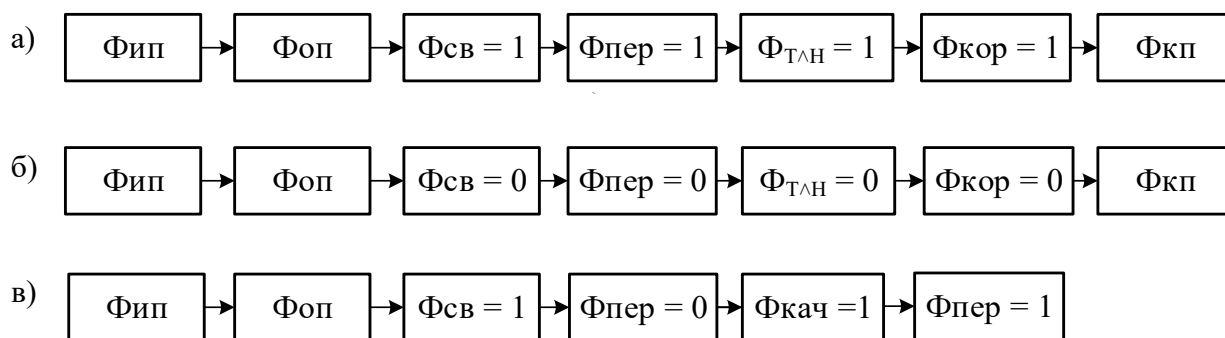


Рис. 3. Схема вариантов функциональной структуры сборки деталей

Третий вариант (см. рис. 3, в) присутствует в том случае, когда возникающее силовое взаимодействие торцевых поверхностей не приводит к перекося Фпер = 0. В этом случае

выполняют функцию качания сопрягаемой детали, выводя её из устойчивого положения, что приводит к перекосу, т. е. функции  $\Phi_{пер} = 1$ . Далее продолжается выполнение функций первого варианта (см. рис. 3, а).

Интерес представляет первый вариант функциональной структуры с выполнением функции коррекции радиального положения сопрягаемой детали.

По перекосу сопрягаемой детали в радиальном направлении определяют требуемую траекторию коррекции. Далее определяют направление перемещения сопрягаемой детали по данной траектории.

Возможны две ситуации, когда требуемое направление коррекции положения по траектории совпадает (ск1) и не совпадает (ск2) со стороной перекоса сопрягаемой детали.

**Выявление физического признака для определения направления корректирующего перемещения.** Для выявления признаков, позволяющих определить ситуацию в процессе сборки и задать требуемое направление коррекции, рассмотрим физические явления, происходящие в системе.

Физические явления, составляющие множество  $J$ , соответствующее возможным вариантам ситуаций  $J_{ск1}$  и  $J_{ск2}$  коррекции процесса сборки в зоне сопряжения (сборки) для  $Z_{кд1} \leq Z_{д1} < Z_{ид2}$ , описываются выражениями

$$\forall J_{ск1} \exists [(\alpha_{нр360} = \alpha_T) \wedge (\alpha_T = \text{const}) \wedge (\varphi_{ос} = \text{const}) \wedge (F_{д1-д2} = 1) \wedge (F'_{д1-д2} = 0)]$$
$$\forall J_{ск2} \exists [(\alpha_{нр360} = \alpha_T) \wedge (\alpha_T = \text{const}) \wedge (\varphi_{ос} = \text{var}) \wedge (1 > F_{д1-д2} > 0) \wedge (F'_{д1-д2} = 1)],$$

где  $\alpha_{нр360}$  и  $\alpha_T$  – углы в радиальной плоскости соответственно стороны наклона и расположения траектории коррекции;  $\varphi_{ос}$  – угол наклона оси сопрягаемой детали;  $F_{д1-д2}$  и  $F'_{д1-д2}$  – соответственно величина силового взаимодействия сопрягаемых деталей и её изменение (производная по времени); 1 и 0 – соответственно наличие и отсутствие физического явления  $J$ .

Исследуем причинные взаимосвязи процесса сборки с целью выявления существенных физических явлений, позволяющие идентифицировать наличие той или иной ситуации, возникающей в процессе сопряжения деталей.

Критерием для идентификации ситуаций ск1 и ск2 выступает величина силового взаимодействия деталей. Использование данного признака в процессе сборки предполагает обязательное определение количественного значения силы, что накладывает ограничения на универсальность и практическую применимость метода.

Из выражений видно, что угол наклона  $\varphi_{ос}$  является существенным признаком управления процессом сборки. Использование признака изменения данного угла позволяет определить направление корректирующего перемещения: если в зоне сборки этот угол перестаёт изменяться, то корректирующее перемещение сопрягаемой детали по траектории совпадает с направлением её перекоса, а если данное физическое явление отсутствует, то необходимо перемещать в противоположном направлении.

На основе выявленной закономерности составлена блок-схема алгоритма определения направления коррекции, представленная на рис. 4.

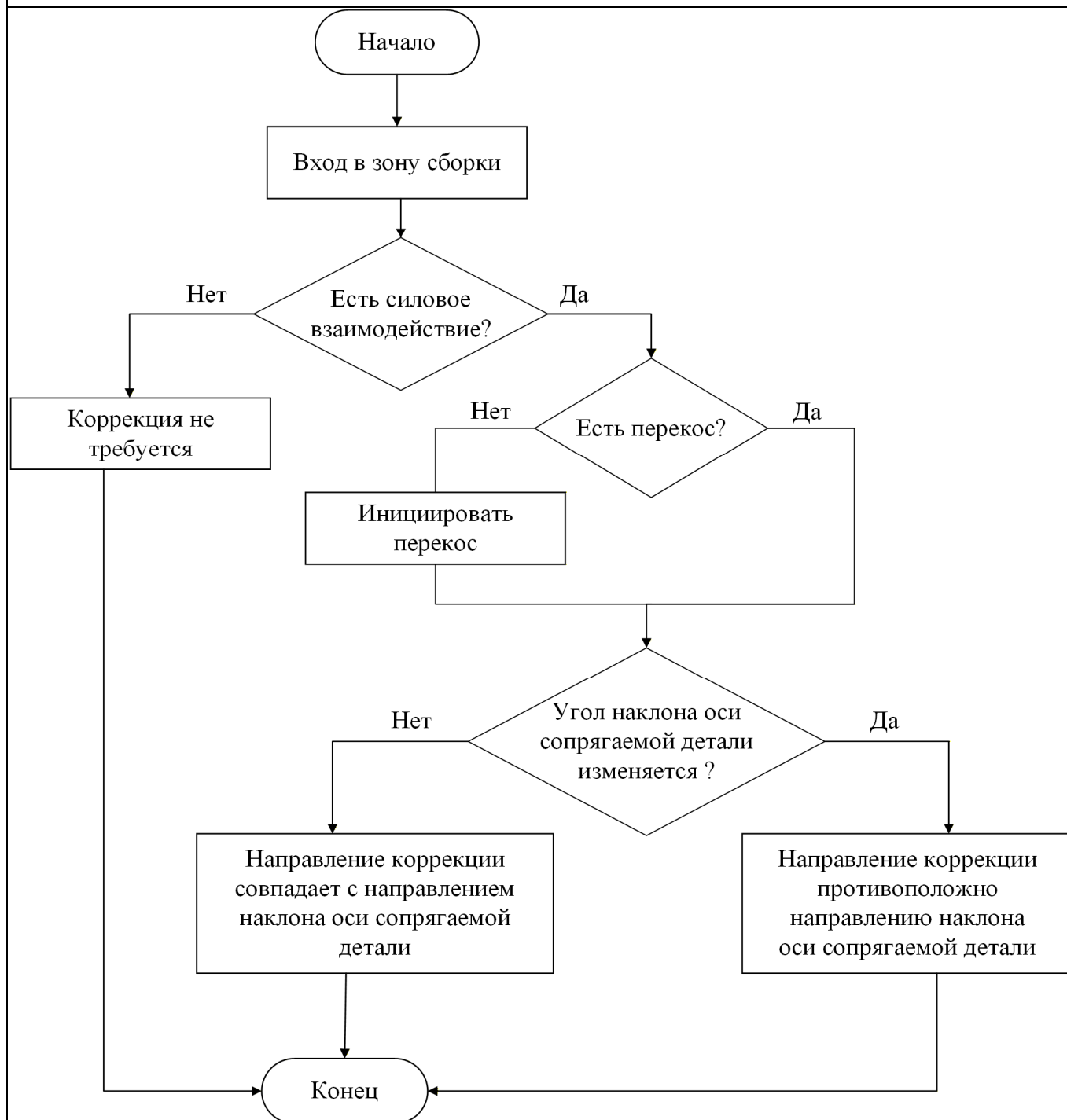


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения направления коррекции

Для практической реализации системы управления разработана структурная схема корректирующей системы (см. рис. 5).

В регуляторе закладывается логика определения направления коррекции на основе составленного алгоритма.

**Конструктивно-технологическая реализация метода сильфонным приводным механизмом криволинейного перемещения.** Для реализации коррекции положения сопрягаемых деталей могут быть использованы классические приводные механизмы манипуляционных систем. Наиболее простым по конструкции и управлению является сильфонный приводной механизм криволинейного перемещения [9, 200], схема которого показана на рис. 6.

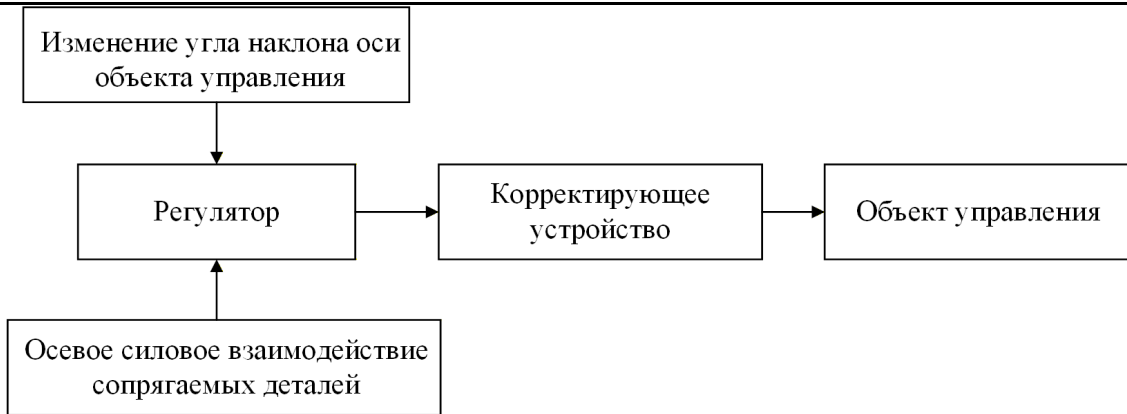
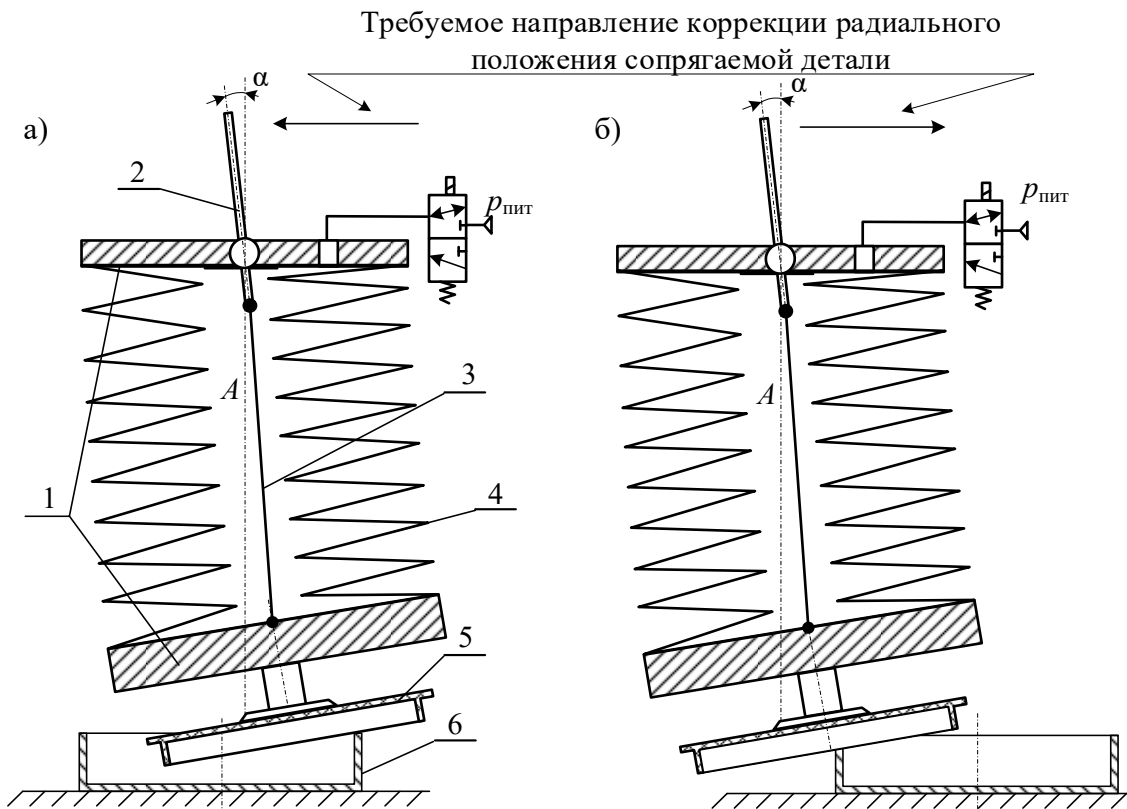


Рис. 5. Структурная схема корректирующей системы

Механизм криволинейного перемещения (см. рис. 6, а) состоит из сиффона 4 с закрытыми торцевыми поверхностями крышками 1. Камера А через распределитель соединена с давлением питания  $p_{пит}$  рабочей среды. Линейное растяжение сиффона ограничено гибкой нерастяжимой тягой 3, закреплённой по оси на крышках и соединённой одним концом с рычагом управления 2. Наклоном рычага 2 задаётся траектория радиального направления криволинейного перемещения сопрягаемой детали 5, а по признаку изменения угла наклона оси сопрягаемой детали определяют требуемое направление её перемещения по данной траектории. В случае варианта, показанного на рис. 6, а, перемещают рычаг 2 в противоположную от оси сторону. Соединяя камеру А с линией питания реализуют криволинейное перемещение детали 5 относительно детали 6 в требуемом направлении.



1 – крышки; 2 – рычаг; 3 – тяга; 4 – сиффон; 5 – деталь Д1; 6 – деталь Д2

Рис. 6. Схемы вариантов исходного взаимного положения сопрягаемых деталей

**Заключение.** Анализом современного уровня техники в предметной области исследований выявлен метод сборки, в котором для определения направления корректирующего перемещения используют величину осевого силового взаимодействия сопрягаемых деталей. Недостатки данного метода заключаются в сложности его реализации и ограниченной универсальности применения, зависимости от массогабаритных характеристик деталей, отсутствии учёта всех возможных сценариев процесса сборки. Методом исследования функционально-физических связей, анализом вариантов ситуаций процесса сборки выявлена и формализована ранее не учитывавшаяся ситуация отсутствия перекоса сопрягаемой детали. В результате исследования причинно-следственных связей выявлен существенный физический признак для управления процессом – изменение угла наклона оси сопрягаемой детали. Если в зоне сборки данный угол перестаёт изменяться, то направление корректирующего перемещения сопрягаемой детали совпадает с направлением её перекоса, а если данное физическое явление отсутствует, то необходимо перемещать в противоположном направлении.

На основе выявленной закономерности составлена блок-схема алгоритма определения направления коррекции и разработана структурная схема корректирующей системы.

Предложенный метод повышает эффективность выполнения автоматизированной сборки осесимметричных деталей типа «втулка-втулка», повышая достоверность и быстродействие идентификации типа перекоса и направления требуемой коррекции по сравнению с ранее известным методом.

Предложенная конструктивно-технологическая реализация метода подтверждает его практическую применимость и расширяет область использования автоматизированной сборки для деталей типа «втулка-втулка».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Непомилуев, В. В. Перспективные направления совершенствования качества сборки изделий машиностроения / В. В. Непомилуев, А. Н. Семенов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 8. – Ч. 2. – С. 71-78.
2. Кузнецова, С. В. Синтез управления в активных средствах адаптации деталей при автоматизированной сборке / С. В. Кузнецова, А. Л. Симаков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – № 4 (3). – С. 31-39.
3. Гудим, А. С. Интеллектуальная система компенсации нелинейностей систем автоматического управления / А. С. Гудим, Д. О. Савельев, В. В. Плохотнюк // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 4-11.
4. Бедрин, В. М. Обзор методов и устройств автоматического ориентирования деталей при сборке / В. М. Бедрин, А. В. Бедрина // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2000. – № 2. – С. 7-21.
5. Жарков, Г. Е. Метод сборки изменением положения центра тяжести / Г. Е. Жарков // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 11. – С. 7-9.
6. Мишулин, Ю. Е. Система управления адаптивным сборочным роботом с моделью технологического процесса / Ю. Е. Мишулин, И. Н. Егоров, В. В. Буненков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-4. – С. 707-712.
7. Черняховская, Л. Б. Математическое моделирование процесса совмещения цилиндрических деталей с гарантированным зазором / Л. Б. Черняховская, Д. А. Симаков. – М.: Триумф, Лучшие книги, 2020. – 147 с.
8. Управление дискретными процессами в ГПС / Л. С. Ямпольский и др. – Киев: Тэхника; Вроцлав: Изд-во Вроцлав, политехн. ин-та; Токио: Токосе, 1992. – 251 с.
9. Сысоев, С. Н. Сильфонный привод автоматизированной коррекции положения осесимметричных сопрягаемых деталей / С. Н. Сысоев, В. С. Сидоров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2025. – Т. 26. – № 5. – С. 195-200.
10. Сысоев, С. Н. Принципы и методы нахождения технических решений. Метод исследования функционально-физических связей: моногр. / С. Н. Сысоев. – Владимир: ВлГУ, 2007. – 213 с.



Пухов А. А.  
A. A. Pukhov

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫРАБОТКИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ  
ПАРАМЕТРАМИ ВХОДЯЩЕГО В ДВИГАТЕЛИ ВОЗДУХА**

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE ELECTRICAL ENERGY GENERATION PROCESS  
BY A DIESEL POWER PLANT WHEN MANAGING THE PARAMETERS OF THE AIR  
ENTERING THE ENGINES**

**Пухов Алексей Александрович** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 7(984)179-15-04. E-mail: lemonsqueezyeasy@yandex.ru.  
**Aleksey A. Pukhov** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 7(984)179-15-04. E-mail: lemonsqueezyeasy@yandex.ru.

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена возможность осуществления экономии топлива при выработке электроэнергии двумя параллельно работающими дизель-генераторными установками в составе дизель-электрической электростанции при условии осуществления управления параметрами давления и температуры входящего в их цилиндры воздуха. На основе ранее разработанного способа управления дизель-генераторной установкой, а также полученных зависимостей, его описывающих, был предложен критерий минимизации расхода топлива на выработку электроэнергии с учётом работы дизель-генераторов на общую нагрузку переменного значения. В результате исследования различных режимов работы указанной системы продемонстрировано, что применение управления параметрами входящего в цилиндры воздуха является эффективным решением, позволяющим осуществлять существенную экономию топлива при выработке электроэнергии двумя генераторами на совместную нагрузку.

**Summary.** This article examines the potential for fuel savings when generating electricity from two parallel diesel generator sets within a diesel-electric power plant, provided that the pressure and temperature parameters of the air entering their cylinders are controlled. Based on a previously developed diesel generator control method and the resulting dependencies describing it, a criterion for minimizing fuel consumption for electricity generation is proposed, taking into account the operation of the diesel generators under a common variable load. A study of various operating modes of this system demonstrated that controlling the parameters of the air entering the cylinders is an effective solution, enabling significant fuel savings when generating electricity from two generators under a combined load.

**Ключевые слова:** управление двигателем внутреннего сгорания, повышение эффективности дизель-генератора.

**Key words:** internal combustion engine control, increasing the efficiency of a diesel generator.

УДК 621.43-52

**Введение.** Повышение эффективности производства электроэнергии является важной проблемой современной промышленности, находящей своё отражение в различных видах электростанций [1]. Одним из видов электростанций, находящих широчайшее применение в условиях автономных электросетей малой и средней мощности, являются дизельные электростанции. Выработка электроэнергии с использованием дизель-генераторных установок (ДГУ) в качестве основного источника энергии в изолированной энергосистеме сталкивается с изрядным количеством известных проблем, включающих вопросы надёжности [2], необходимости резервирования мощностей [3], обеспечения синхронизации работы на общую нагрузку [4] и многое другое. Однако развитие техники и технологии, распространение систем автоматизации приводят к тому, что в качестве наиболее существенной проблемы, вносящей наибольший вклад в увеличение себестои-

мости электроэнергии, генерируемой с использованием ДГУ, на данный момент следует считать зависимость эффективности работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в составе ДГУ от текущей нагрузки двигателя.

Упомянутая проблема хорошо известна и оттого имеет набор существующих решений, включающих подходы, связанные с внесением изменений в конструкцию ДГУ [5], с изменением характера работы ДГУ [6], а также решения, направленные на организацию электростанции на основе ДГУ в целом [7]. И тем не менее, несмотря на это, проблема остаётся не до конца решённой. Вызвано это в первую очередь с существенными экономическими затратами, необходимыми на модернизацию уже имеющихся ДГУ и электростанций в соответствии с известными решениями, что зачастую становится препятствием на пути к повышению эффективности выработки электроэнергии.

В результате этого возникает проблема разработки такого способа управления ДГУ при её работе на режиме частичных нагрузок, который сочетал бы высокую эффективность со сравнительно малыми затратами на его реализацию.

Ранее был предложен способ управления ДГУ на основе изменения параметров давления и температуры входящего в цилиндры воздуха [8].

Согласно способу, для компенсации изменяющихся при снижении мощности ДВС в составе ДГУ параметров воздуха, входящего в цилиндры, в сторону повышения результирующего коэффициента избытка воздуха и снижения температуры его, что приводит к более медленному протеканию процессов сгорания топлива и, как следствие, к снижению эффективности, предлагается осуществлять управление значением давления наддува и температуры воздуха на входе в цилиндры. При этом давление наддува регулируется за счёт осуществления частичного перепуска выхлопных газов мимо турбинной части турбокомпрессора таким образом, что снижение располагаемой мощности турбины соответствует снижению мощности компрессорной части и, как следствие, приводит к снижению давления наддувного воздуха, уменьшая итоговый коэффициент избытка воздуха при сгорании, а изменение температуры входящего в цилиндры воздуха происходит за счёт осуществления частичного перепуска выхлопных газов, отработавших в турбине, на не смешивающий подогреватель, в котором входящий в цилиндры воздух нагревается теплом выхлопных газов.

Исследование предложенного способа управления в предыдущих работах [9] показало его сравнительно высокую эффективность в области малых нагрузок ДВС в составе ДГУ. При этом была получена зависимость, определяющая максимально достижимое снижение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии при применении управления. Данная зависимость в виде графика минимального расхода топлива при номинальном режиме работы ДГУ и при применении предложенного способа управления представлена на рис. 1.

Исследование полученной зависимости позволяет вывести аппроксимирующие уравнения для кривых, описывающих зависимости удельных расходов топлива на выработку электроэнергии от относительной мощности для режимов с регулированием и без такового в виде полиномов шестой степени вида

$$y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + g,$$

где  $y$  – удельный расход топлива на выработку электроэнергии, кг/(кВт·ч);  $x$  – текущая относительная мощность в процентах;  $a, b, c, d, e, f, g$  – коэффициенты полинома.

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов приведены в табл. 1.

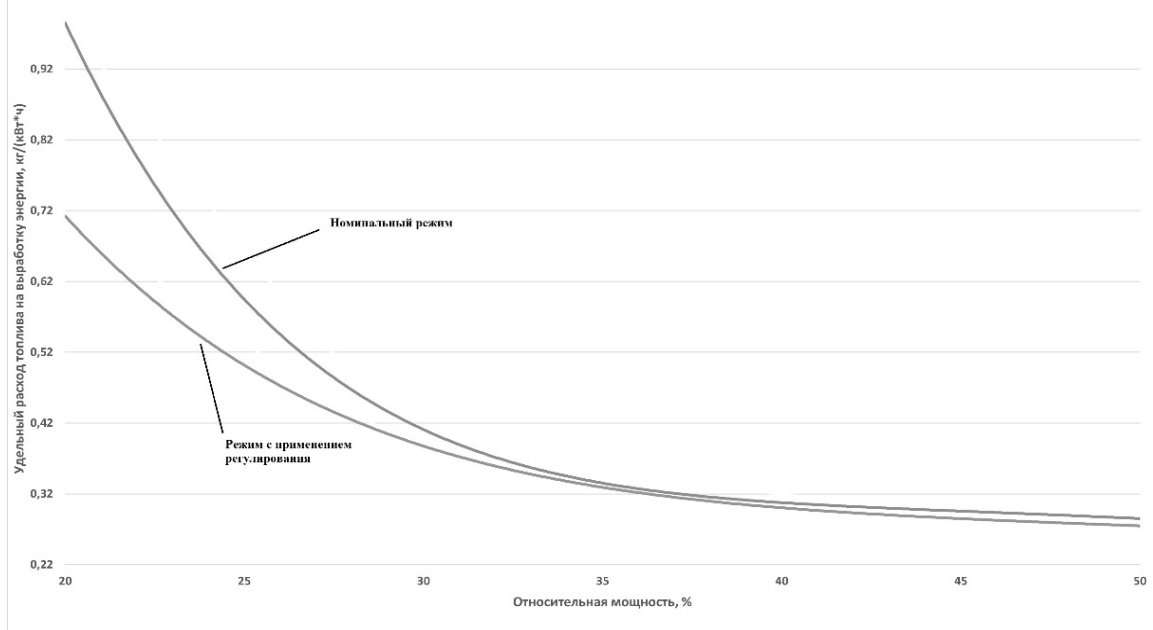


Рис. 1. Удельный расход топлива при номинальном режиме и при применении предложенного способа управления

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов

Коэффициент уравнения	$a \cdot 10^{10}$	$b \cdot 10^8$	$c \cdot 10^6$	$d \cdot 10^4$	$e \cdot 10^2$	$f \cdot 10^1$	$g$
Значения (номинальный режим)	1,404 91	-5,577 19	9,002 86	-7,561 42	3,488 87	-8,420 23	8,648 07
Значения (режим с регулированием)	0,416 852	-1,746 44	2,987 23	-2,671 50	1,321 56	-3,457 57	4,053 58

Данные зависимости могут быть использованы для моделирования работы двух ДГУ на общую нагрузку.

Вопросы повышения эффективности выработки электроэнергии ДГУ в составе дизель-генераторной электростанции путём распределения мощностей между отдельными ДГУ, работающими на параллельную нагрузку, ранее исследовались в [10]. Исходя из этого, рассмотрим критерий минимизации расхода топлива при работе двух ДГУ.

Пусть имеем два идентичных дизель-генератора, работающих на общую нагрузку. Примем за  $N$  номинальную мощность каждого двигателя, за  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – относительные мощности (к номинальной) первого и второго ДВС в составе ДГУ, за  $P$  – текущую потребляемую мощность в энергосети.

Тогда критерий равенства выработки энергии потребления может быть записан следующим образом:

$$P = \theta_1 N + \theta_2 N.$$

С другой стороны, удельный расход топлива на выработку электроэнергии для электростанции в целом  $u_{\text{общ}}$  может быть оценён как затраты топлива за единицу времени, делённые на количество произведённой электроэнергии, либо с учётом введённых ранее обозначений:

$$y_{\text{общ}} = \frac{y(\theta_1) + y(\theta_2)}{\theta_1 + \theta_2},$$

где  $y(\theta_1)$  и  $y(\theta_2)$  – удельный расход топлива на выработку электроэнергии при относительных мощностях  $\theta_1$  и  $\theta_2$  соответственно.

При рассмотрении параллельной работы двух ДГУ удобно использовать критерий доли вырабатываемой мощности каждым генератором по отношению ко всей производимой мощности. Принимая за  $x$  долю выработки генератора № 1 в общей генерации, можно записать следующие выражения:

$$\theta_1 = \frac{Px}{N} \text{ и } \theta_2 = \frac{P(1-x)}{N};$$

$$N \geq Px \text{ и } N \geq P(1-x).$$

В этих условиях критерием наиболее эффективной параллельной работы ДГУ будет считаться минимальный удельный расход топлива на выработку электроэнергии обоими агрегатами, определяемый по выражению

$$\frac{Pxy(\theta_1) + P(1-x)y(\theta_2)}{P} = xy\left(\frac{Px}{N}\right) + (1-x)y\left(\frac{P(1-x)}{N}\right) \rightarrow \min.$$

Для оценки возможной экономии топлива для исследования примем, что  $N = 150$  кВт,  $P = 2N = 300$  кВт, а изменение суммарной нагрузки на электростанцию варьируется от 20 до 100 % мощности с шагом в 10 %. Тогда путём нахождения минимума по удельному расходу топлива на выработку электроэнергии при работе двух генераторов на общую нагрузку можно получить следующие данные о долях выработки каждого из генераторов и расходах топлива (см. табл. 2).

Таблица 2

Наиболее экономичные параметры работы

Общая генерируемая мощность, кВт	Общая относительная мощность, %	Доля в выработке 1-го генератора, %	Доля в выработке 2-го генератора, %	Удельный расход топлива при номинальном режиме, кг/(кВт·ч)	Удельный расход топлива при регулировании, кг/(кВт·ч)	Экономия топлива, %
60	20	100	0	0,308	0,300	2,4
90	30	100	0	0,263	0,259	1,5
120	40	100	0	0,262	0,249	4,8
150	50	100	0	0,249	0,248	0,2
180	60	50	50	0,263	0,259	1,5
210	70	50	50	0,256	0,250	2,3
240	80	60	40	0,254	0,249	1,8
270	90	50	50	0,250	0,249	0,5
300	100	50	50	0,249	0,248	0,2

Как видно из табл. 2, параллельная работа генераторов на общую нагрузку позволяет отчасти нивелировать снижение эффективности выработки электроэнергии при уменьшении нагрузки отдельными генераторами. Однако упомянутые в табл. 2 режимы следует считать сложно реализуемыми на практике, т. к. в них присутствуют резкие скачки мощности, что невозможно осуществить в виду конечной инерции ДГУ. Более того, режимы табл. 2 не предусматривают мощност-

ных манёвров при резких скачках потребления, в результате чего следует учитывать при оценке наиболее экономичных режимов параллельной работы вопросы обеспечения запаса по мощности, как показано в табл. 3.

Таблица 3

Наиболее экономичные параметры работы с учётом запаса по мощности

Общая генерируемая мощность, кВт	Общая относительная мощность, %	Доля в выработке 1-го генератора, %	Доля в выработке 2-го генератора, %	Удельный расход топлива при номинальном режиме, кг/(кВт·ч)	Удельный расход топлива при регулировании, кг/(кВт·ч)	Экономия топлива, %
60	20	100	0	0,308	0,300	2,4
90	30	100	0	0,263	0,259	1,5
120	40	70	30	0,386	0,346	10,3
150	50	70	30	0,302	0,291	3,7
180	60	60	40	0,270	0,261	3,3
210	70	50	50	0,256	0,250	2,3
240	80	60	40	0,254	0,249	1,8
270	90	50	50	0,250	0,249	0,5
300	100	50	50	0,249	0,248	0,2

Как видно из табл. 3, применение предложенного ранее подхода к управлению в условиях совместной выработки энергии двумя ДГУ позволяет осуществлять значимую экономию топлива, в особенности при работе всей электростанции на сравнительно малой мощности (порядка 40 %). С учётом того, что подобные режимы потребления, как позволяют судить данные [11], наблюдаются значительное количество общего времени работы электростанции в автономной системе электроснабжения малого поселения, следует считать, что потенциал применения способа управления ДВС в составе ДГУ путём изменения материально-энергетических параметров входящего в цилиндры воздуха может быть достаточно широк. Однако следует отметить, что предложенный подход к управлению ДГУ в составе дизельной электростанции с несколькими параллельно работающими на общую нагрузку установками неизбежно сталкивается с проблемой организации совместного осуществления наиболее экономичного режима работы как отдельных ДГУ (путём управления параметрами входящего в цилиндры воздуха), так и их параллельной работы (за счёт изменения распределения мощности между отдельными генераторами). В связи с этим, в особенности с учётом инерционности упомянутых процессов, применение классических систем управления зачастую является недостаточным, как было показано ранее для сложных систем управления [12; 13], что запрашивает применение интеллектуальных систем управления [14].

**Заключение.** В ходе данной работы было показано, что управление параметрами давления наддува и температуры входящего в цилиндры воздуха дизель-генераторных установок при их совместной работе на общую нагрузку в составе дизельной электростанции позволяет осуществлять значительную экономию топлива при выработке единицы электроэнергии. Данный способ управления хотя и не реализует столь же значимое снижение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии, как при рассмотрении единичной дизель-генераторной установки, оказывается достаточно эффективным при малых нагрузках на электростанцию в целом, достигая экономии в 10 % при 40%-й нагрузке, что с учётом распространённости режима частичной мощности при реальной эксплуатации отвечает целям повышения эффективности выработки электроэнергии.

Пухов А. А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫРАБОТКИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРАМЕТРАМИ ВХОДЯЩЕГО В ДВИГАТЕЛИ ВОЗДУХА

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пухов, А. А. Исследование возможности модернизации тепловой схемы энергоблока на базе турбины Т-180/210-130 с целью повышения тепловой экономичности / А. А. Пухов, В. И. Шаломов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. В 4 ч., Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 года. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 312-315.
2. Патент № 2678820 С1 Российская Федерация, МПК H02J 9/04. Система автономного резервного электро-снабжения на базе дистанционно управляемой дизель-генераторной установки: № 2017142798: заявл. 07.12.2017: опубл. 04.02.2019 / Мастеров М. Л., Рогов С. В., Салтыков М. И.; заявитель Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы». – 10 с.
3. Гринкруг, М. С. Существующие способы регулирования работы двигателей дизель-генераторов и возможные пути их совершенствования / М. С. Гринкруг, А. А. Пухов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № VII (63). – С. 41-51.
4. Гринкруг, Я. С. Определение оптимального распределения мощности нагрузки между дизель-генераторами в дизельной электростанции / Я. С. Гринкруг, В. А. Соловьёв, Ю. И. Ткачёва // Межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С. 168-171.
5. Lou, Z.; Zhu, G. Review of advancement in variable valve actuation of internal combustion engines. Appl. Sci. 2020, 10, 1216.
6. Han J., Somers B. Effects of butanol isomers on the combustion and emission characteristics of a heavy-duty engine in RCCI mode. – SAE Technical Paper, 2020. – № 2020-01-0307.
7. Дмитриенко, В. Н. Исследование и оптимизация структуры и состава фото-дизельных электростанций северных посёлков: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Дмитриенко Виталий Николаевич. – Томск, 2018. – 153 с.
8. Патент № 2839299 Российская Федерация, МПК7 F02M 31/04 (2025.01); F02D 9/02 (2025.01); F02D2009/0225 (2025.01). Способ повышения эффективности работы двигателя внутреннего сгорания при его работе на частичных нагрузочных режимах: №2839299: заявл. 12.07.2025: опубл. 29.04.2025 / Пухов А. А., Гринкруг М. С.; заявитель ФГБОУ ВО «КнАГУ». – 8 с.
9. Пухов, А. А. О возможности управления параметрами рабочего тела дизель-генераторной установки судна / А. А. Пухов, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4, ч. 3. – С. 135-143.
10. Гринкруг, Я. С. Управление режимами работы дизельных электростанций в автономных сетях электро-снабжения: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06 / Гринкруг Яков Соломонович. – Комсомольск-на-Амуре, 2006. – 170 с.
11. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 120 с.
12. Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололёда на проводах линий электропередач / В. А. Соловьёв, С. И. Сухоруков, С. П. Черный, К. Е. Костин, Д. О. Савельев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № III-1 (23). – С. 18-25.
13. Девянин, С. Н. Системы управления двигателем / С. Н. Девянин, В. Н. Щукина // Международный технико-экономический журнал. – 2015. – № 6. – С. 65-70.
14. Пухов, А. А. Особенности моделирования интеллектуальных систем управления двигателем внутреннего сгорания в составе дизель-генераторной установки / А. А. Пухов, С. П. Черный // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф., посвящённой 70-летию со дня образования Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, Комсомольск-на-Амуре, 07-08 октября 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2025. – С. 302-305.



Урасов Д. В.  
D. V. Urasov

**МЕТОД ОЦЕНКИ СТАБИЛИЗАЦИИ ДУГИ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ  
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТРЁХФАЗНОГО ТОКА**

**METHOD FOR ASSESSING ARC STABILIZATION IN ELECTRIC ARC STEELMAKING  
FURNACES BASED ON THE ANALYSIS OF THREE-PHASE CURRENT STATISTICAL  
CHARACTERISTICS**

**Урасов Дмитрий Владимирович** – начальник ОАСУ ТП ООО «Амурсталь» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Вагонная, 30; тел. 8(4217)52-95-54. E-mail: UrasovDV@amurstal.com.

**Dmitry V. Urasov** – Head of the Process Control and Automation Department, LLC «Amurstal» (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681000, Komsomolsk-on-Amur, Vagonnaya st., 30; tel. +7(4217)52-95-54. E-mail: UrasovDV@amurstal.com.

**Аннотация.** Разработан метод автоматизированной оценки степени стабилизации дугового разряда в электродуговых сталеплавильных печах в процессе расплавления шихты. Метод базируется на непрерывном анализе мгновенных значений трёхфазных токов электродов и расчёте обобщённого показателя стабильности дуги. Формирование показателя стабильности дуги осуществляется посредством агрегации нормированных статистических параметров: коэффициента вариации и пик-фактора тока для каждой фазы. Практическая ценность метода заключается в определении момента завершения активного расплавления, что может быть использовано для формирования команд отключения печи или оптимизации режима. Алгоритм реализован в среде MATLAB для целей моделирования и отладки, а также адаптирован для внедрения в систему управления на базе программируемого логического контроллера.

**Summary.** A method for automated assessment of the stabilization degree of an arc discharge in electric arc steelmaking furnaces during charge melting has been developed. The method is based on continuous analysis of the instantaneous values of three-phase electrode currents and calculation of a generalized arc stability index. The formation of the arc stability index is carried out by aggregating normalized statistical parameters – the coefficient of variation and the peak factor of the current for each phase. The practical value of the method lies in determining the moment of completion of active melting, which can be used for generating furnace shutdown commands or optimizing the operating mode. The algorithm is implemented in the MATLAB environment for modeling and debugging purposes and is also adapted for integration into a control system based on a programmable logic controller.

**Ключевые слова:** электродуговая сталеплавильная печь, дуговой разряд, стабильность горения дуги, трёхфазная система токов, анализ временных рядов, автоматизация технологического процесса, программируемый логический контроллер.

**Key words:** electric arc furnace, arc discharge, arc burning stability, three-phase current system, time series analysis, technological process automation, programmable logic controller.

УДК 681.5

**Постановка задачи.** Эксплуатация электродуговых сталеплавильных печей (ЭДСП) сопряжена с необходимостью оптимизации высокоэнергоёмкого этапа расплавления твёрдой шихты [1; 2]. Характерной особенностью данного этапа являются существенные нестационарные колебания тока дуги, обусловленные изменяющимся сопротивлением между электродами и шихтой [3] (см. рис. 1, а). По мере формирования жидкой ванны условия горения дуги стабилизируются, что является объективным признаком перехода к следующей технологической стадии (см. рис. 1, б).

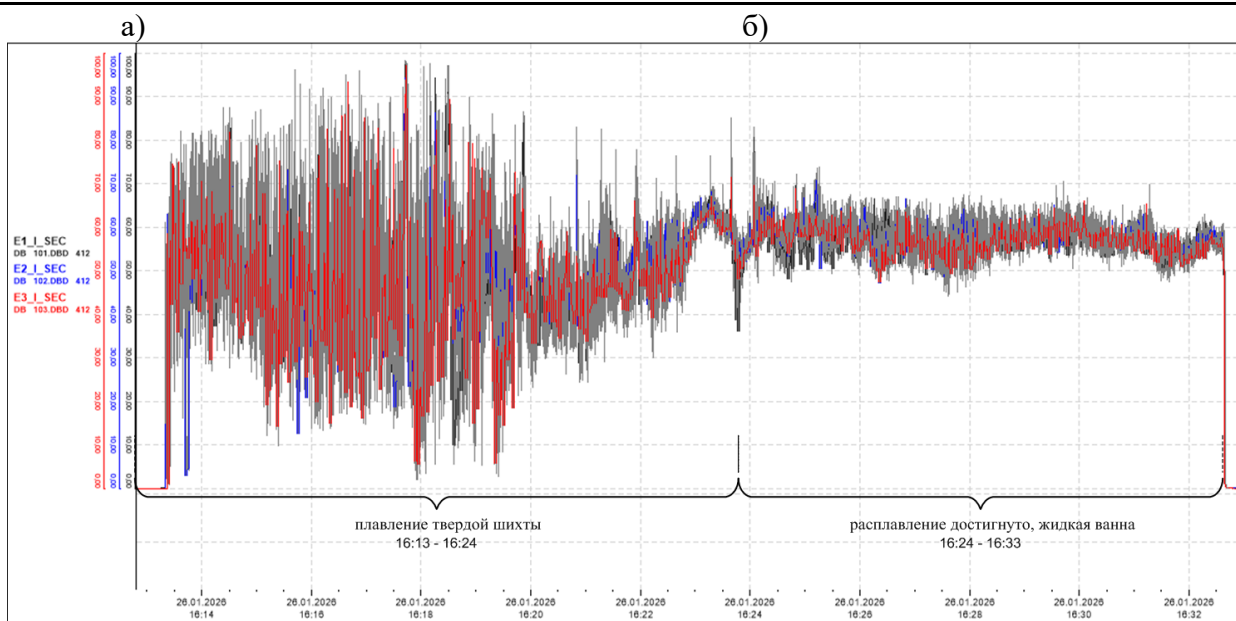


Рис. 1. График изменения токов под электродами при плавлении в ЭДСП:  
 а – плавление твёрдой шихты; б – расплавление достигнуто, жидкая ванна

Применяемые методы определения момента завершения расплавления основаны на учёте интегрального расхода электроэнергии, не учитывают состав металлошихты, состояние рабочего пространства печи и другие факторы. Это обуславливает необходимость создания формализованного подхода на основе анализа измеряемых технологических параметров, в частности трёхфазных токов.

Таким образом, актуальной задачей является разработка объективного критерия, позволяющего идентифицировать момент стабилизации дуги в режиме реального времени. Решение данной задачи позволит обеспечить снижение удельного расхода электроэнергии, минимизировать износ электродов, сократить длительность плавки и повысить воспроизводимость качества металла [4; 5].

**Описание метода и алгоритмическая реализация.** В качестве исходных данных для анализа используются дискретные последовательности мгновенных значений токов по трём фазам ( $I_A, I_B, I_C$ ) [6], регистрируемые системой измерения автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) [7]. Частота дискретизации определяется характеристиками измерительных каналов [8]. В рамках настоящей работы использовалось временное окно наблюдения, соответствующее 128 отсчётам, вычисляющееся автоматизированной системой управления электродами дуговой печи фирмы CONCAST, эксплуатируемой на предприятии ООО «Амур-сталь». Ширина в 128 отсчётов составляет интервал 2,8 с.

**Расчёт локальных статистических показателей.** Для количественной оценки вариативности тока в скользящем временном окне для каждой  $i$ -й фазы  $i \in \{A, B, C\}$  рассчитываются два независимых показателя.

Первичным показателем является коэффициент вариации  $CV_i$ , вычисляемый как отношение выборочного среднеквадратического отклонения  $\sigma_i$ , рассчитанного на основе несмещённой оценки дисперсии [9] тока в окне, к его среднему арифметическому значению  $I_{avg i}$ :

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{I_{avg i}}$$

Данный параметр характеризует относительный разброс значений тока, при этом его снижение свидетельствует о стабилизации дугового разряда.

Вторым показателем выступает пик-фактор  $PF_i$ , определяемый через отношение размаха тока к его среднему арифметическому значению  $I_{avg i}$  в анализируемом окне:

$$PF_i = \frac{I_{max i} - I_{min i}}{I_{avg i}},$$

где  $I_{max i}$  и  $I_{min i}$  – экстремальные значения тока в окне;  $I_{avg i}$  – среднеарифметическое значение. Показатель  $PF_i$  является чувствительным к кратковременным экстремальным событиям, таким как обрывы дуги или короткие замыкания.

**Нормирование и формирование фазного показателя стабильности.** Для последующей агрегации производится нормирование каждого показателя в диапазоне  $\{0, 1\}$  по формулам

$$CV_{norm i} = \frac{1}{1 + k_1 \cdot CV_i};$$

$$PF_{norm i} = \frac{1}{1 + k_2 \cdot PF_i};$$

где коэффициенты масштабирования  $k_1$  и  $k_2$  подбираются эмпирически на основе анализа исторических данных конкретной печи. Значение, равное 1, соответствует идеально стабильному сигналу.

Интегральный показатель стабильности для отдельной фазы  $S_i$  формируется как взвешенная сумма нормированных значений:

$$S_i = \omega_1 \cdot CV_{norm i} + \omega_2 \cdot PF_{norm i}. \quad (1)$$

Весовые коэффициенты в (1) выбираются исходя из выполнения условия  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ . Значения  $\omega_1 = 0,7$ ,  $\omega_2 = 0,3$  были определены эмпирически по результатам анализа серии промышленных плавок. Критерием выбора являлось достижение индексом стабильности дуги значения 0,8 в момент отключения печи сталеваром при требуемом удельном расходе электроэнергии. Полученное соотношение отражает больший вклад общего разброса тока по сравнению с единичными выбросами.

**Расчёт обобщённого индекса стабильности дуги.** Для получения единой оценки состояния трёхфазной дуговой системы предлагается использовать составной индекс стабильности дуги –  $ASI$ , вычисляемый по формуле

$$ASI = \min(S_A, S_B, S_C) \cdot \frac{S_A + S_B + S_C}{3}.$$

Составляющие части индекса стабильности обеспечивают выполнение двух условий: чувствительность к наиболее нестабильной фазе (оператор  $\min$ ) и учёт общего уровня стабильности (среднее арифметическое). Таким образом, высокое значение  $ASI$  достигается только при одновременной стабильности всех трёх фаз.

**Обработка граничных условий и реализация.** В алгоритме предусмотрена обработка особых случаев для обеспечения робастности:

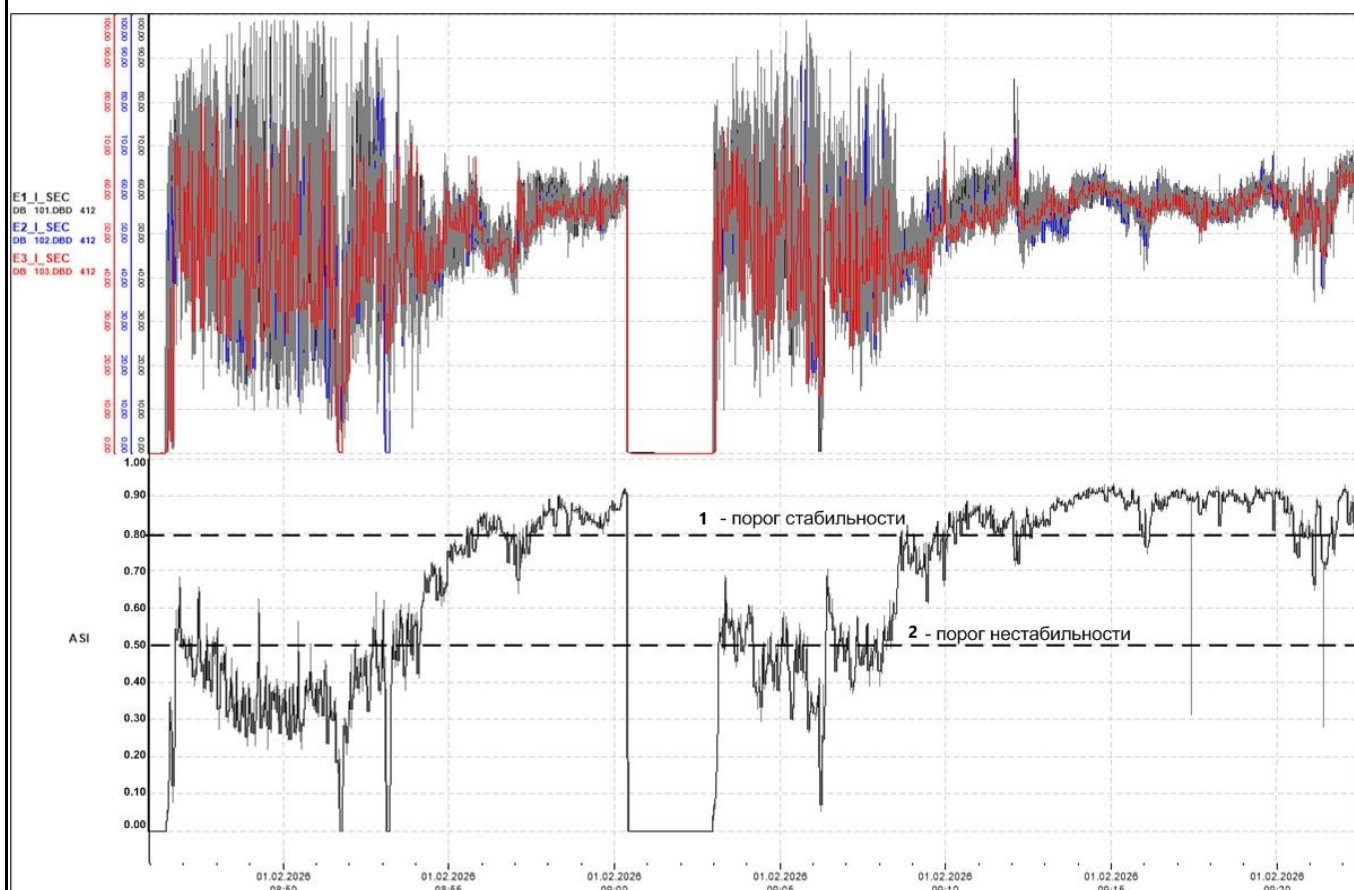
- обнуление  $ASI$  при падении тока фазы ниже порогового значения  $I_{threshold}$ ;
- защита от деления на ноль при расчёте  $CV_i$  и  $PF_i$ ;
- ограничение итогового значения  $ASI$  в диапазоне  $\{0, 1\}$ .

Первоначально исследование и проверка работоспособности алгоритма расчёта индекса стабильности дуги проводились на данных, полученных с реально работающей электродуговой печи в программной среде MATLAB.

Для реализации в системе управления на базе ПЛК серии SIEMENS S7-400 алгоритм был оптимизирован с учётом вычислительных ограничений: использование циклического буфера на 128 отсчётов для организации скользящего окна, применение рекуррентных формул для обновления статистик, минимизация операций с плавающей точкой [10–12].

**Критерий стабилизации и результаты апробации.** Момент завершения активного расплавления идентифицируется по динамике индекса *ASI*. Дуга считается стабилизированной при одновременном выполнении следующих условий в течение непрерывного интервала длительностью 60 с:

- $ASI > 0,8$  (см. рис. 2);
- стандартное отклонение *ASI* внутри интервала  $< 0,05$ ;
- отсутствуют единичные провалы *ASI* ниже уровня 0,50 (см. рис. 2).



1 – порог стабильности; 2 – порог нестабильности дуги  
Рис. 2. Оценка стабильности дуги при плавлении в ЭДСП

Указанные пороговые значения и длительность интервала были определены в ходе анализа данных о более чем 170 промышленных плавках и обеспечивают надёжное отделение устойчивого состояния от кратковременных флуктуаций.

Апробация метода проводилась на реальных данных в ходе работы дуговой сталеплавильной печи. В результате было установлено, что рассчитанный индекс *ASI* демонстрирует высокую корреляцию с экспертными оценками оператора. Точность определения момента стабилизации дуги составила  $\pm 30$  с. Внедрение алгоритма в качестве рекомендательной системы для сталевара, отображающей текущее значение *ASI*, его тренд и прогноз до стабилизации, позволит сократить среднее время расплавления на 3...5 % за счёт своевременного перехода к следующему технологическому этапу.

**Выводы.** Представленный метод обеспечивает объективную, формализованную оценку стабилизации дугового разряда в ЭДСП на основе анализа статистических характеристик трёхфазного тока. Ключевыми преимуществами метода являются физическая обоснованность используемых показателей, адаптивность к различным режимам работы печи и возможность эффективной



реализации на стандартных технических средствах АСУ ТП. Практическое внедрение метода способствует автоматизации определения критической точки технологического процесса – завершения расплавления – и создаёт основу для дальнейшей оптимизации энергопотребления и повышения общей эффективности сталеплавильного агрегата.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрин, В. А. *Металлургия стали: учеб. для вузов* / В. А. Кудрин. – 2-е изд., перераб. – М.: *Металлургия*, 1989. – 560 с.
2. Jones, J. A. T. *Electric arc furnace steelmaking* / J. A. T. Jones, B. Bowman, P. A. Lefrank // *The Making, Shaping and Treating of Steel* / ed. by R. J. Fruehan. – Pittsburgh: *The AISE Steel Foundation*, 1998. – Ch. 10. – P. 525-660.
3. Сисоян, Г. А. *Электрическая дуга в электрической печи: учеб. пособие* / Г. А. Сисоян. – М.: *Металлургия*, 1974. – 304 с.
4. Бургутин, Ю. И. *Организация работ по эксплуатации систем автоматизации в чёрной металлургии: справ.* / Ю. И. Бургутин, К. И. Котов, М. А. Шершевер. – М.: *Металлургия*, 1986. – 272 с.
5. Bowman, V. *Arc furnace physics* / V. Bowman, K. Krüger. – Düsseldorf: *Verlag Stahleisen*, 2009. – 268 p.
6. ГОСТ Р 54130-2010. *Качество электрической энергии. Термины и определения = Quality of electric energy. Terms and definitions: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 840-ст: введён впервые: дата введения 2012-07-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы». – М.: *Стандартинформ*, 2012. – 36 с.*
7. Урасов, Д. В. *Фильтрация сигнала управления пропорциональным регулятором для электрода клапана в дуговой сталеплавильной печи* / Д. В. Урасов, С. П. Черный // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике.* – 2022. – № I (57). – С. 46-51.
8. Глишков, Г. М. *АСУ технологическими процессами в агломерационных и сталеплавильных цехах: учеб. для вузов* / Г. М. Глишков, В. А. Маковский. – М.: *Металлургия*, 1981. – 360 с.
9. ГОСТ Р ИСО 3534-1-2019. *Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей = Statistical methods. Vocabulary and symbols. Part 1. General statistical terms and terms used in probability: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 сентября 2019 г. № 636-ст: взамен ГОСТ Р 50779.10-2000: дата введения 2020-01-01 / подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (ЗАО «НИЦ КД»). – М.: *Стандартинформ*, 2019. – 70 с.*
10. Urasov D. V., *Intelligent Control System for the Complex of Ultrasonic Gas-Oxygen Burners* / D. V. Urasov, S. P. Cherniy, V. A. Solovyev, A. V. Buzikayeva // *Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies*, Springer Nature Switzerland AG 2021, Part of the *Lecture Notes in Networks and Systems* book series (LNNS, volume 200), p. 106-116. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0\_12.
11. Соловьев, В. А. *Адаптивная фильтрация задающего сигнала системы управления расходом воды зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья* / В. А. Соловьев, Д. В. Урасов // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике.* – 2020. – № VII-1 (47). – С. 4-13.
12. Urasov D., *Second-order aperiodic link modelling with the use of Siemens programmable logical controller SCL hardware* / D. Urasov, S. Cherniy, R. Bazhenov, L. Alekseeva, I. Korosteleva // *Journal of Physics: Conference Series* 1661 (2020) 012111.

**Сбитнев Н. Р., Савельев Д. О., Черный С. П.**  
**N. R. Sbitnev, D. O. Savelyev, S. P. Cherniy**

## **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ**

### **FEATURES OF MODELING CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC DRIVES OF ROBOTIC PLATFORMS**

**Сбитнев Никита Романович** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: eparu@knastu.ru.

**Nikita R. Sbitnev** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Савельев Дмитрий Олегович** – старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Dmitriy O. Savelyev** – Senior Lecturer, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Черный Сергей Петрович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Sergei P. Cherniy** – Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе исследуется моделирование электродвигателя постоянного тока для применения в мобильных роботизированных платформах. Проводится сравнение классической линейной модели с расширенной имитационной моделью, учитывающей реальные нелинейности и динамические задержки. Анализ демонстрирует, что классический подход к построению имитационной модели, будучи математически более простым, не отражает критически важные переходные процессы, наблюдаемые в физических системах. Расширенная модель, напротив, соответствует эмпирической динамике, что подчёркивает необходимость комплексного моделирования для обеспечения надёжного управления в мобильных платформах с дифференциальным приводом.

**Summary.** This paper investigates the modeling of a DC motor for application in mobile robotic platforms. A comparison is performed between a classical linear model and an enhanced simulation model that accounts for real-world nonlinearities and dynamic delays. The analysis demonstrates that the classical approach to simulation modeling, while mathematically simpler, fails to capture critically important transient processes observed in physical systems. In contrast, the enhanced model accurately reproduces empirical dynamics, underscoring the necessity of comprehensive modeling to ensure reliable control in mobile platforms with differential drive.

**Ключевые слова:** электропривод, нелинейности, роботизированная платформа, контроль траектории, имитационная модель.

**Key words:** electric drive, nonlinearities, robotic platform, trajectory tracking, simulation model.

УДК 621.313.2:681.5.015

**Введение.** Современное моделирование электроприводов на базе электродвигателя постоянного тока в инженерной практике преимущественно базируется на классическом линейном подходе, восходящем к фундаментальным работам по теории электромеханических систем середины XX века. Типовая модель представляет двигатель в виде совокупности двух линейных дифферен-

циальных уравнений, электрического и механического, с последующим преобразованием в передаточные функции в пространстве Лапласа. Электрическая часть двигателя описывается балансом напряжений: приложенное напряжение тратится на преодоление сопротивления обмотки, на изменение тока из-за индуктивности и на компенсацию противо-ЭДС, которая растёт с увеличением скорости вращения. Механическая часть описывается движением ротора: его ускорение создаётся электромагнитным моментом от тока в обмотке и тормозится моментом трения, пропорциональным скорости. Такая модель не отражает динамику реальных физических процессов. Описанный подход получил широкое распространение благодаря аналитической простоте, возможности применения классических методов синтеза регуляторов и достаточной точности при работе в стационарных режимах с малыми возмущениями. В настоящее время подавляющее большинство учебных курсов по теории автоматического управления, а также программные пакеты имитационного моделирования используют по умолчанию именно такую упрощённую модель для проектирования и настройки систем управления.

Однако при переходе от теоретических расчётов к практической реализации на реальных объектах выявляется существенный разрыв между динамикой классической модели и реальной системы управления. Данный подход принципиально игнорирует целый ряд нелинейных эффектов и динамических запаздываний, неизбежно присутствующих в физических электроприводах: эффекты ограничения напряжения и тока в силовых ключах, люфт и мёртвые зоны в механических передачах, сухое трение (эффект Страйбека), температурную зависимость параметров обмотки, задержки дискретизации и широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а также динамическое взаимодействие с параметрами внешней нагрузки. В условиях стационарной работы (например, на лабораторном стенде) эти факторы могут проявляться слабо, однако в мобильных роботизированных платформах их влияние становится критическим. При движении по неровной поверхности нагрузка на колёса изменяется стохастически, вызывая резкие переходные процессы в приводе; при выполнении манёвров разворота на месте возникает необходимость синхронизации скоростей двух двигателей с точностью до долей процента, где даже незначительные задержки коммутации ШИМ приводят к накоплению ошибки курса; при старте с места неучтённое сухое трение вызывает «рывок» движения, способный повредить перевозимый груз или нарушить балансировку платформы. Более того, в автономных системах, функционирующих без постоянного операторского контроля, ошибки позиционирования, обусловленные неточностью модели, аккумулируются во времени, приводя к сбою навигационной либо иной задачи управления.

Сохранение классического подхода к моделированию электроприводов в условиях проектирования систем управления для роботизированных платформ с двигателями малой мощности даёт некорректное представление об устойчивости и качестве управления объектом в полевых условиях.

**Моделирование электропривода постоянного тока.** В качестве рассматриваемого объекта управления был выбран типовой электропривод на базе коллекторного электродвигателя малой мощности. Рассмотрен двигатель постоянного тока с независимым возбуждением Crouzet 89 850 007 с номинальными параметрами: напряжение питания 12 В, частота вращения 3000 об/мин, мощность 35 Вт, ток якоря 2,92 А. Электрические параметры якорной цепи (сопротивление 0,9 Ом, индуктивность 1,2 мГн) и механические характеристики (момент инерции  $0,65 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>) определяют динамические свойства привода и используются при синтезе регуляторов.

Классическая структура электропривода постоянного тока реализована на основе принципа подчинённого регулирования координат с двумя контурами управления: внутренним контуром тока якоря и внешним контуром скорости. Данный подход является стандартным для типовых двигателей постоянного тока с независимым возбуждением и отдельными обмотками якоря и возбуждения, что обеспечивает возможность каскадного управления электромагнитными и механическими процессами [1].

Структурная реализация модели представлена на рис. 1. Сигнал задания скорости поступает на вход преобразователя (RPM2V), осуществляющего масштабирование размерной величины

частоты вращения в управляющее напряжение ( $u\_ref$ ), пропорциональное желаемой скорости вращения вала двигателя.

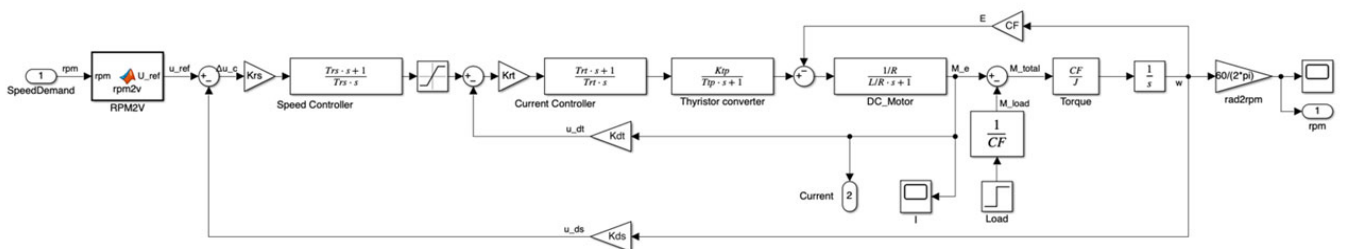


Рис. 1. Классическая структурная схема электропривода

Внешний контур скорости функционирует на основе рассогласования между сигналом задания ( $u\_ref$ ) и сигналом обратной связи по скорости ( $u\_ds$ ), формируемым посредством датчика скорости с коэффициентом передачи ( $Kds$ ). Регулятор скорости, выполненный по пропорционально-интегральному (ПИ) закону настройки на симметричный оптимум, обеспечивает астатизм первого порядка по задающему воздействию, что гарантирует нулевую статическую ошибку регулирования скорости в установившемся режиме при ступенчатом изменении задания.

Выходной сигнал регулятора скорости формирует задание по току якоря, которое поступает на вход внутреннего контура тока. Данный контур осуществляет регулирование тока якоря на основе рассогласования между заданным и фактическим значениями тока, причём сигнал обратной связи по току ( $u\_dt$ ) формируется через датчик тока с коэффициентом передачи ( $Kdt$ ). Пропорционально-интегральный регулятор тока, синтезированный по критерию модульного оптимума, обеспечивает высокое быстродействие контура и ограничение тока якоря на допустимом уровне в переходных режимах, предотвращая перегрузку силовой части преобразователя и обмоток двигателя.

Математическая модель силовой части привода включает в себя дифференциальные уравнения электрического равновесия цепи якоря, учитывающие активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря, а также уравнение движения, связывающее электромагнитный момент ( $M_e$ ), момент нагрузки ( $M\_load$ ) и скорость вращения через суммарный момент инерции привода ( $J$ ).

Важно отметить, что классическая структура с подчинённым двухконтурным регулированием, несмотря на свою простоту и надёжность, не учитывает сопутствующие нелинейности объекта управления, такие как ограничение напряжения, дискретизация управляющего сигнала или инерционные задержки в коммутационных элементах, что упрощает анализ устойчивости и синтез регулятора, но может привести к расхождению с экспериментальными данными в режимах сильных возмущений. Модель также предполагает мгновенную реакцию всех элементов системы, что допустимо при рассмотрении медленных процессов по сравнению с электромагнитными и механическими постоянными времени.

Расширенная модель учитывает комплексный подход к реализации динамики особенностей каждой составляющей системы управления, к примеру, нелинейные элементы и временные запаздывания [2]. Структурная реализация расширенной модели представлена на рис. 2.

В отличие от идеализированного представления, где электрическая и механическая подсистемы редуцируются к последовательности линейных передаточных функций, расширенная модель включает иерархию физических ограничений, начиная от силового каскада и заканчивая механической передачей, что позволит оценить влияние совокупности нелинейностей на устойчивость и качество переходных процессов [3].

Ключевым элементом структуры является блок регулятора скорости и напряжения (Speed and Current Controller), представленный на рис. 3. Блок представляет собой типовую каскадную систему подчинённого регулирования по скорости и по току.

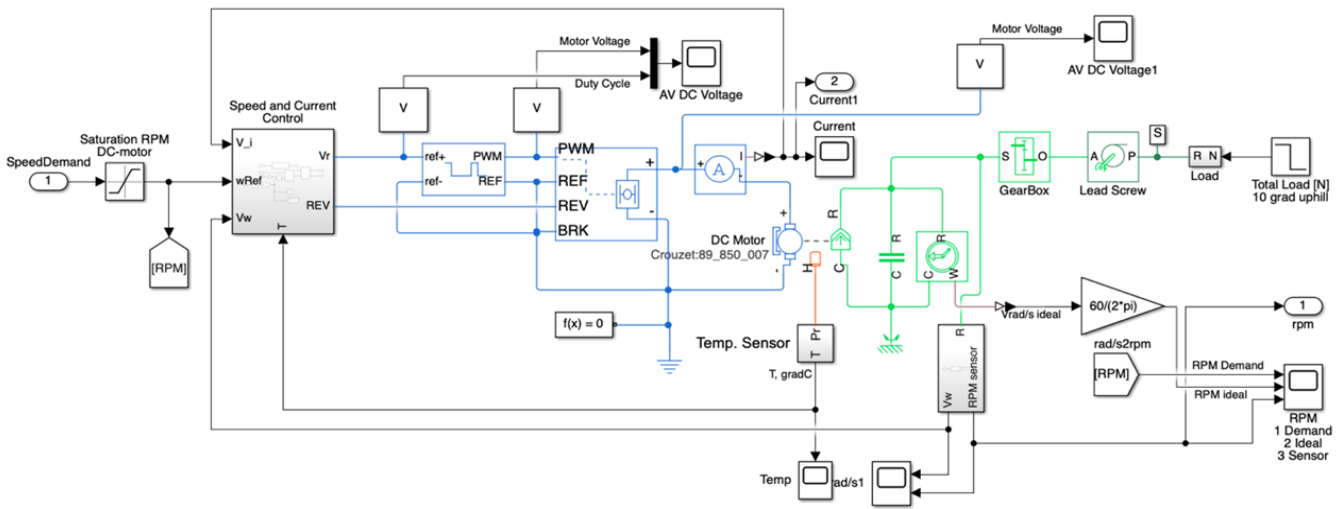


Рис. 2. Расширенная структурная схема электропривода

Структурная реализация внешнего контура скорости (см. рис. 4) включает пропорционально-интегральный регулятор с предварительной фильтрацией сигнала обратной связи, что обеспечивает подавление высокочастотных составляющих ШИМ-модуляции и электромагнитных помех. В подсистему также входит ограничитель выходного сигнала для имитации реальной системы управления и обеспечения защиты устройства регулирования при больших рассогласованиях.

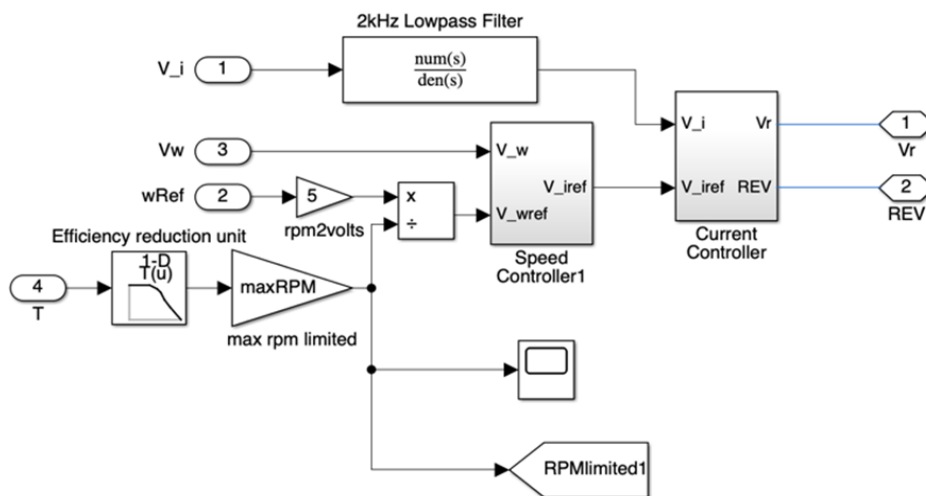


Рис. 3. Блок регуляторов скорости и напряжения

Внутренний контур регулирования тока якоря (см. рис. 5) построен по аналогичной структуре с пропорционально-интегральным регулятором, однако выходной сигнал регулятора подвергается дополнительной обработке: модуль напряжения ( $|u|$ ) поступает на ограничитель для формирования сигнала управления ШИМ, тогда как исходный сигнал проходит через пороговую функцию логики реверсирования  $f(u)$ , формируя сигнал реверса (REV) для активации логики изменения направления вращения.

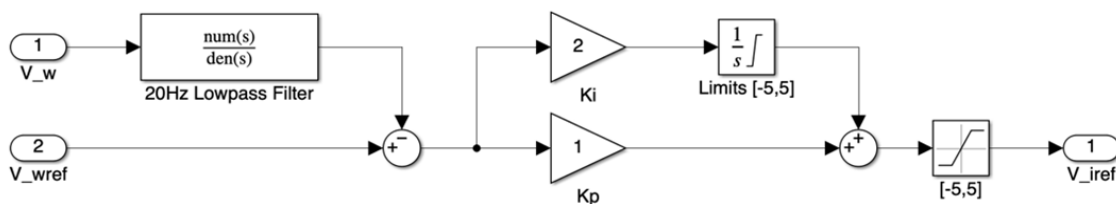


Рис. 4. Регулятор скорости

ШИМ-модулятор (PWM) реализует дискретное управление силовыми ключами с частотой коммутации, определяемой тактированием цифрового регулятора, причём нелинейность данного блока проявляется в квантовании по времени (период дискретизации 0,1-10 мс), квантовании по уровню (разрешающая способность таймера определяет минимальную длительность импульса) и мёртвом времени между переключениями комплементарных ключей, что приводит к фазовому запаздыванию в канале управления и может вызывать субгармонические колебания при неудачном выборе частоты дискретизации. Мостовая схема драйвера (H-Bridge) моделирует силовой каскад на MOSFET-транзисторах с учётом нелинейного падения напряжения на открытых ключах, времени переключения транзисторов, паразитных индуктивностей и ёмкостей, вызывающих выбросы напряжения при коммутации индуктивной нагрузки, что в совокупности формирует динамические потери и искажает форму напряжения на якоре двигателя [4].

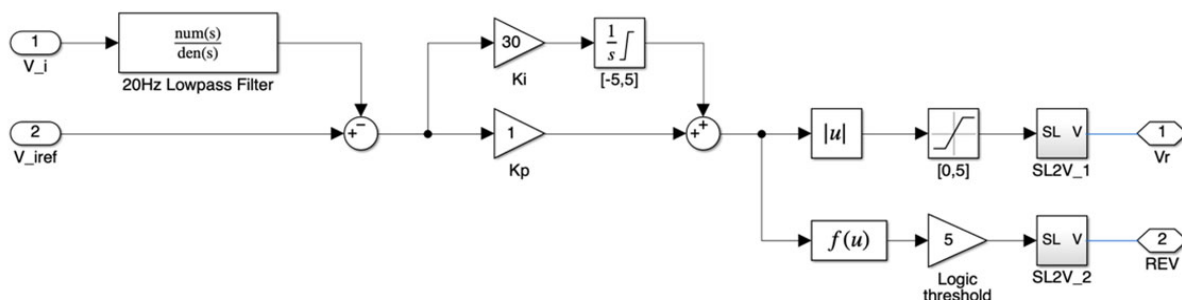


Рис. 5. Регулятор тока

Механическая передача, включающая редуктор (блок GearBox) и ворот (блок Lead Screw), учитывает нелинейности, обусловленные люфтами в зацеплении зубчатых колёс, упругими деформациями валов и нелинейным трением в резьбовой паре, что проявляется как механическое запаздывание и гистерезис в канале обратной связи по скорости и положению [5]. Нагрузка моделируется как внешнее возмущающее воздействие на механическую часть объекта управления с возможностью стохастической вариации, что может позволить оценить робастность системы управления в условиях динамически изменяющейся внешней среды.

На рис. 6 представлена подсистема датчика скорости вращения, представляющая собой многоуровневую систему измерения и преобразования механической координаты в электрический сигнал обратной связи, что принципиально отличает расширенную модель от классической, где используется идеализированный датчик с мгновенной передачей информации без задержек и погрешностей. На рис. 7 представлено сравнение переходных процессов скорости вращения электропривода для идеализированного и реального датчика скорости, где видно, как реальный датчик скорости расширенной модели учитывает дискретность измерений инкрементального энкодера, квантование сигнала по времени, а также эффект удержания значения на периоде квантования.

Входным сигналом подсистемы является угловая скорость вращения вала двигателя в радианах в секунду, которая поступает на вход преобразователя, осуществляющего масштабирование физической величины в частоту вращения в оборотах в минуту.

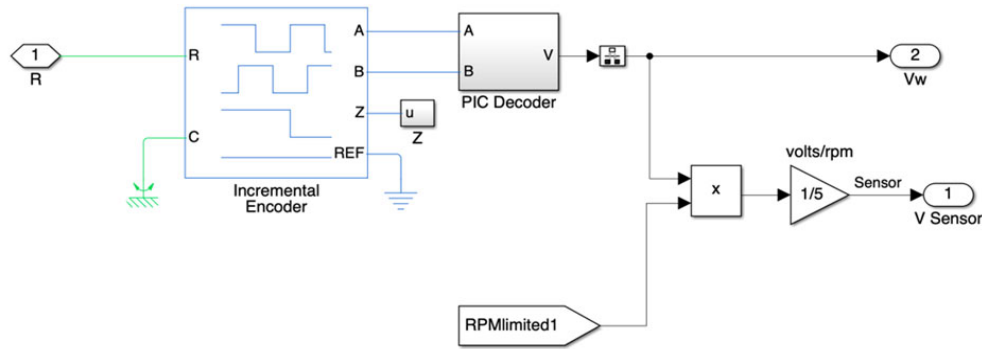
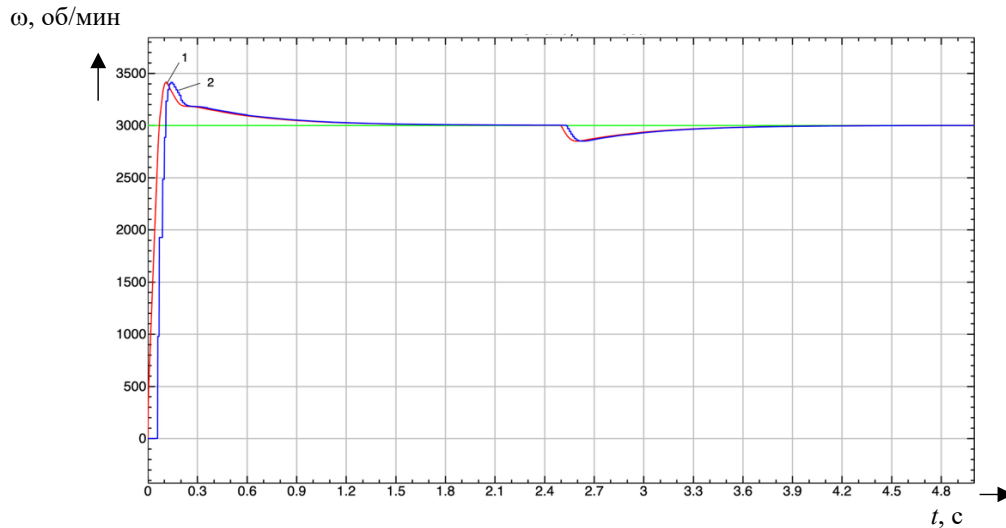


Рис. 6. Датчик скорости

В расширенной модели реализована схема измерения на основе квадратурного энкодера, формирующего импульсы двух каналов со сдвигом фазы на  $90^\circ$ , что позволяет определять как частоту вращения, так и направление вращения вала.



1 – идеализированный датчик; 2 – реальный датчик  
Рис. 7. Переходный процесс скорости вращения вала двигателя

Сигналы с выходов энкодера поступают на вход квадратурного декодера (PIC Decoder), изображённого на рис. 8. Он осуществляет определение частоты импульсов, пропорциональной скорости вращения, а также производит анализ фазового сдвига между каналами для формирования знака скорости и подсчёт общего количества импульсов для определения угла поворота вала.

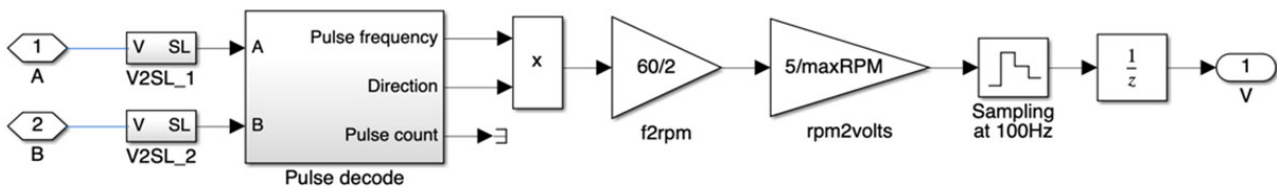
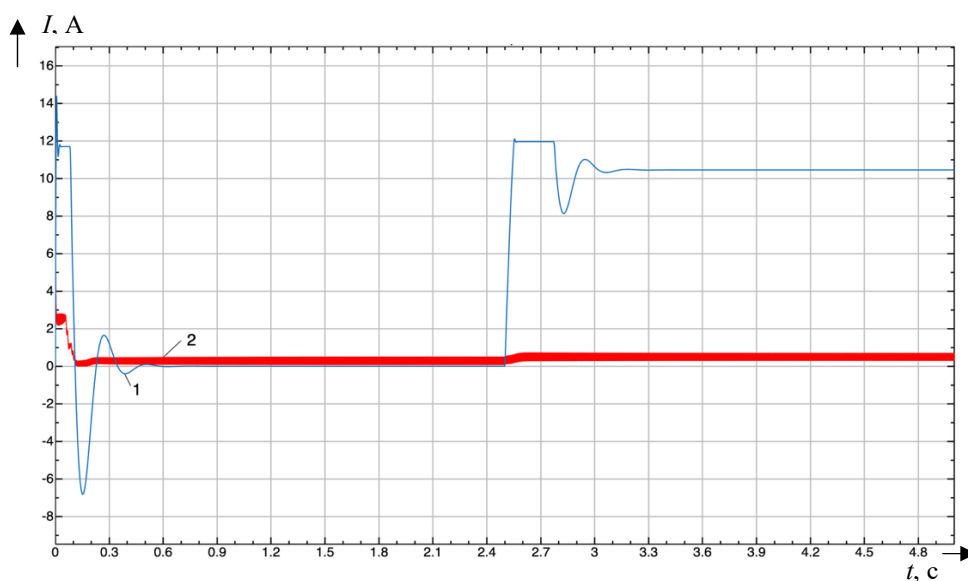


Рис. 8. Квадратурный декодер

Выходной сигнал декодера последовательно преобразуется блоками `f2rpm` и `rpm2volts`: первый переводит частоту импульсов в обороты в минуту с учётом разрешения энкодера, второй масштабирует полученное значение в напряжение обратной связи. Для моделирования цифрового характера измерений введены блок дискретизации, осуществляющий квантование сигнала с частотой 100 Гц, и блок дискретной задержки сигнала, имитирующий фиксацию значения на периоде квантования. Данные элементы вносят фазовое запаздывание и ограничивают быстродействие контура скорости. Совокупное влияние описанных нелинейностей и задержек обеспечивает более точное воспроизведение переходных процессов физического объекта [6].

**Анализ переходных процессов.** Анализ переходных процессов в системе управления электроприводом позволяет оценить соответствие моделей и их динамических характеристик реальной системе управления, что имеет принципиальное значение для проектирования систем управления мобильными роботизированными платформами [7].

После формирования ШИМ-сигнала управляющее воздействие поступает на вход драйвера, который преобразует дискретные импульсы ШИМ в напряжение якорной цепи двигателя, вызывая протекание тока якоря, динамика которого определяется электромагнитными процессами в якорной цепи и механическими характеристиками электропривода. На рис. 9 представлены переходные процессы тока якоря при пуске двигателя ( $t = 0$ ) и приложении возмущения по моменту нагрузки ( $t = 2,5$  с).

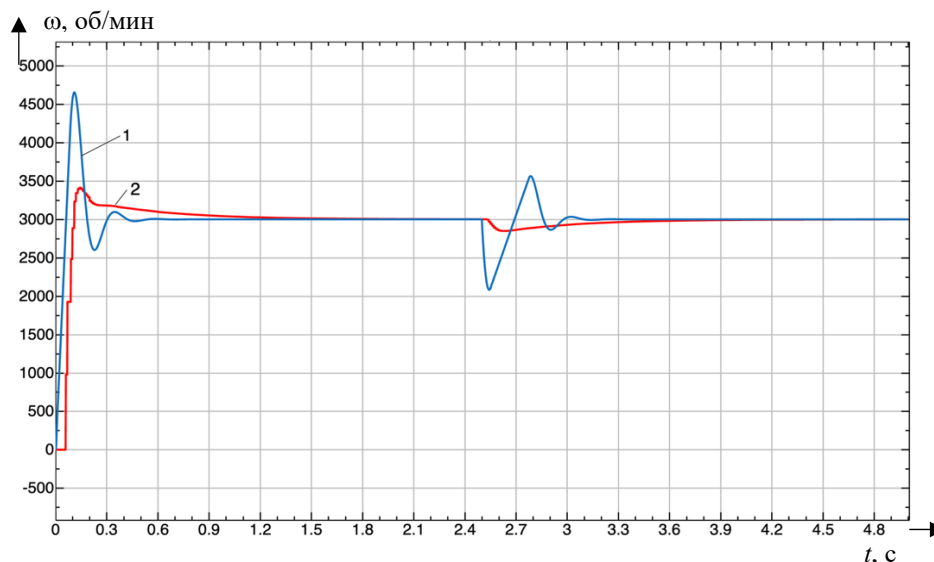


1 – классическая модель; 2 – расширенная модель

Рис. 9. Переходные процессы тока якоря электропривода постоянного тока

Качественное различие между характеристиками обусловлено принципиально разным подходом к моделированию системы подчинённого регулирования: классическая модель, построенная на основе идеализированных линейных передаточных функций, демонстрирует значительный бросок тока якоря в пусковой режим с последующими затухающими колебаниями и выходом на установившееся значение. В расширенной модели в пусковом режиме наблюдается незначительный бросок тока до 2-3 А с быстрым затуханием переходного процесса и выходом на установившееся значение. Такое поведение обусловлено наличием в модели алгоритмов ограничения тока, учётом нелинейностей ШИМ-модуляции и мостовой схемы преобразователя. При приложении возмущения по нагрузке в момент времени  $t = 2,5$  с классическая модель демонстрирует резкий скачок тока с последующим выходом на новый установившийся уровень, что свидетельствует о недостаточной жёсткости механической характеристики и отсутствии эффективной компенсации возмущений, тогда как расширенная модель практически не реагирует на возмущение благодаря

наличие адаптивного регулятора с изменяемыми коэффициентами усиления в зависимости от режима работы [8]. Соответствующие переходные процессы скорости вращения двигателя представлены на рис. 10.



1 – классическая модель; 2 – расширенная модель

Рис. 10. Переходные процессы скорости вращения двигателя постоянного тока

Характер разгона скорости напрямую коррелирует с динамикой тока. В классической модели наблюдаемый значительный скачок тока якоря в начальный момент времени обуславливает форсированный разгон двигателя, превышающий физические возможности механической передачи. Отсутствие в модели нелинейных ограничений и демпфирующих факторов приводит к значительному перерегулированию по скорости и возникновению колебаний вокруг установившегося значения, что свидетельствует о недостаточном запасе устойчивости замкнутой системы при работе в режимах, близких к предельным. При приложении ступенчатого возмущения по моменту нагрузки ( $t = 2,5$  с) линейный регулятор не способен оперативно компенсировать изменение условий работы, что проявляется в глубокой просадке скорости и затяжном процессе восстановления равновесия из-за фиксированных коэффициентов усиления, не адаптированных к изменению параметров объекта [9].

Расширенная модель демонстрирует переходный процесс с выраженным дискретным характером, что обусловлено цифровым способом формирования управляющего воздействия. Несмотря на наличие дискретных эффектов, расширенная модель демонстрирует апериодический характер переходного процесса. Алгоритм ограничения тока формирует оптимальную динамику разгона, предотвращая механические удары и исключая перерегулирование благодаря учёту момента инерции и нелинейностей трения. Наличие зоны нечувствительности и адаптивного регулирования обеспечивает высокую жёсткость механической характеристики: при возмущении нагрузки система сохраняет заданную траекторию движения с минимальной динамической ошибкой и быстрым временем восстановления [10].

**Заключение.** Результаты имитационного моделирования свидетельствуют о том, что классическая модель электропривода на базе электродвигателя постоянного тока не обеспечивает достаточной точности переходных процессов при проектировании систем управления для роботизированных платформ. Выявлено, что идеализирование системы управления и её упрощение ввиду игнорирования физических ограничений, нелинейных особенностей объекта управления и динамических задержек приводит к существенным расхождениям между моделируемыми и реальными переходными процессами. Это может стать причиной неустойчивости системы управления или снижения качества управления в реальных условиях эксплуатации.

Расширенная имитационная модель, учитывающая комплекс нелинейностей силовой части, механической составляющей и цифрового контура управления, обеспечивает более высокую точность воспроизведения динамики реального объекта и системы управления. Применение такого подхода позволяет более корректно синтезировать и настроить регуляторы, способные обеспечить робастность системы к внешним возмущениям и внутренним нелинейностям.

Таким образом, интеграция нелинейных элементов и временных задержек в модель электропривода является необходимым условием для обеспечения соответствия симуляционных данных реальному поведению робототехнической системы. Такой подход к моделированию процессов снижает риски некорректной настройки систем управления при переходе от этапа виртуального прототипирования к практической реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черепанов, Н. И. Система подчинённого регулирования электроприводом на базе двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением / Н. И. Черепанов, В. А. Соловьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VII Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2024. – С. 315-317.
2. Гайдук, А. Р. Методы синтеза нелинейных систем управления (квазилинейный подход): учеб. пособие для вузов / А. Р. Гайдук. – СПб.: Лань, 2025. – 288 с.
3. 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.
4. Ляпин, В. В. Влияние нестабильности напряжения питающей сети на работу зарядных станций электромобилей / В. В. Ляпин, Б. Д. Табаров, В. А. Соловьев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2025. – С. 242-245.
5. Савельев, Д. О. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления / Д. О. Савельев, С. П. Черный, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 3. – С. 213-221.
6. Савельев, Д. О. Влияние нелинейных элементов необитаемого подводного аппарата на показатели его управления / Д. О. Савельев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф., посвящённой 70-летию со дня образования Комсомольского-на-Амуре государственного университета, Комсомольск-на-Амуре, 07-08 октября 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2025. – С. 306-308.
7. Savelyev, D. O. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (Automatic Control System) elements / D. O. Savelyev, A. S. Gudim, D. B. Solovev // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019, Vladivostok, 01-02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725324. – DOI 10.1109/Eastconf.2019.8725324.
8. Савельев, Д. О. Особенности компенсации неоднозначных сопутствующих нелинейностей с использованием нечёткого подхода / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, С. П. Черный // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4 (42). – С. 149-158.
9. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements. Savelyev D. O., Gudim A. S., Solovev D. B. // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. 2019. P. 8725324.
10. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.

**Магола Д. С.**  
**D. S. Magola**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ НА ОСНОВЕ БИОИНСПИРИРОВАННОГО АГЕНТНОГО ПОДХОДА**

**MODELING OF AN ADAPTIVE SENSORY SYSTEM FOR ANOMALY DETECTION BASED ON A BIOINSPIRED AGENT-BASED APPROACH**

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

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

**Аннотация.** Для задач информационной безопасности предложена модель системы обнаружения аномалий SpiderWeb Security System (SWSS), в основе которой лежит биоинспирированный принцип функционирования паутины как распределённой сенсорной системы с адаптивно функционирующими в ней автономными агентами. В модели компьютерная сеть представляется в виде адаптивного графа, где вершины – хосты, а связи – сетевые взаимодействия. В основе лежат вдохновлённый природой механизм «вибрации паутины», распространяющий по компьютерной сети сигналы угроз, и агенты – «пауки», осуществляющие исследование аномалий, подтверждающие угрозы и инициирующие реагирование на них. Данный подход позволяет не только обнаруживать многоэтапные целенаправленные атаки, но и прогнозировать их следующие этапы за счёт проверки гипотез о возможных векторах реализации угрозы на основе корреляций связей в графе сенсорной системы. Представлены результаты моделирования на основе синтетических данных, и рассматриваются перспективы дальнейшего улучшения предложенного подхода.

**Summary.** For information security tasks, a model of an anomaly detection system, SpiderWeb Security System (SWSS), is proposed. Its core is based on the bio-inspired principle of a spiderweb's functioning as a distributed sensory system with adaptively operating autonomous agents within it. In the model, a computer network is represented as an adaptive graph, where vertices are hosts and edges are network interactions. The foundation consists of a nature-inspired «web vibration» mechanism that propagates threat signals throughout the computer network, and agent-«spiders» that conduct anomaly investigation, confirm threats, and initiate responses to them. This approach allows not only for the detection of multi-stage targeted attacks but also for the prediction of their subsequent stages by testing hypotheses about potential threat realization vectors based on correlations of connections within the graph of the sensory system. The results of modeling based on synthetic data are presented, and prospects for further improvement of the proposed approach are considered.

**Ключевые слова:** обнаружение аномалий, информационная безопасность, адаптивная сенсорная система, биоинспирированные алгоритмы, распределённые агенты, прогнозирование атак, графовые модели сетей.

**Key words:** anomaly detection, information security, adaptive sensory system, bio-inspired algorithms, distributed agents, attack prediction, network graph models.

УДК 519.711.3

**Введение.** Актуальные сегодня угрозы в области информационной безопасности, в том числе многоэтапные целевые атаки, характеризуются длительным периодом скрытого присутствия, использованием легитимных в системе инструментов и сложностью этапов деструктивных действий. Классические системы обнаружения вторжений (IDS), использующие сигнатуры и статические правила, оказываются неэффективными против подобных атак в связи с их полиморфизмом и способностью обходить известные шаблоны.

Альтернативой могут являться системы, основанные на анализе поведения (UEBA) и аномалий, однако они часто страдают от высокого уровня ложных срабатываний и требуют сложной настройки базовых профилей. Также активно развиваются биоинспирированные подходы в ин-

формационной безопасности, заимствующие принципы из природы: генетические алгоритмы, нейронные сети, иммунные системы, поведение муравьиных колоний [1–3; 6–9; 11–12]. Некоторые системы используют в своей основе принципы нечёткой логики [3; 10–11]. Часть работ направлена на анализ сетевых атак как одного из классов телекоммуникационных рядов и использование вейвлет-фрактального подхода [5–6]. Однако они преимущественно имеют целевой вектор на оптимизацию правил или классификацию событий и не используются для моделирования динамического распространения угрозы в сетевой компьютерной среде.

Биоинспирированные алгоритмы, используемые в задачах информационной безопасности, можно разделить на несколько семейств [4; 6–12]:

- генетические алгоритмы (GA) применяются для оптимизации правил фильтрации, генерации сигнатур и выбора признаков. Они хорошо работают в глобальном поиске, но они слабо адаптируются к быстрым изменениям в сетевом трафике и не моделируют распространение угроз;
- иммунные системы (AIS) заимствуют принципы распознавания «своего» и «чужого». Но зачастую они требуют длительного периода обучения и неявно предполагают стационарность «нормального» состояния;
- муравьиные алгоритмы (ACO) используются для оптимизации маршрутизации и обнаружения аномалий на основе феромонов. Используют опосредованную коммуникацию через среду, но сфокусированы на оптимизации путей в графе;
- роевой интеллект применяется в распределённых IDS, но обычно ограничивается согласованием решений между однородными агентами без глубокого моделирования сетевого контекста.

В данной работе представлен подход, вдохновлённый способностью паутины служить распределённым сенсором и названный автором SpiderWeb Security System (SWSS). Паутина не просто ловит и удерживает добычу, но и передаёт вибрации, позволяя пауку локализовать источник и определить его характер. SWSS трансформирует компьютерную сеть в адаптивную «паутину», где аномальная активность создаёт «вибрации», привлекающие «пауков»-агентов для расследования, а адаптивность заключается в перестройке сетевой топологии на основе корреляции наблюдаемых событий.

Целью данной работы является разработка модели, способной быстро адаптироваться к изменениям сетевого трафика, оценивать контекст сетевой активности, прогнозировать новые этапы реализации атак и на этой основе изменять стратегию поведения системы безопасности.

**Математическое моделирование.** Пусть компьютерная сеть представлена в виде ориентированного графа  $G = (V, Q)$ , где  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – узлы сети (хосты, серверы, сетевое оборудование и т. д.),  $Q \subseteq V \times V$  – множество всех возможных сетевых соединений, или множество рёбер графа.

Каждому узлу  $v_i$  в момент времени  $t$  сопоставим уровень вибрации  $\phi_i(t) \in [0,1]$ , отражающей степень принадлежности активности узла к подозрительной. Для каждого ребра  $e_{ij}$  есть вес  $w_{ij}(t) \in [0,1]$  для фиксации силы и актуальности связи.

Моделирование распространения угрозы сводится к моделированию вибрации узла сети, которая зависит от текущего состояния, появления нового события и состояния связанных узлов. Вибрация узла обновляется при поступлении события безопасности  $\varepsilon$  с оценкой угрозы  $\theta(\varepsilon) \in [0,1]$ :

$$\phi_i(t+1) = \min \left( 1, \alpha \times \phi_i(t) + \beta \times \theta(\varepsilon) + \gamma \times \sum_{k \in N(i)} \frac{w_{ik}(t) \times \phi_k(t)}{|N(i)|} \right),$$

где  $\alpha \in [0,1]$  – коэффициент затухания вибрации;  $\beta \in [0,1]$  – вес нового события;  $\gamma \in [0,1]$  – коэффициент влияния соседей;  $N(i)$  – множество соседей узла  $v_i$ .

Пусть  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  – множество агентов,  $m \ll n$ . Каждый  $a_k$  характеризуется следующими свойствами:

- текущей позицией  $p_k(t) \in V$ ;

- состоянием  $s_k(t) \in \{Exp, Inv, Rem, Rep\}$ ;
- внутренним таймером  $\tau_k(t)$  для состояний  $\{Inv, Rem, Rep\}$ .

Возможные состояния агента:

- *Exp* – состояние исследования, при котором агент патрулирует сеть в поисках аномалий;
- *Inv* – состояние расследования, при котором агент углублённо анализирует подозрительный узел с высокой вибрацией;
- *Rem* – состояние нейтрализации подтверждённой угрозы;
- *Rep* – состояние подготовки отчёта о завершённой нейтрализации.

Переходы между состояниями определяются следующими условиями:

$$s_k(t+1) = \begin{cases} Inv, & \text{если } s_k(t) = Exp \text{ и } \Phi_{p_k}(t) > \theta_{inv} \\ Rem, & \text{если } s_k(t) = Inv \text{ и } \tau_k^{inv} = 0 \\ Rep, & \text{если } s_k(t) = Rem \text{ и } \tau_k^{rem} = 0 \\ Exp, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

где  $\theta_{inv}$  – порог вибрации для начала расследования (по умолчанию 0,5).

В состоянии исследования *Exp* агент перемещается к узлу  $v_j$ , максимизирующему целевую функцию:

$$F(v_j) = \Phi_j(t) \times w_{p_k j}(t) - \mu \times d(p_k, v_j) - \sigma \times R(H_k, v_j),$$

где  $\mu$  – коэффициент регуляризации, определяющий выбор между реакцией на удалённые угрозы и исследование локального окружения;  $d(p_k, v_j)$  – топологическое расстояние между узлами в сети;  $\sigma$  – коэффициент регуляризации за недавние посещения узла;  $R(H_k, v_j)$  – штраф за недавние посещения узла,

$$R(H_k, v_j) = \sum_{\tau \in H_k} \exp(-\lambda \times (t - \tau)) \times I_{v_j}(\tau),$$

здесь  $H_k$  – история посещения агента;  $\lambda$  – коэффициент затухания памяти;  $I_{v_j}(\tau)$  – индикатор посещения узла  $v_j$  в момент времени  $\tau$ .

В целом член  $\Phi_j(t) \times w_{p_k j}(t)$  оценивает уровень угрозы, член  $-\mu \times dist(p_k, v_j)$  штрафует за перемещение к чрезмерно удалённым целям, а член  $-\sigma \times R(H_k, v_j)$  штрафует за посещение уже обследованных ранее узлов.

В состоянии расследования *Inv* агент проверяет условие

$$\frac{1}{T_{inv}} \sum_{\tau}^t \Phi_i(\tau) > \theta_{inv},$$

где  $T_{inv}$  – период расследования. Если условие выполняется, т. е. если средний уровень вибрации за период расследования превышает порог, то агент принимает решение о наличии аномалии и переходит в состояние нейтрализации угроз, в противном случае агент принимает решение о ложном срабатывании и переходит в состояние *Exp*.

Во время расследования анализирует последние  $N$  событий узла для взвешенной оценки угроз:

$$\theta_i(t) = \frac{\sum_{l=1}^N \theta(e_l) \times \exp(-\lambda \times (t - t_l))}{\sum_{l=1}^N \exp(-\lambda \times (t - t_l))},$$

где  $\{e_1, e_2, \dots, e_N\}$  – история событий узла, каждое из которых имеет уровень угрозы  $\theta(e_l)$ .

В состоянии нейтрализации угрозы *Rem* по факту исключения/минимизации риска агент снижает уровень вибрации и угрозы:

$$\Phi_i(t+1) = \Phi_i(t) \times (1 - \eta_{rem}),$$

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) \times (1 - \eta_{rem}/2),$$

где  $\eta_{rem}$  – коэффициент снижения уровня вибрации/угрозы.

Модель адаптивно реконфигурирует веса рёбер в графе сети в зависимости от активностей на них:

$$w_{ij}(t + 1) = \min\left(1, w_{ij}(t) + \delta \times \phi_i(t) \times \phi_j(t) - \zeta \times (t - t_{ij}^{last})\right),$$

где  $\delta$  – коэффициент усиления активности;  $\zeta$  – коэффициент старения связи;  $t_{ij}^{last}$  – время последней активности на ребре.

При обнаружении инфицированных узлов система строит гипотезы о возможных векторах атак. Для этого определяется вероятность создания новых рёбер, реализующих атаку:

$$P_{ij}^{pred}(t) = \frac{\phi_i(t) \times \phi_j(t)}{\sum_{k \neq i} \phi_k(t)} \times \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2\rho_d^2}\right),$$

где  $\frac{\phi_i(t) \times \phi_j(t)}{\sum_{k \neq i} \phi_k(t)}$  – фактор угрозы и уязвимости цели, определяющий вероятность атаки по направлению в зависимости от уровня угрозы источника  $\phi_i(t)$  и подозрительности целевого узла  $\phi_j(t)$ ;  $\exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2\rho_d^2}\right)$  – фактор геометрической близости, снижающий вероятность связи с удалёнными узлами;  $d_{ij}$  – расстояние между узлами;  $\rho_d$  – параметр пространственного масштаба, определяющий влияние на вероятность связи в зависимости от расстояния. Если  $P_{ij}^{pred}(t) > \theta_{pred}$ , то принимается решение о создании в графе ребра следующего этапа атаки с начальным небольшим (например, 0.1) весом  $w_{ij}^{pred}(t)$ . Если между узлами действительно начинается активность, то связь усиливается:

$$w_{ij}^{pred}(t + 1) = w_{ij}^{pred}(t) + \Delta w \times \phi_i(t) \times \phi_j(t).$$

**Результаты моделирования.** Для проверки работоспособности модели SWSS была разработана имитационная среда на языке Python [13] с графическим интерфейсом. Моделирование проводилось на синтетических данных, сформированных генератором событий, способным создавать нормальное состояние среды и многоэтапные целевые атаки, включая разведку, первоначальное проникновение, латеральное перемещение и эксфильтрацию данных. Визуализация модели представляет компьютерную сеть в виде адаптивного графа, где узлы (хосты) отображаются в виде цветных кругов, а рёбра (сетевые соединения) – в виде линий различной толщины и цвета в зависимости от уровня угрозы. Агенты-«пауки» изображаются геометрическими фигурами (3-, 6- и 8-угольниками), цвет которых соответствует их текущему состоянию: исследование, расследование, нейтрализация угрозы, отчёт. Некоторые экранные формы разработанной системы представлены на рис. 1-6.

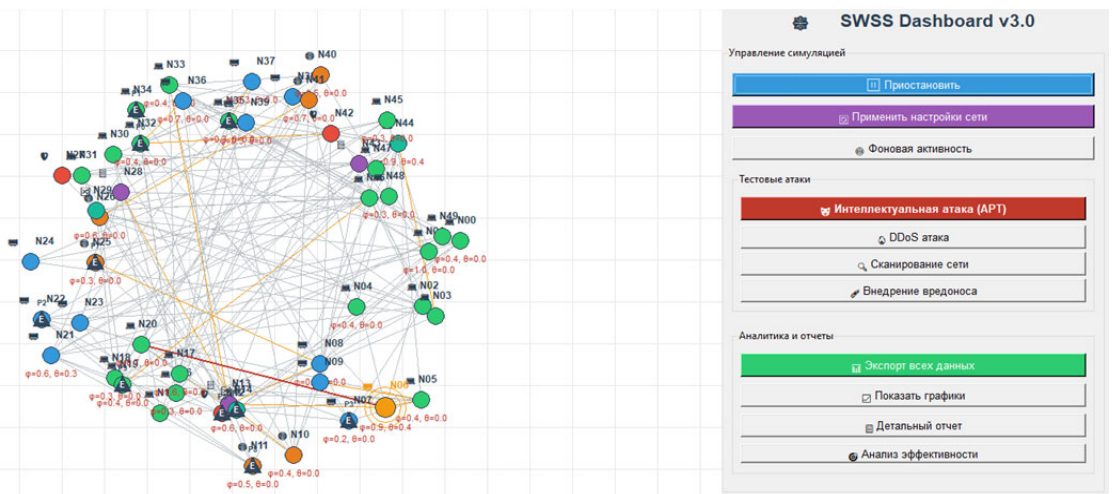


Рис. 1. Работа системы в фоновом режиме

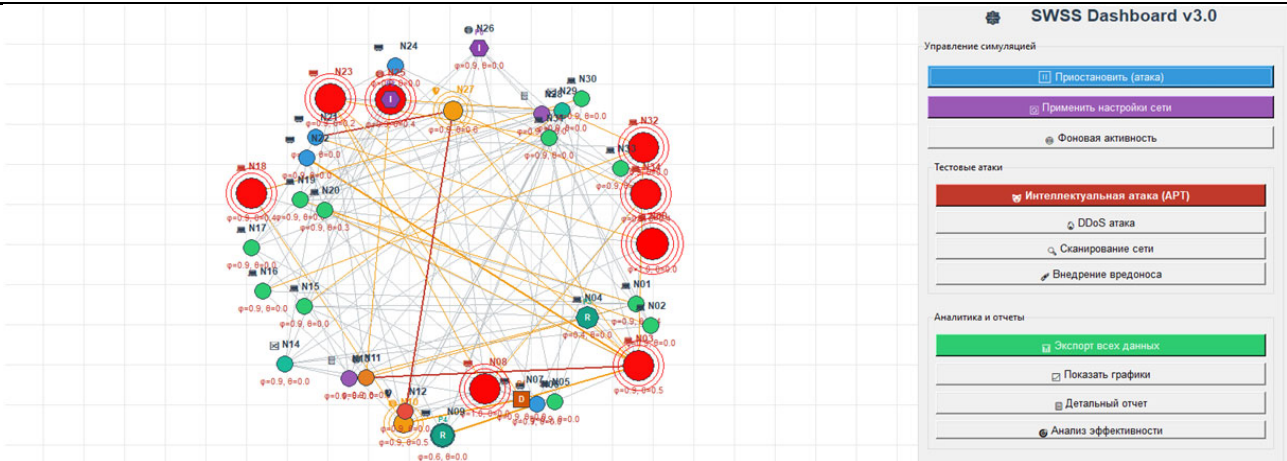


Рис. 2. Работа системы при реализации многоэтапной атаки (50 узлов, 10 агентов)

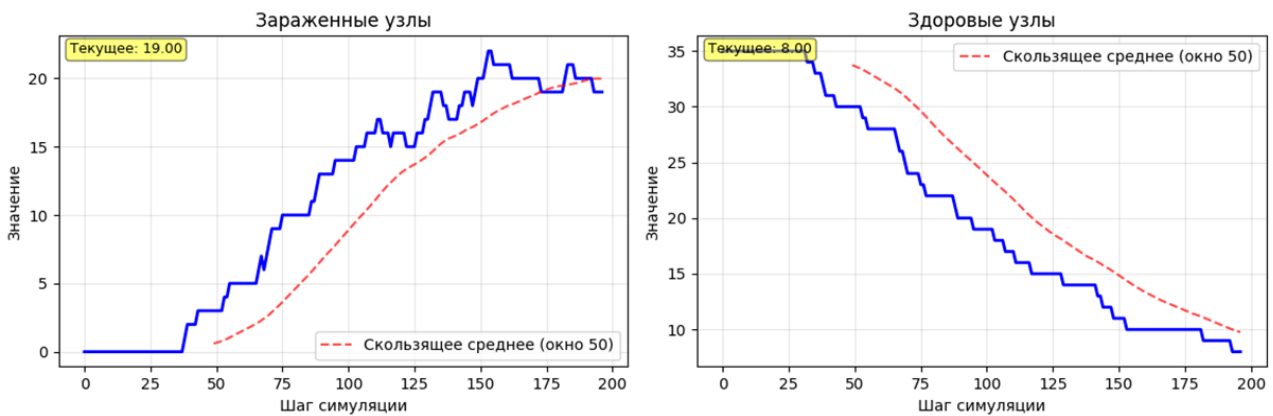


Рис. 3. Графики изменения заражённых и здоровых узлов на 200-м шаге симуляции

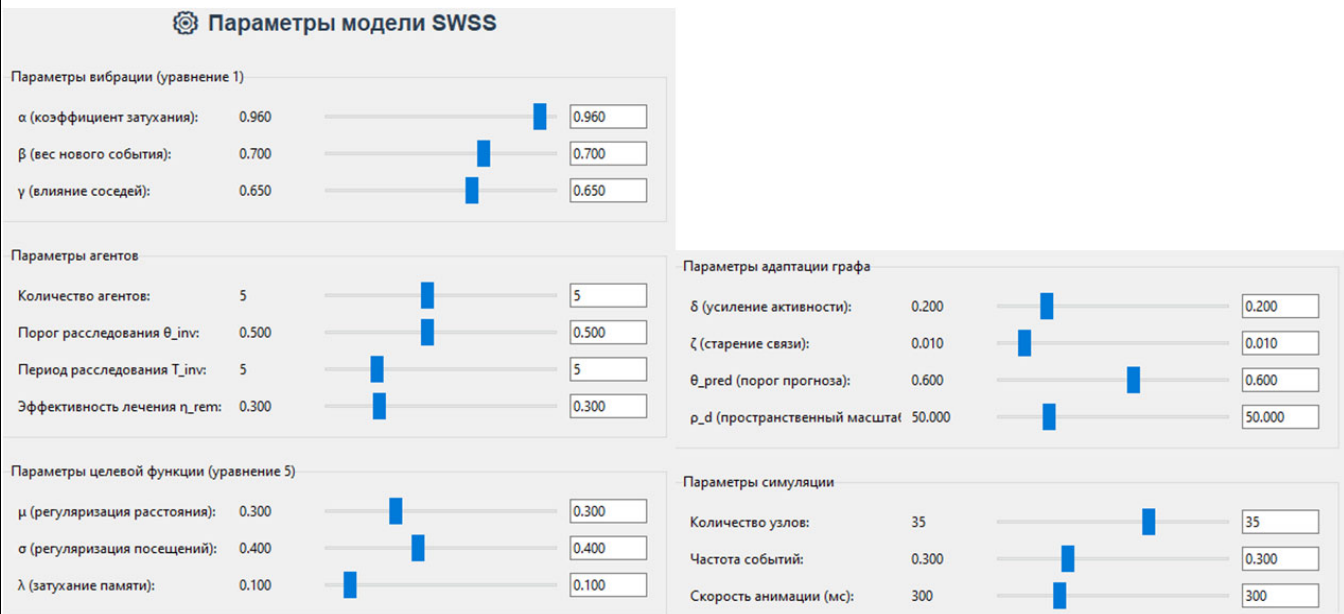


Рис. 4. Параметры для настройки SWSS

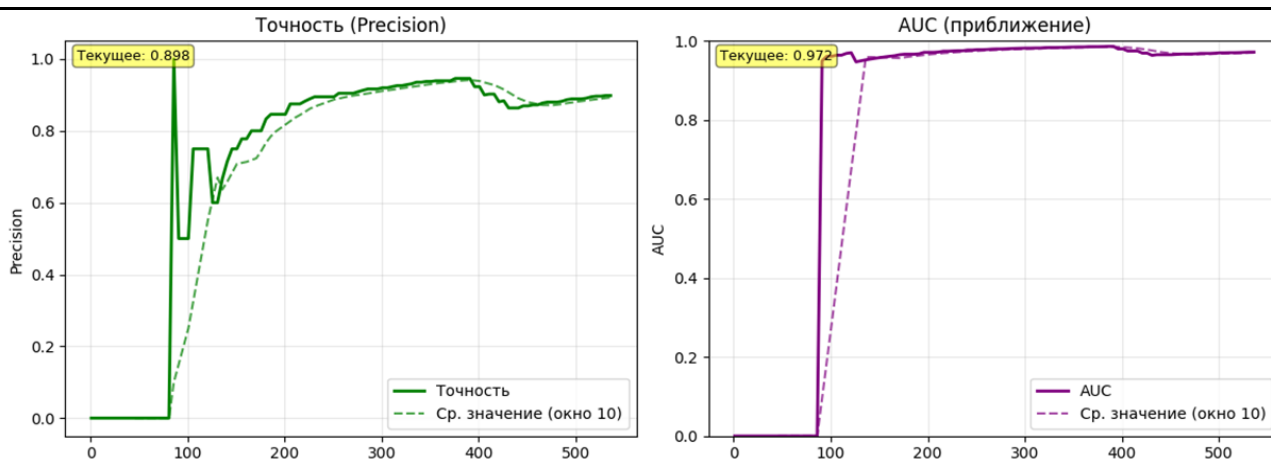


Рис. 5. График изменения точности и AUC за 500 шагов симуляции

Имитационное моделирование показало, что на синтетических данных в различных комбинациях размера сети и количества агентов достигается точность не менее 80 %, AUC – не менее 0.9, F1-Score – не менее 0.9, ложные срабатывания – не более 10 %.

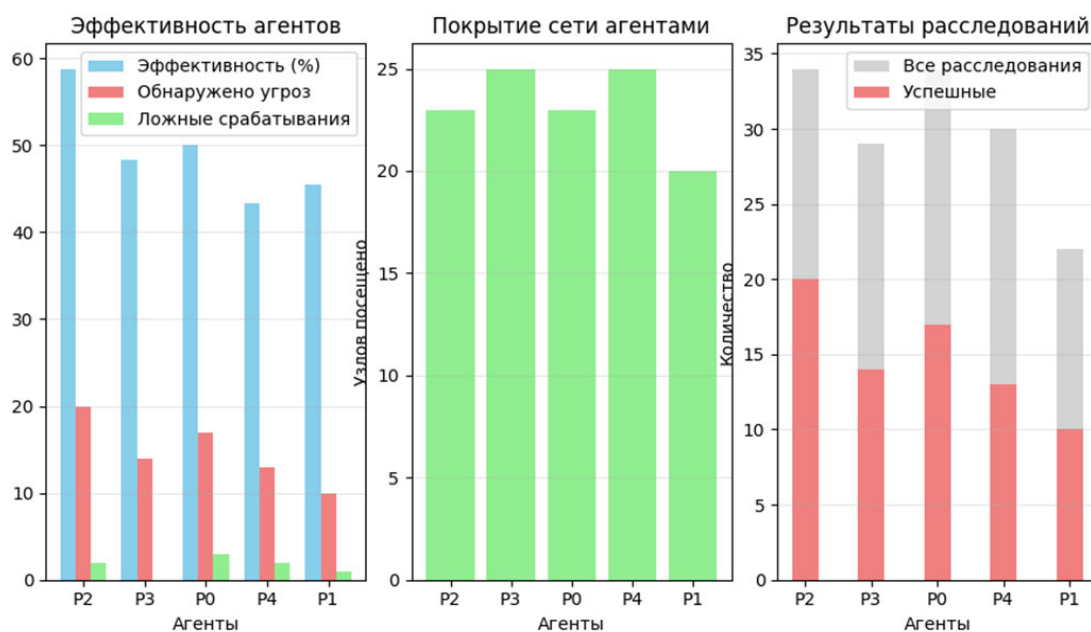


Рис. 6. Анализ работы агентов

Основные эффекты разработанной имитационной среды:

- *Распространение вибрации*: при возникновении подозрительного события на одном из узлов его уровень вибрации повышается. Через соединения вибрация передаётся соседним узлам с коэффициентом затухания, что позволяет системе быстро реагировать на распространение угрозы в сетях.
- *Адаптивное поведение агентов*: агенты перемещаются к узлам с наибольшим уровнем вибрации, учитывая при этом силу связи и историю своих посещений. Это позволяет избегать избыточного внимания к уже проверенным узлам и эффективно распределять ресурсы системы.
- *Прогнозирование следующих этапов атаки*: при обнаружении заражённых узлов система строит гипотезы о возможных векторах атаки и создаёт в графе «прогнозируемые» связи (отобра-

жаемые пунктиром), которые в случае реальной активности усиливаются и становятся полноправными элементами мониторинга.

– *Динамическая адаптация графа*: веса рёбер обновляются в зависимости от активности на них, а устаревшие или неактивные связи со временем исчезают. Это позволяет модели отражать изменения в сетевой топологии и поведении атакующих.

Таким образом, разработанная модель SWSS позволяет обнаруживать и учитывать не только отдельные события, но и их взаимосвязи в графе и имеет возможность предсказывать следующие шаги атаки на основе корреляции событий и топологии. При этом система имеет потенциал для использования в распределённой среде, поскольку агенты функционируют автономно и взаимодействуют только через общий граф сети. В табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа модели SWSS с существующими подходами.

Таблица 1

Сравнительный анализ модели SWSS с существующими системами

Критерий	Сигна- турные IDS	Поведенче- ские систе- мы UEBA	Биоинспирированные алгоритмы (GA, ACO, AIS)	SWSS
Обнаружение неизвестных угроз	Нет	Да	Частично	Да
Учёт сетевого контекста	Нет	Ограничено	Нет	Да
Прогнозирование этапов атаки	Нет	Нет	Нет	Да
Адаптивность к изменениям сети	Нет	Да (требуется переобу- чение)	Да (но требует допол- нительного времени)	Да
Уровень ложных срабатываний	Низкий	Высокий	Средний	Средний
Масштабируемость	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая
Интерпретируемость решений	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая

Следует отметить, что модель имеет ряд ограничений:

- в условиях реального сетевого трафика и высокого сетевого шума требуется дополнительная фильтрация событий;
- вычислительная сложность: при большом количестве узлов и связей расчёт вибрации и поведения агентов может требовать оптимизации;
- настройка параметров: коэффициенты затухания, пороги срабатывания и весовые коэффициенты требуют тонкой настройки под конкретную сетевую среду.

**Заключение.** В работе предложена биоинспирированная модель адаптивной сенсорной системы обнаружения аномалий SWSS, основанная на метафоре паутины как сенсорной системы и автономных агентов-«пауков». Модель позволяет не только обнаруживать сложные многоэтапные атаки, но и прогнозировать их развитие, адаптивно изменяя топологию мониторинга.

Перспектива дальнейших исследований включает:

- дополнительную фильтрацию событий на основе вейвлет- и фрактального подходов;
- машинное обучение для настройки параметров: использование методов оптимизации для автоматического подбора коэффициентов модели;
- расширение типов анализируемых событий: включение в модель данных от систем EDR, журналов аутентификации, DNS-запросов и др.;
- развёртывание системы в тестовой среде с горизонтальным масштабированием и интеграцию с реальными системами безопасности: подключение модели к потокам сетевых логов и событиям систем мониторинга информационной безопасности.

Считаем, что предложенный подход при его развитии имеет возможности для создания гибких, адаптивных и прогностических систем информационной безопасности, способных противостоять современным сложным угрозам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cui Z., Chen W., Chen Y. Multi-Scale Convolutional Neural Networks for Time Series Classification. arXiv:1603.06995v4 [cs.CV] 11 May 2016.
2. Dorigo, M., Birattari, M., Stutzle, T. Ant colony optimization // IEEE Computational Intelligence Magazine. – 2006. – Vol. 1, No. 4. – P. 28-39. doi: 10.1109/MCI.2006.329691.
3. Dotcenko, S., Vladyko, A. and Letenko, I. A fuzzy logic-based information security management for software-defined networks, 16th International Conference on Advanced Communication Technology, Pyeongchang, 2014, pp. 167-171. doi: 10.1109/ICACT.2014.6778942.
4. Hamamoto, A. H., Carvalho, L. F. and Proenca, M. L. ACO and GA metaheuristics for anomaly detection, 2015 34th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC), Santiago, 2015, p. 1-6. doi: 10.1109/SCCC.2015.7416569.
5. Амосов, О. С. Фрактальный и вейвлет-анализ телекоммуникационных рядов информационной системы / О. С. Амосов, Д. С. Магола, Н. В. Муллер // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 28-36.
6. Амосов, О. С. Сетевая классификация атак в задачах информационной безопасности на основе интеллектуальных технологий, фрактального и вейвлет-анализа / О. С. Амосов, Д. С. Магола, С. Г. Баена // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № IV-1 (32). – С. 19-29.
7. Классификация сетевых атак на основе глубоких нейронных сетей с 1D-свёрточными и рекуррентными слоями / О. С. Амосов, Д. С. Магола, Ф. Ф. Пашенко, С. Г. Амосова // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17-20 июня 2019. – М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 2091-2095.
8. Солодовников, И. В. Использование нейронных сетей для защиты информации / И. В. Солодовников, В. И. Солодовников, В. И. Анисимов. – Отчёт Инвент. Номер: 02200954561. – Центр информационных технологий в проектировании РАН, 2009.
9. Комар, М. П. Нейросетевой метод идентификации компьютерных атак / М. П. Комар // Оптико-электронные информационно-энергетические технологии. – 2010. – № 2. – С. 105-109.
10. Корченко, А. Г. Построение систем защиты информации на нечётких множествах. Теория и практические решения / А. Г. Корченко. – К.: «МК-Пресс», 2006. – 320 с.
11. Круглов, В. В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
12. Марков, Р. А. Исследование нейросетевых технологий для выявления инцидентов информационной безопасности / Р. А. Марков, В. В. Бухтояров, А. М. Попов // Молодой учёный. – 2015. – № 23. – С. 55-60.
13. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.



Хряпенко К. Д., Григорьева А. Л.  
K. D. Khryapenko, A. L. Grigorieva

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ПЛАСТИНАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ РАСТЯЖЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**PREDICTION OF THE PROBABILITY OF CRACK FORMATION IN PLATES OF VARIOUS METALS UNDER LONGITUDINAL TENSION USING NEURAL NETWORKS**

**Хряпенко Ксения Дмитриевна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vicarious024@mail.ru.

**Ksenia D. Khryapenko** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vicarious024@mail.ru.

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

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

**Аннотация.** В статье рассматриваются актуальная проблема моделирования трещинообразования в материалах и возможности её решения с использованием методов искусственного интеллекта. Формулируется задача разработки эффективного информационного модуля для прогнозирования поведения материалов при нагрузке с учётом таких предикторов, как тип материала, наличие дефектов и величины приложенной силы. При помощи имитационной среды MSC.Patran генерируется набор входных данных для обучения интеллектуальной модели. Предложена модель для реализации решения задач классификации и регрессии, которая определяет наличие трещин и оценивает вероятность их появления. Производится оценка эффективности интеллектуального модуля, использующего классические методы механики разрушения и современные технологии искусственного интеллекта.

**Summary.** The article discusses the current problem of modeling crack formation in materials and the possibility of solving it using artificial intelligence methods. The objective is to develop an effective information module for predicting material behavior under load, taking into account predictors such as material type, the presence of defects, and the magnitude of the applied force. Using the MSC.Patran simulation environment, a set of input data is generated for training the intelligent model. A model is developed for solving classification and regression problems that detect the presence of cracks and estimate their probability. The effectiveness of the intelligent module, which utilizes classical fracture mechanics methods and modern artificial intelligence technologies, is assessed.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, нейронные сети, механика твёрдого тела, растяжение материала, трещинообразование.

**Key words:** artificial intelligence, neural networks, solid mechanics, material stretching, crack formation.

УДК 51-7

**Введение.** Прогнозирование поведения конструкционных материалов под действием внешних нагрузок – одна из ключевых задач в современном инженерном анализе. Критичным аспектом является моделирование процессов трещинообразования, поскольку даже микроскопические дефекты могут привести к разрушению конструкций. Традиционные подходы, основанные на аналитических и численных методах механики разрушения, хотя и обладают физической обоснованностью, зачастую требуют значительных вычислительных ресурсов и времени, что ограничивает их применение в задачах, требующих оперативного анализа [1; 2].

В последние годы методы машинного обучения (МО) и искусственного интеллекта (ИИ) демонстрируют растущий потенциал в области материаловедения и механики твёрдого тела. Благодаря способности выявлять сложные нелинейные зависимости в больших массивах данных нейронные сети позволяют строить эффективные прогностические модели даже при неполном понимании физических механизмов, а именно обучаются аппроксимировать сложные зависимости между входными и выходными данными. Обзор литературы показывает, что недостаточно исследований, посвящённых применению ИИ именно к задачам трещинообразования, особенно в условиях дефицита открытых и достоверных данных [3].

В настоящей работе представлен информационный модуль, основанный на методах машинного обучения и способный оперативно оценивать риск образования трещин в материалах при заданных условиях. В качестве входных параметров рассматриваются тип материала, наличие дефектов (отверстий) и величина приложенной нагрузки. Целью исследования является разработка программного инструмента, который использует методы машинного обучения для быстрого прогнозирования риска образования трещин в материалах, сохраняя при этом физическую достоверность, основанную на принципах механики разрушения.

**Формирование набора данных.** В имитационной среде моделирования MSC.Patran был собран набор данных нагруженных пластин (см. рис. 1 и 2), различающийся по типу материала (алюминий и сталь), наличию дефектов (отверстие) и величине приложенной силы в равных пропорциях для точной бинарной классификации [4; 5].

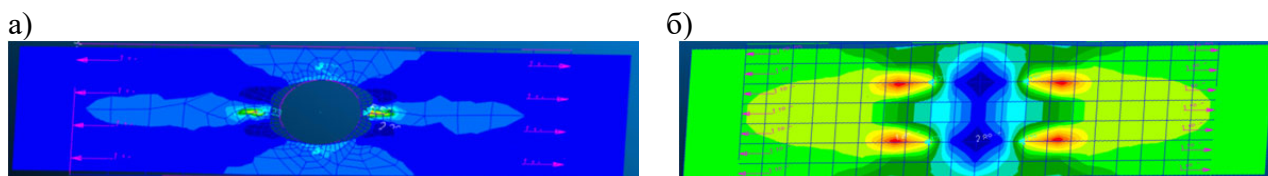


Рис. 1. Типы пластин: а – пластина с отверстием; б – пластина без отверстия

Также была проведена предварительная обработка собранных данных, а именно: табличные данные приведены в систему СИ, а у снимков пластин с помощью программных средств удалён лишний «шум» (см. рис. 3).

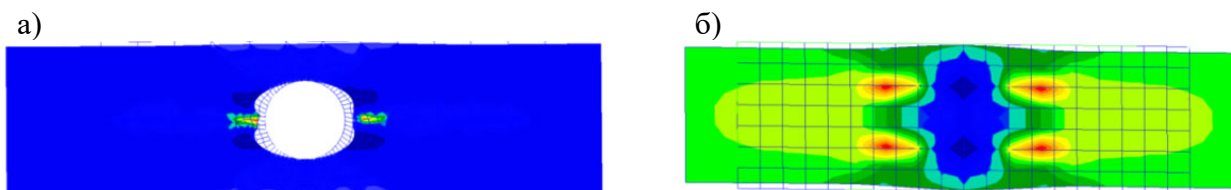


Рис. 2. Обработанные данные: а – пластина с отверстием; б – пластина без отверстия

**Нейросетевые модели.** Разработанная модель многослойного перцептрона с двумя скрытыми слоями и сигмоидальной активацией на выходе является частным случаем нейронных сетей и реализует процесс обработки табличных данных. В отличие от стандартных реализаций, данная модель отражает балансировку классов, создание кастомного классификатора, поиск лучших параметров обучения и оптимизацию порогового значения, что позволяет ей динамически подстраиваться под условия задачи. Представленные ниже авторские целевая функция, минимизирующая бинарную кросс-энтропию, и система ограничений, гарантирующая корректность данных, параметров модели, процесса обучения и предобработки, являются математической моделью данной нейросети.

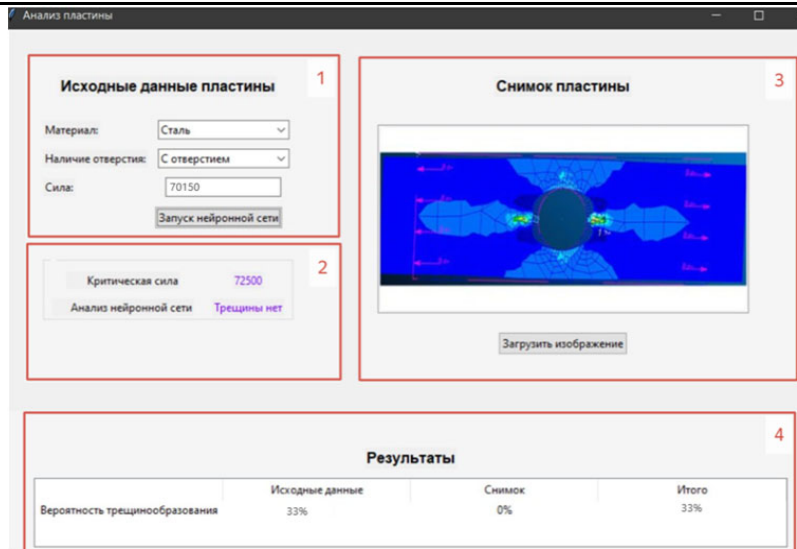


Рис. 3. Интерфейс информационного модуля

$$L(\theta) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \cdot \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - \hat{y}_i)] \rightarrow \min.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y_i \in \{0,1\}, \hat{y}_i \in (0,1), X \in \mathbb{R}^{N \times d} \\ z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \in Z \in \mathbb{R}^{N \times d}, \quad \forall i \in [1; N], \quad \forall j \in [1; d] \\ \mu_j = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i,j} x_{ij}, \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j} (x_{ij} - \mu_j)^2}, \forall i \in [1; N], \forall j \in [1; d] \\ X' \in \mathbb{R}^{N \times d'}, \quad d' > d \\ h^{(1)} = \text{ReLU}(W^{(1)} \cdot x'_i + b^{(1)}), W^{(1)} \in \mathbb{R}^{128 \times d'}, b^{(1)} \in \mathbb{R}^{128} \\ \tilde{h}^{(1)} = \text{Dropout}(h^{(1)}, p) \\ h^{(2)} = \text{ReLU}(W^{(2)} \cdot \tilde{h}^{(1)} + b^{(2)}), W^{(2)} \in \mathbb{R}^{64 \times 128}, b^{(2)} \in \mathbb{R}^{64} \\ \tilde{h}^{(2)} = \text{Dropout}(h^{(2)}, p) \\ \hat{y}_i = \sigma(W^{(3)} \cdot \tilde{h}^{(2)} + b^{(3)}), W^{(3)} \in \mathbb{R}^{1 \times 64}, b^{(3)} \in \mathbb{R} \\ \nabla_{\theta} L(\theta) \exists, \eta > 0, \beta_1, \beta_2 \in (0,1) \\ t^* = \arg \max_t \left( 2 \cdot \frac{\text{Precision}(t) \cdot \text{Recall}(t)}{\text{Precision}(t) + \text{Recall}(t)} \right), t \in [0,1] \end{array} \right.$$

где  $\theta = \{W^{(l)}, b^{(l)}\}$ ;  $N$  – количество объектов;  $d$  – количество признаков;  $y_i = 1$ , если объект принадлежит к классу «трещины»,  $y_i = 0$ , если объект не принадлежит к классу «трещины»;  $x_{ij}$  – значение  $i$ -го признака для  $j$ -го объекта;  $\mu_j$  – среднее значение  $j$ -го признака;  $\sigma_j$  – стандартное отклонение  $j$ -го признака;  $z_{ij}$  – нормализованное значение;  $Z$  – нормализованная матрица;  $X'$  – расширенная матрица признаков;  $l$  – номер слоя ( $l = \overline{1, L}$ );  $h^{(l)}$  – выход  $l$ -го слоя;  $W^{(l)}$  – матрица весов размерности  $(n_{out}^{(l)}, n_{in}^{(l)})$ ;  $b^{(l)}$  – вектор смещений размерности  $(n_{out}^{(l)})$ ;  $\tilde{h}^{(l)}$  – случайным образом обнуляет часть нейронов ( $h_j^{(l)}$  с вероятностью  $1 - p$  или 0 с вероятностью  $p$ );  $\sigma$  – функция активации (сигмоида);  $y_i$  – истинное значение (0 или 1);  $\hat{y}_i$  – предсказанное значение (вероятность);  $\eta$  – скорость обучения (*learning rate*);  $\nabla_{\theta} L(\theta)$  – градиент функции потерь.

Модель свёрточной нейронной сети, состоящая из нескольких слоёв, включая свёртки, уменьшение пространственных размеров представления данных (пуллинг), полносвязные слои и регуляризацию, отражает процесс обработки снимков пластин. Представленные ниже целевая функция и её система ограничений являются математической моделью данной нейросети.

$$J(\Theta) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K y_{ik} \log(\widehat{y}_{ik}) + \lambda \sum_{l=1}^L \|W_l\|_F^2 \rightarrow \min,$$

где  $N$  – количество изображений в батче;  $K$  – количество классов;  $y_{ik}$  – истинная метка для  $i$ -го изображения и  $k$ -го класса;  $\widehat{y}_{ik}$  – предсказанная вероятность для  $l$ -го изображения и  $k$ -го класса;  $W_l$  – матрица весов  $l$ -го слоя;  $\|W_l\|_F^2$  – квадрат нормы Фробениуса матрицы весов;  $\lambda$  – коэффициент регуляризации.

$$\left\{ \begin{array}{l} H \times W \times C = 128 \times 128 \times 3 \\ x_{norm} = \frac{x_{i,j,c}}{255} \\ K_h \times K_w = 3 \times 3, \quad F = [32,64,128] \\ P_h \times P_w = 2 \times 2 \\ D = H''' \times W''' \times F_L \\ M = 512, \quad K = 4 \\ B = 32, \quad E = 20, \quad \eta = 0,0001, \quad \lambda = 0,0001 \end{array} \right. ,$$

где  $B$  – размер батча;  $E$  – количество эпох;  $\eta$  – скорость обучения.

Модели нейронных сетей продемонстрировали хорошие результаты при обучении (см. табл. 1 и 2). Точность модели, работающей с табличными данными, составила 94,25 %, а модели, классифицирующей изображения пластин – 90,75 %.

Таблица 1

Матрица ошибок модели многослойного перцептрона

Предсказанные значения наличия трещины	Нет трещины	Есть трещина
Фактические значения наличия трещины		
Нет трещины	377	23
Есть трещина	43	357

Таблица 2

Матрица ошибок модели свёрточной нейронной сети

Предсказанные значения наличия трещины	Нет трещины	Есть трещина
Фактические значения наличия трещины		
Нет трещины	359	41
Есть трещина	33	367

**Информационный модуль.** Проектирование информационного модуля (см. рис. 3) с внедрением модели многослойного перцептрона и модели на основе свёрточной нейронной сети направлено на создание удобного программного интерфейса для пользователя и облегчение ана-

лиза поведения материала при мгновенной нагрузке образца без использования численных методов и прикладных пакетов программ.

Пользователь задаёт исходные данные пластины в блоке 1 и в блоке 3 загружает снимок образца. В блоке 2 выводится критическая сила для выбранного материала и рассчитывается предварительный анализ на наличие трещины у материала исходя из заданных значений в блоке 1. В блоке 4 выводятся результаты работы моделей нейронных сетей и подводятся итог в виде прогнозирования разрушения при заданной нагрузке.

Информационный модуль позволяет автоматизировать процесс анализа данных нагруженных пластин, учитывая сложные нелинейные зависимости, недоступные для традиционных методов. Интеллектуальный модуль значительно сокращает время на анализ данных и принятие решений, что значительно снижает затраты на проектирование и производство.

**Заключение.** В рамках данного исследования произведён анализ поведения материалов при продольном растяжении, разработаны, реализованы и интегрированы в единый информационный модуль две нейросетевые модели: полносвязная нейронная сеть для бинарной классификации наличия трещины по табличным данным, дополненная методами балансировки, подбора гиперпараметров и оптимизации принятия решения; свёрточная нейронная сеть для распознавания трещин на изображениях. Информационный модуль предоставляет пользователю возможность мгновенно оценить устойчивость материала к разрушению при заданных условиях без запуска ресурсоёмкого конечно-элементного анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая модель процесса деформирования элементов, изготовленных из конструкционных материалов с использованием машинного обучения / Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева, И. В. Канашин [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № 1 (57). – С. 15-23.
2. Математическое описание исследования деформации стальных изделий, изготовленных из Ст3 при равномерном растяжении / А. Л. Григорьева, И. В. Канашин, С. Д. Хасаншин, К. Д. Хряпенко // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 07-11 февраля 2022 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. – С. 208-210.
3. Хряпенко, К. Д. Проблематика определения материала образца в механике деформируемого твёрдого тела с помощью применения искусственного интеллекта / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2025. – С. 237-240.
4. Хряпенко, К. Д. Решение задач классификации и регрессии при исследовании поведения материала при трещинообразовании / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VIII Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07-11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2025. – С. 600-603.
5. Хряпенко, К. Д. Формирование датасета при исследовании поведения материала с использованием MSC.Patran для моделирования трещинообразования / К. Д. Хряпенко, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VIII Всерос. нац. науч. конф. молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07-11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2025. – С. 604-607.

Иванов Б. С., Копытов С. М., Ульянов А. В.  
ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК  
УПРАВЛЯЕМОЙ ГАЗОМАГНИТНОЙ ОПОРЫ

**Иванов Б. С., Копытов С. М., Ульянов А. В.**  
**B. S. Ivanov, S. M. Kopytov, A. V. Ulyanov**

## **ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОЙ ГАЗОМАГНИТНОЙ ОПОРЫ**

### **JUSTIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS OF A CONTROLLED GAS-MAGNETIC SUPPORT**

**Иванов Борис Станиславович** – директор обособленного подразделения ООО «Автотех», Navio (Россия, Санкт-Петербург).

**Boris S. Ivanov** – Director of a Separate Division of Autotech LLC, Navio (Russia, Saint Petersburg).

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

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

**Ульянов Александр Владимирович** – кандидат технических наук, руководитель направления разработки электроники ООО «Автотех», Navio, доцент кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: Ulyanov2@mail.ru.

**Alexander V. Ulyanov** – PhD in Engineering, Head of Electronics Development at Avtotech LLC, Navio, Associate Professor of the CAD Department of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: Ulyanov2@mail.ru.

**Аннотация.** Рассмотрена конструкция радиальной комбинированной газомангнитной опоры, состоящей из управляемого активного магнитного подшипника и неуправляемого газостатического подшипника. Статорная часть магнитного подшипника выполнена на основе шихтованного магнитопровода с восьмью зубцами, собранного из кольцевых стальных пластин. Обмотки с током на зубцах формируют четыре электромагнита, расположенных симметрично вокруг ротора. В газовой части применён газостатический подшипник с дросселирующими питателями с раздвижкой линий наддува. Приведены выражения для расчёта силы тяги магнитного и газостатического подвесов. Отмечены преимущества использования переменного синусоидального тока для питания электромагнитов вместо постоянного тока. Сформирована математическая модель расчёта характеристик управляемой газомангнитной опоры.

**Summary.** The design of a radial combined gas-magnetic support consisting of a controlled active magnetic bearing and an uncontrolled gas-static bearing is considered. The stator section of the magnetic bearing is based on a laminated magnetic core with eight teeth, assembled from annular steel plates. Current-carrying windings on the teeth are formed by four electromagnets located symmetrically around the rotor. The gas section utilizes a gas-static bearing with throttling feeders and spaced boost lines. Expressions for calculating the traction force of the magnetic and gas-static suspensions are presented. The advantages of using alternating sinusoidal current to power the electromagnets instead of direct current are noted. A mathematical model for calculating the characteristics of the controlled gas-magnetic support is developed.

**Ключевые слова:** комбинированная газомангнитная опора, математическая модель, активный магнитный подшипник, газостатический подшипник.

**Key words:** combined gas-magnetic support, mathematical model, active magnetic bearing, gas-static bearing.

УДК 621.318.38:62-229.331

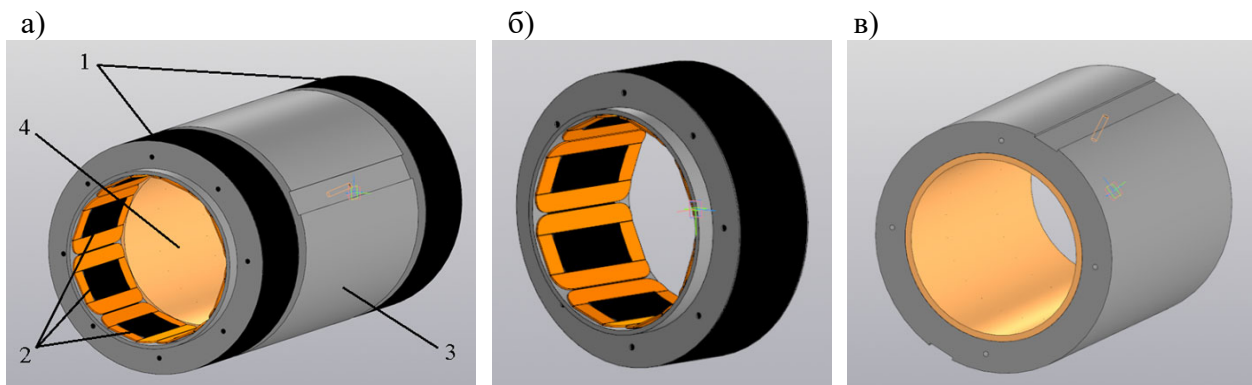
**Введение.** В последние годы успешно внедряются бесконтактные системы подвеса ротора. Они имеют определённые преимущества перед традиционными подшипниками качения и скольжения, связанные как с возможностью получения высоких скоростей вращения ротора, так и с от-

сутствием трения, а также возможностью изменения жёсткости опоры. Основными типами таких опор являются газовые подшипники [1] и активные магнитные подшипники (АМП) [2]. Шпиндельные узлы с бесконтактными опорами применяют в различных установках как с малой, так и с большой нагрузкой на опоры. Кроме очевидных достоинств, указанные типы опор имеют определённые недостатки. В частности, газовый подшипник имеет сравнительно невысокую несущую способность.

Для повышения грузоподъёмности газостатического подшипника (ГСП) и увеличения его жёсткости предложено объединить его с АМП в единую конструкцию, получив тем самым комбинированную газомангнитную опору (ГМО). Проводимые исследования направлены на совершенствование конструкций и улучшение характеристик комбинированных опор с целью увеличения их несущей способности и точности вращения валов высокоскоростных роторных систем [3–7].

Данная работа решает задачу получения математической модели расчёта характеристик управляемой ГМО, необходимой для дальнейшего совершенствования систем управления.

**Описание конструкции ГМО.** На производственной площадке компании ООО «НПП «ЭЛВО»» выполнено конструирование и исследование АМП и ГМО для высокоскоростных роторных машин средней мощности с нагрузкой на радиальные опоры до двух тонн. Эскиз одной из разработанных ГМО представлен на рис. 1.



1 – магнитная часть ГМО, 2 – полюса магнитопровода, 3 – рубашка ГСП,  
 4 – бронзовый вкладыш ГСП (отверстия питателей не показаны из-за малых размеров)  
 Рис. 1. Эскиз радиальной ГМО (а) и её составных узлов – АМП (б) и ГСП (в)

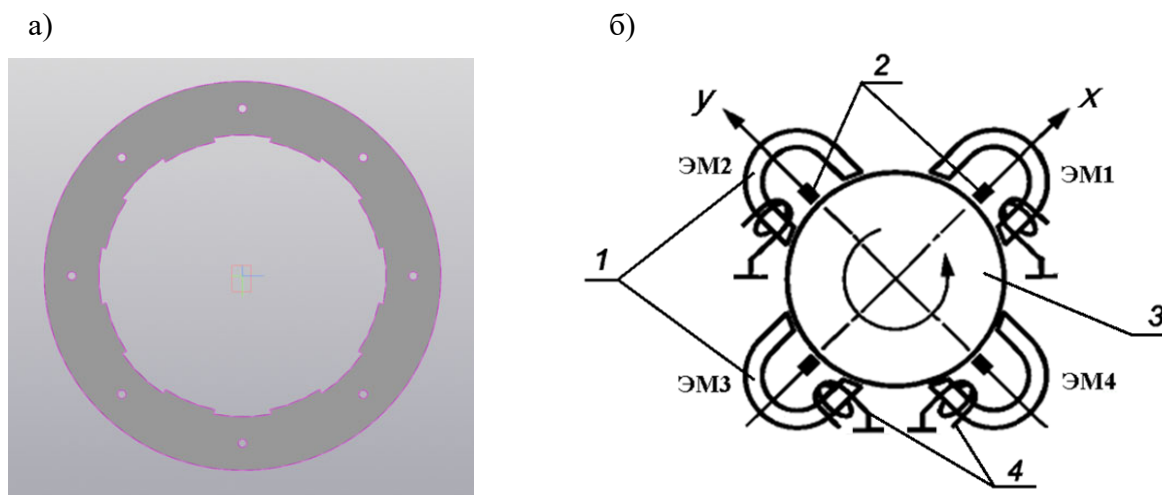
ГМО представляет собой комбинированную конструкцию из трёх узлов. Магнитная часть представлена двумя узлами АМП, расположенными на противоположных концах опоры. Между АМП находится узел ГСП. Поскольку рассматриваемая ГМО предназначена для машин средней мощности, в которых нагрузка на валу не превышает двух тонн, магнитная система выполнена с сосредоточенными катушками с числом зубцов статора  $Z = 8$ . Магнитопровод собран из листов стали марки 2421, которая имеет максимальную индукцию насыщения 1,6 Тл. Номинальная частота вращения ротора составляет 525 рад/с.

Проектирование ГСП выполнено по методике, описанной в РТМ 108.129.101-76, для опор с питателями, имеющими кольцевую диафрагму [8]. Выбор типа питателя обусловлен технологичностью производства: его получают простой операцией сверления, что обеспечивает устойчивую повторяемость параметров. Количество питателей в ряду составляет 24, диаметр отверстия питателя 0,6 мм, а диаметр входного отверстия 1 мм.

**Основные соотношения для нахождения силы тяги АМП.** Известно, что несущая способность ГСП обусловлена разницей давления воздуха в узкой и широкой части зазора в том случае, если ось ротора смещена относительно оси подшипника. Обычно такое смещение происходит под действием силы тяжести ротора и внешнего механического усилия, приложенного к ротору. В АМП за создание центрирующего магнитного усилия отвечают датчики положения, которые отслеживают смещение оси ротора относительно оси данного подшипника. Поскольку векторы сил

газовой и магнитной части ГМО сонаправлены, то создаваемые этими частями усилия суммируются. При этом АМП является управляемым элементом, а ГСП – неуправляемым.

Разработку математической модели расчёта эксплуатационных характеристик ГМО начнём с магнитного подвеса. Восемь зубцов статора позволяют реализовать четыре П-образных электромагнита (см. рис. 2). Обмотка каждого электромагнита состоит из двух секций витков, размещённых на двух соседних зубцах. Магнитный поток в основном замыкается в «своём» электромагните. Это обусловлено, во-первых, наименьшей длиной и минимальным магнитным сопротивлением такого контура, а во-вторых, ограничением на растекание со стороны смежных магнитных потоков.



1 – магнитопроводы, 2 – датчики положения ротора, 3 – ротор, 4 – обмотки

Рис. 2. Конфигурация листа статора радиального АМП (а) и схема расположения электромагнитов АМП (б)

В машинах с горизонтальным расположением вала оси электромагнитов  $x$  и  $y$  обычно смещают в пространстве под углом  $45^\circ$  к вертикальной оси таким образом, чтобы распределить вес ротора между двумя соседними электромагнитами (ЭМ1 и ЭМ2). Электромагниты, лежащие на одной оси (например, ЭМ1 и ЭМ3), объединяются в один канал управления. В целом электромагнитный подвес содержит два идентичных канала регулирования в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для обеспечения функционирования АМП и выполнения требований ГОСТ Р ИСО14839-2-2011 [16] необходимы датчики положения ротора. Сигналы этих датчиков заводятся в обратную связь контроллера управления.

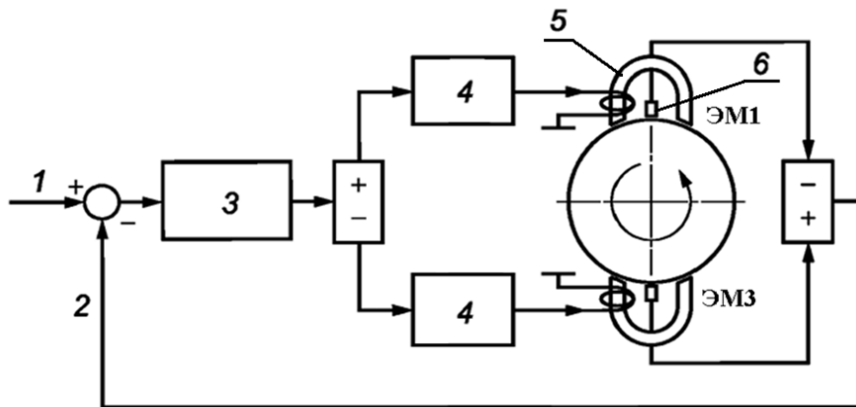
На рис. 3 приведена функциональная схема системы управления одного канала АМП. Ориентация АМП на рис. 3 отличается от ориентации на рис. 2 тем, что ось  $x$  направлена вертикально. При таком расположении АМП вес всего ротора приложен к одному электромагниту ЭМ1, что является случаем подачи максимально возможной нагрузки на канал.

Тяговое усилие электромагнита может быть вычислено различными методами [9].

Выражение для нахождения вектора электромагнитной силы *энергетическим методом* имеет следующий вид:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2} \cdot N^2 \cdot I^2 \cdot \frac{\partial G_M}{\partial x} \cdot \hat{i}, \quad (1)$$

где  $\vec{F}_M$  – вектор электромагнитной силы, Н;  $N$  – число витков в обмотке электромагнита;  $I$  – ток в обмотке электромагнита, А;  $\frac{\partial G_M}{\partial x}$  – частная производная магнитной проводимости  $G_M$  магнитопровода по координате  $x$  вдоль его оси, Гн/м;  $\hat{i}$  – безразмерный единичный орт оси  $Ox$  в декартовой системе координат.



1 – задающий сигнал, 2 – сигнал обратной связи, 3 – контроллер, 4 – усилитель мощности, 5 – электромагнит, 6 – датчики положения ротора (зазора)

Рис. 3. Функциональная схема системы управления одного канала АМП

На практике вычисление силы с использованием выражения (1) сопряжено с измерением тока в обмотке и вычислением частной производной от магнитной проводимости магнитопровода по координате  $x$ , на которую влияют различные факторы: форма магнитопровода и полюсного наконечника, величина зазора, проницаемость материала магнитопровода, потери энергии в магнитопроводе, расположение обмотки и температура магнитопровода. Учесть перечисленные факторы затруднительно, поэтому к нахождению тягового усилия следует подойти иначе.

Для расчёта напряжённости магнитного поля прямолинейного проводника с током используют закон Био – Савара – Лапласа:

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3},$$

где  $I$  – сила тока, А;  $d\vec{l}$  – вектор элемента проводника, направленный вдоль тока, м;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, соединяющий элемент проводника с точкой наблюдения, м;  $r$  – модуль радиуса-вектора, м;  $d\vec{l} \times \vec{r}$  – векторное произведение. Направление вектора  $\vec{H}$  определяют по правилу буравчика, а его модуль вычисляют следующим образом:

$$dH = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{dl \cdot \sin\varphi}{r^2},$$

где  $\varphi$  – угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ , лежащими в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{H}$ . Связь между индукцией магнитного поля и его напряжённостью хорошо известна:

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H},$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

В источнике [10] с помощью уравнения Максвелла находят вектор магнитной силы, действующей на тело, ограниченное поверхностью  $S$ :

$$\vec{F}_M = \frac{1}{\mu_0} \int_S \left( (\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{B} - \frac{1}{2} \cdot B^2 \cdot \vec{n} \right) dS, \quad (2)$$

где  $\vec{B}$  и  $B$  – соответственно вектор и модуль индукции на внешней стороне элемента поверхности  $S$ , Тл;  $\vec{B} \cdot \vec{n}$  – скалярное произведение двух векторов – индукции и единичной внешней нормали элемента поверхности  $S$ .

Если поверхность интегрирования в выражении (2) совпадает с поверхностью магнитопровода, оно существенно упрощается:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \int_S B^2 \cdot \vec{n} dS. \quad (3)$$

В общем случае модуль индукции магнитного поля  $B$  на поверхности интегрирования изменяется по некоторому закону  $B = B(S)$ . Целесообразно выполнить нормирование распределения индукции по поверхности интегрирования  $S$ :

$$\rho(S) = \frac{B(S)}{B_\delta}, \quad (4)$$

где  $B_\delta$  – наибольшее значение индукции, которое имеет место в зазоре  $\delta$  электромагнита, Тл.

После подстановки выражения (4) в (3) получено выражение вектора магнитной силы  $\vec{F}_M$  через нормированное распределение индукции:

$$\vec{F}_M = \frac{B_\delta^2}{2 \cdot \mu_0} \int_S \rho(S)^2 \cdot \vec{n} dS. \quad (5)$$

В случае симметричного магнитопровода и *единичного нормированного* распределения индукции по поверхности полюса выражение для магнитной силы принимает вид

$$F_M = \frac{B_\delta^2 \cdot S_\delta}{2 \cdot \mu_0}, \quad (6)$$

где  $S_\delta$  – площадь полюса электромагнита, м<sup>2</sup>.

Допущение о единичном нормированном распределении магнитной индукции по поверхности полюса справедливо при следующих условиях:

1. магнитная проницаемость материала полюсов стремится к бесконечности, а его магнитное сопротивление пренебрежимо мало;

2. отсутствуют краевые эффекты на границах полюсов.

Единичное нормированное распределение нарушают следующие факторы:

1. магнитопровод входит в насыщение;

2. воздушный зазор неравномерен;

3. ток в обмотках электромагнита создаёт пульсации поля.

В реальных устройствах распределение магнитной индукции всегда неравномерно, но для инженерных оценок указанное приближение приемлемо. Результирующая сила будет складываться из сил на двух полюсах. Поэтому правую часть выражения (6) следует удвоить:

$$F_M = \frac{B_\delta^2}{\mu_0} \cdot S_\delta. \quad (7)$$

Рассмотренные выше положения справедливы для постоянного тока. На *переменном синусоидальном токе* нормированное распределение индукции является нестационарным и описывается выражением

$$\rho(S, t) = \rho(S) \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Произведя подстановку  $\rho(S, t)$  вместо  $\rho(S)$  в выражении (5), можем получить усреднённую по периоду силу тяги:

$$F_{M\_cp}^{\sim} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{B_\delta^2}{2 \cdot \mu_0} \int_{S_\delta} [\rho(S) \cdot \sin(\omega \cdot t)]^2 dS dt.$$

Если зазор существенно меньше линейных размеров полюса, результирующая сила на двух полюсах находится следующим образом:

$$F_{M\_cp}^{\sim} = \frac{B_\delta^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot S_\delta. \quad (8)$$

Сравнив выражения магнитной силы для постоянного тока (7) и для переменного тока (8), можем сделать вывод, что на переменном токе в катушку следует подавать в два раза больший ток, чтобы получить такую же силу. Это нужно учитывать при проектировании магнитной части опоры. Например, сечение магнитопровода следует увеличить, чтобы он не вошёл в насыщение.

В то же время питание переменным током снижает отрицательное влияние гистерезиса на процесс намагничивания материала и сводит к минимуму остаточную намагниченность, учесть которую в силовых характеристиках достаточно трудно. При этом увеличивается потеря энергии из-за перемагничивания и вихревых токов, а магнитное сопротивление магнитопровода имеет комплексный характер [11].

Для управления магнитной силой в комбинированной опоре предпочтительней применять переменный ток по следующим причинам:

1. Отсутствует эффект намагничивания, который проявляется на постоянном токе.
2. Обеспечивается высокая динамическая стабильность и точность управления. Переменный ток позволяет гибко регулировать частоту, амплитуду и фазу электромагнитного поля, что обеспечивает быстрое реагирование на изменения нагрузки или вибрацию. Это особенно важно в высокоскоростных роторных системах, в которых требуется точное поддержание положения ротора в реальном времени.

3. Обеспечивается энергоэффективность за счёт периодического перемагничивания, что позволяет оптимизировать энергопотребление.

От величины зазора зависит индуктивность обмоток электромагнитов. На переменном токе эту индуктивность можно определить косвенным методом, а значит, оценить зазор. Появляется возможность в дополнение к сигналам датчиков положения ротора вычислять это положение, используя измеренные индуктивности обмоток. Дополнительная обратная связь позволит повысить точность определения положения ротора.

### Математическая модель расчёта характеристик управляемого электромагнитного подвеса.

Как известно [11], магнитный поток в зазоре определяется реактивной составляющей тока в катушке:

$$\Phi_{\delta} = \frac{I_p \cdot N}{R_M} \cdot G_{M\delta} \cdot R_{\delta}, \quad (9)$$

где  $I_p$  – реактивный ток, А;  $N$  – число витков;  $I_p \cdot N$  – реактивная составляющая магнитодвижущей силы, А;  $R_M = \text{Re}(Z_{MB}) + R_{\delta}$  – сумма активных магнитных сопротивлений для потока выпучивания  $\text{Re}(Z_{MB})$  и зазора  $R_{\delta}$ , А/Вб;  $G_{M\delta} = \mu_0 \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot \delta}$  – проводимость зазора, Гн;  $R_{\delta} = \frac{1}{(G_{MB} + G_{M\delta})}$  – активное магнитное сопротивление воздушного зазора, А/Вб, здесь  $G_{MB}$  – активная магнитная проводимость для потока выпучивания, Гн.

Учитывая, что  $\Phi_{\delta} = B_{\delta} \cdot S_{\delta}$ , можем выразить индукцию в воздушном зазоре с учётом выражения (9):

$$B_{\delta} = \frac{I_p \cdot N}{R_M \cdot S_{\delta}} \cdot G_{M\delta} \cdot R_{\delta}.$$

Неотъемлемой частью математической модели являются уравнения движения ротора под действием приложенных сил [2; 12]. Таким образом, полная система уравнений электромагнитного подвеса, представленного на рис. 3 и работающего на переменном токе, с учётом возможного демпфирования по координате и скорости перемещения ротора имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = V; \\ \frac{dV}{dt} = -\frac{S_{\delta}}{2 \cdot m \cdot \mu_0} \cdot (B_{1\delta}^2 - B_{2\delta}^2) + \frac{F_{\text{ВН}}}{m} + g \\ B_{\delta 1} = \frac{I_1 \cdot N}{S_{\delta}} \cdot G_{\text{М}\delta 1} \cdot R_{\delta} \\ B_{\delta 2} = \frac{I_2 \cdot N}{S_{\delta}} \cdot G_{\text{М}\delta 2} \cdot R_{\delta} \\ G_{\text{М}\delta 1} = \mu_0 \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot \delta_1} \\ G_{\text{М}\delta 2} = \mu_0 \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot \delta_2} \\ \frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{T_y} \cdot (I_0 + k_y \cdot x + k_y \cdot T_k \cdot V) \\ \frac{dI_2}{dt} = \frac{1}{T_y} \cdot (I_0 - k_y \cdot x - k_y \cdot T_k \cdot V) \end{array} \right. , \quad (10)$$

где  $F_{\text{ВН}}$  – внешняя сила (нагрузка), Н;  $m$  – масса ротора, кг;  $I_1$  и  $I_2$  – токи в обмотках электромагнита, А;  $I_0$  – выходной ток плеч преобразователя на среднем зазоре, А;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $N$  – число витков в катушке электромагнита;  $x$  – перемещение ротора, м;  $V$  – линейная скорость перемещения ротора, м/с;  $T_y$  – постоянная времени преобразователя, с;  $k_y$  – коэффициент передачи преобразователя, А/(с · м);  $T_k$  – постоянная времени дифференцирующей цепи, с.

Задачей системы управления является обеспечение требуемого зазора за счёт изменения токов в обмотках электромагнитов. В установившемся режиме внешняя сила компенсируется разностью магнитных сил. При этом жёсткость подшипника зависит от параметров электромагнитов и коэффициента передачи преобразователя. Влияние остаточной намагниченности магнитопроводов несущественно, т. к. используется переменный ток. В общем случае система уравнений (10) нелинейна из-за возведения индукции в квадрат и влияния магнитных сопротивлений, зависящих от перемещения. При этом магнитные сопротивления сами нелинейно зависят от намагничивающего тока.

**Математическая модель расчёта характеристик ГМО с учётом её газовой части.** Как уже отмечено, в комбинированной опоре ГСП дополнительно увеличивает общую силу и является в определённой степени страховочным для АМП [6]. Поскольку природа газовой и магнитной сил разная, то паразитного взаимного влияния соответствующих подвесов друг на друга не происходит. В то же время суммирование сил газовой и магнитной тяги повышает несущую способность опоры в целом. Таким образом, систему уравнений (10) следует скорректировать, учтя во втором выражении вклад ГСП путём добавления его силы тяги  $F_{\text{ГСП}}$ :

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{S_{\delta}}{2 \cdot m \cdot \mu_0} \cdot (B_{1\delta}^2 - B_{2\delta}^2) + \frac{F_{\text{ВН}}}{m} + g - \frac{F_{\text{ГСП}}}{m}. \quad (11)$$

Как известно, ГСП имеют большое число видов и конструкций [13–15]. Наиболее распространёнными являются опоры с питающими отверстиями, расположенными по окружности вкладыша и выходящими непосредственно в воздушный зазор. В комбинированной опоре предусмотрено использование ГСП с дросселирующими питателями с раздвижкой линии наддува.

Несущая способность ГСП определяется выражением [8]

$$F_{\text{ГСП}} = c_{F_{\text{ГСП}}} \cdot L \cdot D \cdot (p_s - p_a), \quad (12)$$

где  $c_{F_{\text{ГСП}}}$  – коэффициент несущей способности, являющийся функцией геометрических и конструктивных параметров подшипника;  $L$  – длина подшипника, м;  $D$  – диаметр подшипника, м;  $p_s$  – абсолютное давление питания, Па;  $p_a$  – атмосферное давление, Па.

Производную несущей способности ГСП по эксцентриситету называют радиальной жёсткостью подшипника и определяют по формуле

$$K_{\text{ГСП}} = \frac{L \cdot D \cdot (p_s - p_a)}{c} \cdot \frac{dc_{\text{ГСП}}}{d\varepsilon}, \quad (13)$$

где  $c$  – средний радиальный зазор подшипника, м;  $\varepsilon$  – относительный эксцентриситет,  $\varepsilon = e/c$ , здесь  $e$  – эксцентриситет, м.

В ГСП средний радиальный зазор задают из условий обеспечения устойчивой работы подшипника в заданном диапазоне частот вращения ротора, минимального расхода газа на смазку и технологических возможностей изготовления подшипника. При выборе радиального зазора в ГСП следует руководствоваться соотношением [8]

$$\frac{c}{r} = 0,0005 \dots 0,0015,$$

где  $r$  – радиус шипа ротора, м.

Обзор источников показывает, что в общем случае величина среднего зазора ГСП меньше, чем в АМП. Хотя зазор магнитного подшипника можно сделать таким же, как в газовом, однако в этом случае усложняется чистовая обработка полюсов и сборка комбинированной опоры. Конструкция ГМО (см. рис. 1) даёт возможность разместить газовую часть с более жёсткими требованиями к зазору между магнитными подшипниками, а зазор под полюсами несколько увеличить. Тем самым облегчаются требования к механической реализации опоры.

С учётом газовой части ГМО математическую модель (10) необходимо дополнить выражениями (11), (12) и (13):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = V \\ \frac{dV}{dt} = -\frac{S_\delta}{2 \cdot m \cdot \mu_0} \cdot (B_{1\delta}^2 - B_{2\delta}^2) + \frac{F_{\text{ВН}}}{m} + g - \frac{F_{\text{ГСП}}}{m} \\ B_{\delta 1} = \frac{I_1 \cdot N}{S_\delta} \cdot G_{\text{М}\delta 1} \cdot R_\delta \\ B_{\delta 2} = \frac{I_2 \cdot N}{S_\delta} \cdot G_{\text{М}\delta 2} \cdot R_\delta \\ G_{\text{М}\delta 1} = \mu_0 \cdot \frac{S_\delta}{2 \cdot \delta_1} \\ G_{\text{М}\delta 2} = \mu_0 \cdot \frac{S_\delta}{2 \cdot \delta_2} \\ \frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{T_y} \cdot (I_0 + k_y \cdot x + k_y \cdot T_k \cdot V) \\ \frac{dI_2}{dt} = \frac{1}{T_y} \cdot (I_0 - k_y \cdot x - k_y \cdot T_k \cdot V) \\ F_{\text{ГСП}} = c_{\text{ГСП}} \cdot L \cdot D \cdot (p_s - p_a) \\ K_{\text{ГСП}} = \frac{L \cdot D \cdot (p_s - p_a)}{c} \cdot \frac{dc_{\text{ГСП}}}{d\varepsilon} \end{array} \right.$$

**Заключение.** Представленное описание математической модели расчёта характеристик управляемой ГМО использовано при проектировании и конструировании комбинированной опоры для высокоскоростной роторной машины средней мощности и её системы управления на производственной площадке компании ООО «НПП “ЭЛВО”». Для питания электромагнитов ГМО использован переменный синусоидальный ток, который обуславливает следующие преимущества по сравнению с питанием постоянным током:

– сводится к минимуму остаточная намагниченность магнитопровода;  
– обеспечиваются повышенная динамическая стабильность, точность управления и энергоэффективность.

Кроме того, использование переменного тока позволяет находить индуктивность обмоток, которая зависит от величины зазора. Это даёт возможность вводить дополнительную обратную связь для повышения точности определения положения ротора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лучин, Г. А. Газовые опоры турбомашин / Г. А. Лучин, Ю. В. Пешти, А. И. Снопов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Журавлев, Ю. Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчёт, применение / Ю. Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2005. – 206 с.
3. Космынин, А. В. Совершенствование выходных характеристик шпиндельного узла на газомангнитных опорах путём адаптивного управления магнитной силой / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, С. Б. Марьин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 93-96.
4. Ульянов, А. В. Система управления радиальной газомангнитной опоры / А. В. Ульянов, А. С. Хвостиков // Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике: сборник материалов I Международной школы-конференции молодых учёных, Саратов, 20-22 ноября 2017 года. – Саратов: Научная книга, 2017. – С. 88-89.
5. Щетинин, В. С. Математическая модель расчёта несущей способности высокоскоростного шпиндельного узла на газомангнитной опоре / В. С. Щетинин, А. В. Космынин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 8. – С. 25-27.
6. Ульянов, А. В. Математическая модель управляемой газомангнитной опоры / А. В. Ульянов, С. М. Копытов, С. В. Стельмащук // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 16-20.
7. Повышение точности вращения валов высокоскоростных роторных систем / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, С. М. Копытов, А. В. Ульянов, А. С. Хвостиков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № III-1 (15). – С. 47-51.
8. РТМ 108.129-101-76. Расчёт радиальных газостатических подшипников турбомашин атомной энергетики: издание официальное: утверждён и введён в действие указанием Министерства энергетического машиностроения от 5 октября 1976 г. № ВЛ-002-6994: дата введения 1978-04-01 / разработан Научно-производственным объединением по исследованию и проектированию энергетического оборудования (ЦКТИ). – Л.: НПО ЦКТИ, 1977. – 86 с.
9. Кизимов, А. Т. Динамические ошибки датчиков параметров движения на основе электромагнитного подвеса / А. Т. Кизимов, Н. Н. Беляков, А. Н. Лебедев // Датчики в информационно-измерительных системах: сборник статей. – Ижевск: ИжМИ, 1984. – С. 70-74.
10. Буль, Б. К. Основы теории электрических аппаратов: учеб. пособие для вузов / Б. К. Буль, Г. В. Буткевич, А. Г. Годжелло. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
11. Анцев, Г. В. Проектирование устройств с электромагнитным подвесом / Г. В. Анцев, С. В. Богословский, Г. А. Сапожников. – М.: Наука, 2010. – 422 с.
12. Вышков, Ю. Д. Магнитные опоры в автоматике / Ю. Д. Вышков, В. И. Иванов. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.
13. Легаев, В. П. Газовые опоры станков и приборов: моногр. / В. П. Легаев, В. В. Гавшин. – Владимир: Владим. гос. ун-т., 1996. – 224 с.
14. Космынин, А. В. Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования / А. В. Космынин, В. С. Виноградов. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 326 с.
15. Шейнберг, С. А. Опоры скольжения с газовой смазкой / С. А. Шейнберг, В. П. Жедь, М. Д. Шишеев. – М.: Машиностроение, 1979. – 336 с.
16. ГОСТ Р ИСО14839-2-2011. Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 2. Оценка вибрационного состояния = Vibration. Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. Part 2. Evaluation of vibration: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 ноября 2011 г. № 527-ст: введён впервые: дата введения 2012-09-01 / подготовлен Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем». – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.



Липанов И. Д.  
I. D. Lipanov

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДИАГНОСТИКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ RGB- И ПСЕВДО-LIDAR ДАННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

### AUTOMATED DIAGNOSTICS OF RAILWAY INFRASTRUCTURE BASED ON RGB AND PSEUDO-LIDAR DATA FROM UAVS USING NEURAL NETWORK MODELS

**Липанов Илья Дмитриевич** – аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: illipanov@mail.ru.

**Ilya D. Lipanov** – Postgraduate Student, Department of Information and Computing Systems, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, St. Petersburg); Russia, 190031, St. Petersburg, Moskovsky Pr., 9. E-mail: illipanov@mail.ru.

**Аннотация.** Гибридные методы обработки данных железнодорожной инфраструктуры, основанные на совмещении RGB-изображений и глубинных карт (RGB-D, RGB + Depth), позволяют значительно повысить точность диагностики в условиях ограниченной доступности сенсорного оборудования. Их применение особенно актуально при мониторинге и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС), когда требуется оперативное выявление деформаций пути, размывов земляного полотна, просадок и иных критических нарушений. Современные подходы, использующие данные лёгких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), таких как DJI Mini 4 Pro, а также методы оценки глубины, фотограмметрические алгоритмы и нейросетевые модели сегментации обеспечивают формирование точных цифровых представлений обследуемых объектов при минимальных ресурсных затратах. Цель исследования: разработка и анализ гибридного алгоритма RGB-D-обработки данных для повышения точности выявления дефектов железнодорожной инфраструктуры в условиях ЧС на основе аэрофотосъёмки, выполненной лёгким БПЛА DJI Mini 4 Pro, с использованием методов оценки глубины, сегментации U-Net и последующей классификации повреждений. Результаты исследования демонстрируют, что применение гибридных RGB-D-методов позволяет увеличить точность детекции дефектов на 10-15 %, обеспечить количественный анализ масштабов разрушений (например, определение глубины просадки до сантиметровой точности), сократить время подготовки инженерных решений и повысить оперативность обследования аварийных участков. Разработанный подход формирует основу для внедрения автоматизированных систем мониторинга, интегрируемых с информационными моделями зданий и сооружений (Building Information Modeling, BIM) и геоинформационными системами (ГИС), а также служит технологической базой для создания цифровых двойников инфраструктуры.

**Summary.** Hybrid methods for processing railway infrastructure data based on the integration of RGB images and depth maps (RGB-D, RGB + Depth) significantly improve diagnostic accuracy under conditions of limited availability of sensor equipment. Their application is particularly relevant in monitoring and emergency response scenarios, where rapid detection of track deformations, embankment washouts, subsidence, and other critical defects is required. Modern approaches utilizing data from lightweight unmanned aerial vehicles (UAVs), such as the DJI Mini 4 Pro, together with depth estimation techniques, photogrammetric algorithms, and neural network-based segmentation models, enable the generation of accurate digital representations of inspected objects with minimal resource expenditure. The aim of this study is to develop and analyze a hybrid RGB-D data processing algorithm to enhance the accuracy of railway infrastructure defect detection under emergency conditions, based on aerial imagery acquired by the lightweight DJI Mini 4 Pro UAV, using depth estimation methods, U-Net segmentation, and subsequent damage classification. The results demonstrate that the application of hybrid RGB-D methods increases defect detection accuracy by 10–15%, enables quantitative assessment of damage scale (e.g., subsidence depth estimation with centimeter-level precision), reduces the time required for engineering decision-making, and improves the efficiency of emergency site inspections. The proposed approach provides a foundation for the implementation of automated monitoring systems integrated with Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information Systems (GIS), and serves as a technological basis for the development of railway infrastructure digital twins.

**Ключевые слова:** RGB-D-модель, беспилотные летательные аппараты, DJI Mini 4 Pro, железнодорожная инфраструктура, аэрофотосъёмка, оценка глубины, U-Net, 3D-моделирование, чрезвычайные ситуации, цифровые двойники, BIM, ГИС.

**Key words:** RGB-D model, unmanned aerial vehicles, DJI Mini 4 Pro, railway infrastructure, aerial photography, depth estimation, U-Net, 3D modeling, emergencies, digital twins, BIM, GIS.

УДК 629

**Введение.** Обеспечение безопасной эксплуатации железнодорожной инфраструктуры требует регулярной диагностики состояния путевого хозяйства, земляного полотна, искусственных сооружений и элементов верхнего строения пути. Традиционные наземные методы обследования трудоёмки и недостаточно оперативны, что критично при чрезвычайных ситуациях [1].

В последние годы активно внедряются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для мониторинга железнодорожной инфраструктуры [2]. Однако основной поток информации с малогабаритных БПЛА представлен RGB-изображениями, что ограничивает возможности анализа дефектов, связанных с геометрическими деформациями и пространственными смещениями объектов [3].

Перспективным направлением является восстановление глубины сцены по изображениям с использованием фотограмметрических методов (Structure from Motion, Multi-View Stereo) и нейросетевых моделей монофоновой оценки глубины (MiDaS, DPT). Это позволяет формировать псевдо-LiDAR (Light Detection and Ranging) облака точек на основе стандартной RGB-съёмки [4] без применения специализированных лидарных сенсоров.

Параллельно развивается направление применения нейросетевых моделей сегментации и детекции повреждений. Архитектуры U-Net, Attention U-Net, DeepLab и современные детекторы объектов позволяют автоматизировать выявление дефектов верхнего строения пути, балластной призмы и элементов земляного полотна.

Однако комплексная интеграция RGB-данных и псевдо-LiDAR глубины в единую аналитическую модель остаётся недостаточно разработанной, особенно применительно к данным, полученным лёгкими дронами типа DJI Mini 4 Pro.

Целями настоящего исследования являются разработка и анализ гибридного алгоритма обработки RGB-D-данных для повышения точности выявления дефектов железнодорожной инфраструктуры в условиях чрезвычайных ситуаций. Метод основан на совмещении аэрофотосъёмки, выполненной лёгким БПЛА, алгоритмов оценки глубины, сегментации U-Net и последующей классификации повреждений.

Предложенный алгоритмический конвейер может быть интегрирован в системы информационного моделирования (BIM), геоинформационные системы (ГИС) и цифровые двойники железнодорожной инфраструктуры.

**1. Мультимодальные данные, получаемые с БПЛА.** Современные лёгкие БПЛА позволяют выполнять оперативный мониторинг объектов железнодорожной инфраструктуры, обеспечивая получение данных высокого пространственного разрешения. DJI Mini 4 Pro относится к классу малогабаритных дронов массой менее 250 г, что делает его удобным для регулярных обследований протяжённых участков пути. Камера с 48-Мп CMOS-сенсором 1/1.3", поддержкой RAW и передачей EXIF-метаданных обеспечивает возможность пространственной привязки снимков и их последующей фотограмметрической обработки.

Несмотря на отсутствие аппаратных LiDAR и тепловизионных сенсоров, Mini 4 Pro может формировать мультимодальные производные данные при алгоритмическом восстановлении глубины сцены. В рамках работы под мультимодальностью понимается совмещение RGB-изображений, псевдо-LiDAR глубины и облака точек, построенного на основе глубинной карты.

RGB-изображения содержат текстурные и цветовые признаки дефектов. Однако RGB-канал не передаёт пространственную структуру сцены, что ограничивает анализ деформаций, связанных с просадками или объёмными изменениями балластной призмы.

Восстановление глубины выполняется алгоритмически двумя способами. Первый – фотограмметрический метод Structure from Motion (SfM), при котором глубина восстанавливается по серии перекрывающихся изображений [5]:

$$X = f(R, t, x_i, x_j),$$

где  $X$  – 3D-координата точки сцены;  $R, t$  – параметры движения камеры;  $x_i, x_j$  – проекции одинаковых точек на разных кадрах.

Преимуществами SfM являются высокая точность и корректная реконструкция сложных объектов, ограничениями – необходимость перекрытия кадров и высокая вычислительная нагрузка [6].

Второй способ основан на нейросетевой монофоновой оценке глубины по одиночному изображению:

$$D = M(I),$$

где  $D$  – карта глубины;  $M$  – нейросетевая модель;  $I$  – RGB-кадр.

Нейросетевые методы обеспечивают высокую скорость и не требуют перекрытия кадров, однако глубина носит относительный характер и требует нормализации.

Преобразование глубины в трёхмерное представление осуществляется по стандартной модели камеры [7]:

$$P(x, y) = D(x, y) \cdot K^{-1}[x, y, 1]^T,$$

где  $D(x, y)$  – глубина пикселя;  $K$  – матрица внутренних параметров камеры.

Для совместной обработки RGB и глубины выполняются их синхронизация, интерполяция и нормализация:

$$D' = \frac{D - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}},$$

после чего формируется объединённый вектор признаков

$$F = \alpha \cdot F_{RGB} + \beta \cdot F_{Depth},$$

где  $\alpha, \beta$  – весовые коэффициенты;  $F_{RGB}, F_{Depth}$  – признаки соответствующих модальностей.

Мультимодальное представление повышает устойчивость дальнейшей сегментации к изменениям освещённости и сложной геометрии сцены.

Сравнительные характеристики нейросетевых моделей монофоновой оценки глубины по показателям точности и скорости обработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная эффективность моделей моноглубины

Модель	Средняя относительная ошибка, %	Скорость обработки на CPU	Комментарий
MiDaS v3	7-9	~0,15 с/кадр	Лучше всего работает на инфраструктуре
DPT-Large	5-7	~0,25 с/кадр	Высокая детализация глубины
LeReS	6-8	~0,20 с/кадр	Хорошо восстанавливает поверхности большой площади

Таким образом, даже при отсутствии аппаратного LiDAR лёгкий БПЛА способен формировать полноценное RGB-D-представление сцены, пригодное для метрической диагностики железнодорожной инфраструктуры.

**2. Методы обработки мультимодальных данных, получаемых с БПЛА.** Обработка данных, полученных с лёгких БПЛА, основывается на объединении фотограмметрии, нейросетевой оценки глубины и алгоритмов сегментации. В условиях отсутствия аппаратного LiDAR ключевую роль играет корректное восстановление геометрии сцены и последующая интеграция глубины с RGB-изображениями.

Фотограмметрическая реконструкция выполняется методом SfM. На основе серии перекрывающихся снимков извлекаются и сопоставляются ключевые точки, после чего решается задача минимизации ошибки проекции:

$$E = \sum_{i,j} \|x_{ij} - \pi(P_i, X_j)\|^2,$$

где  $x_{ij}$  – наблюдаемая точка;  $P_i$  – параметры камеры;  $X_j$  – положение пространственной точки, а функция  $\pi$  моделирует процесс получения изображения.

Результатом является разреженное облако точек, которое затем уплотняется методом Multi-View Stereo для получения метрически пригодной модели.

В ситуациях, когда перекрытие кадров недостаточно, применяется нейросетевая оценка глубины:

$$D = M(I),$$

где  $M$  – обученная модель;  $I$  – RGB-изображение.

Переход к трёхмерному представлению осуществляется по модели камеры:

$$P(x, y) = D(x, y) \cdot K^{-1}[x, y, 1]^T,$$

где  $K$  – матрица внутренних параметров, характеризующая оптическую систему DJI Mini 4 Pro.

Для повышения качества облака точек применяются фильтрация Statistical Outlier Removal и воксельная дискретизация, что уменьшает объём данных без существенного снижения точности.

Результаты оптимизации сформированного псевдо-LiDAR облака точек с применением фильтрации и воксельной дискретизации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение облаков точек до и после оптимизации

Параметр	Исходное облако	После Voxel Grid	После SOR-фильтра
Количество точек	3,5 млн	1,2 млн	0,97 млн
Размер файла	420 МБ	130 МБ	108 МБ
Средняя точность	$\pm 1,6$ см	$\pm 1,8$ см	$\pm 1,7$ см
Время обработки	–	4,2 мин	2,6 мин

Для совместного анализа визуальных и геометрических признаков выполняются приведение данных к единой системе координат, интерполяция глубины и её нормализация. Формируется мультимодальный тензор:

$$F = [R, G, B, D'],$$

где  $D'$  – нормализованная карта глубины, приведённая к безразмерному диапазону [0; 1] для обеспечения совместимости с RGB-каналами и устойчивости обучения нейросетевой модели.

Сегментация дефектов выполняется архитектурой U-Net с мультимодальным входом. Использование глубины повышает точность локализации деформаций, особенно пространственных [8].

Сравнение точности сегментации при использовании различных архитектур U-Net и разных типов входных данных приведено в табл. 3.

После сегментации выполняется количественная оценка повреждений на основе глубины:

$$V = \sum_i (D_0(i) - D(i)) \cdot S,$$

где  $D_0$  – эталонная глубина (до ЧС);  $D$  – текущая глубина;  $S$  – площадь пикселя в физическом масштабе.

Таблица 3

Сравнение точности разных вариантов сегментации

Модель	Входные данные	IoU по дефектам пути	IoU по балласту	IoU по конструкциям
U-Net	RGB	0,72	0,63	0,55
U-Net++	RGB	0,78	0,66	0,58
U-Net (мульти-модальная)	RGBD	<b>0,85</b>	<b>0,73</b>	<b>0,67</b>

Дополнительно используется нормализованная разность глубин:

$$\Delta D = D_{\text{норма}} - D_{\text{факт}},$$

где  $D_{\text{норма}}$  – модель эталонного профиля пути, а  $D_{\text{факт}}$  – измеренная глубина, что позволяет выявлять критические просадки земляного полотна.

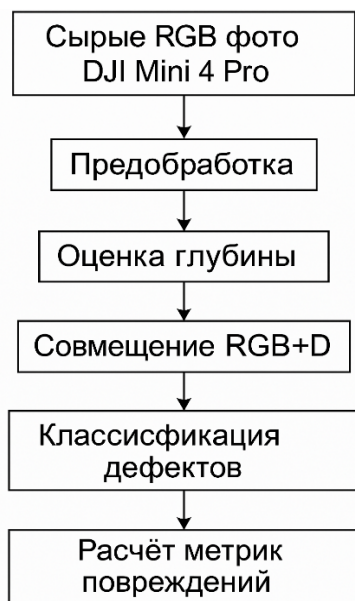


Рис. 1. Общий конвейер обработки данных RGB-D, полученных с БПЛА DJI Mini 4 Pro

Таким образом, объединение фотограмметрии, нейросетевой оценки глубины и мультимодальной сегментации обеспечивает возможность метрической диагностики железнодорожной инфраструктуры на основе данных лёгкого БПЛА без применения специализированных лидарных сенсоров.

**3. Алгоритмы сегментации и детекции дефектов железнодорожной инфраструктуры на основе мультимодальных данных RGB-D.** Автоматическая детекция дефектов является ключевым этапом обработки данных, получаемых с лёгких БПЛА. В условиях отсутствия аппаратного LiDAR качество анализа определяется корректным совмещением RGB-данных с восстановленной глубиной. Мультимодальное представление повышает точность выявления просадок земляного полотна, разрушений балластной призмы, деформаций рельсов и нарушений геометрии пути.

Общий вычислительный контур включает предварительную обработку изображений, формирование RGB-D-представления, сегментацию областей интереса и последующую классификацию дефектов (см. рис. 1).

Сегментация выполняется архитектурой U-Net с отдельным входом для карты глубины и усиленными skip-connections, обеспечивающими сохранение пространственной детализации. Адаптация модели под разрешение 4K позволяет корректно работать с данными аэрофотосъёмки.

В табл. 4 демонстрируется влияние мультимодальности RGB+D на сегментацию.

Мультимодальный вариант демонстрирует прирост точности на 12-18 % по сравнению с использованием только RGB-канала.

После выделения областей интереса выполняется классификация дефектов с применением CNN-классификатора, обученного на размывах пути, разрушениях балласта, трещинах и деформациях рельсов.

В табл. 5 приведена матрица ошибок, характеризующая качество классификации на тестовой выборке.

Таблица 4

## Влияние входных данных на точность сегментации (IoU)

Тип входных данных	Просадки и размывы	Балластная призма	Деформация рельсов	Динамические препятствия
RGB	0,74	0,67	0,58	0,61
Глубина (D)	0,41	0,59	0,44	0,47
RGB + D	0,87	0,79	0,68	0,72

Таблица 5

## Матрица ошибок классификатора дефектов

Факт/Предсказание	Размыв, %	Балласт, %	Трещина, %	Дефект рельса, %
Размыв	93	5	1	1
Балласт	7	88	4	1
Трещина	3	2	91	4
Деформация рельса	1	1	6	92

Профиль глубины на участке деформации представлен на рис. 2.

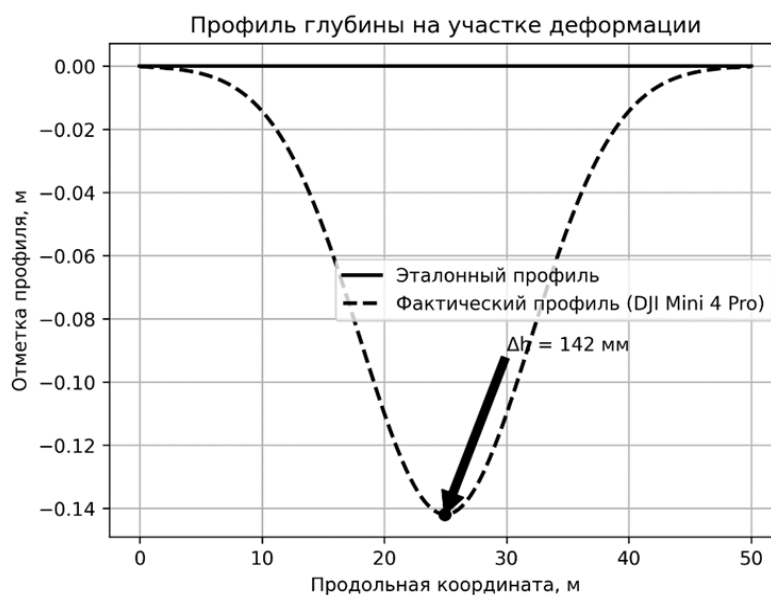


Рис. 2. Профиль глубины на участке деформации

Максимальное вертикальное отклонение составило

$$\Delta h_{\max} = 142 \text{ мм},$$

что классифицируется как критическая просадка земляного полотна.

Для расчёта объёма разрушений использовалась формула

$$V = \sum_i \Delta D(i) \cdot S,$$

где  $S$  — физическая площадь пикселя.

В табл. 6 приведён пример вычисления объёма разрушений по сегменту пути.

Дополнительно проведена оценка устойчивости алгоритмов к внешним факторам: освещённости, осадкам и вибрациям.



Таблица 6

Вычисление объёма разрушений по сегменту пути

Параметр	Значение
Длина обследованного сегмента	32 м
Ширина захвата	6,1 м
Средняя просадка	0,14 м
Объём разрушения	27,3 м <sup>3</sup>

В табл. 7 приведено влияние факторов на показатели точности модели.

Таблица 7

Влияние внешних факторов на точность сегментации и классификации

Условие	IoU сегментации	Точность классификации	Комментарий
Яркое солнце	0,86	0,94	Присутствуют тени
Пасмурно	0,88	0,96	Лучшие результаты
Туман (лёгкий)	0,76	0,89	Снижение текстурной информативности
Дождь	0,71	0,82	Требуется фильтрация
Ветер 7-9 м/с	0,74	0,87	Возможен смаз изображения

Полученные результаты подтверждают, что мультимодальный подход обеспечивает более устойчивую сегментацию и метрическую оценку повреждений по сравнению с использованием только RGB-данных.

**4. Экспериментальная проверка гибридного метода RGB-D на данных DJI Mini 4 Pro.**

Для подтверждения работоспособности предложенного метода совмещения RGB-изображений и псевдоглубины проведена серия экспериментальных испытаний. Целью являлась количественная оценка точности и устойчивости алгоритма при различных условиях съёмки и разной степени выраженности дефектов земляного полотна и рельсовой решётки. Все данные получены в ходе реальных полётов БПЛА DJI Mini 4 Pro.

Испытания проводились на участке длиной около 60 м с зафиксированными неровностями рельефа и деформациями балластной призмы. Высота полёта составляла 12-15 м при наземном разрешении 1,5-2,0 см/пиксель. Перекрытие снимков достигало 80 %, что обеспечивало корректное восстановление псевдоглубины.

После выгрузки выполнялись коррекция экспозиции, подавление шумов и нормализация глубины. Для повышения устойчивости глубинной карты применялась сглаживающая функция:

$$D_{smooth}(x, y) = \alpha D(x, y) + (1 - \alpha) \bar{D}_{N(x,y)},$$

где  $\bar{D}_{N(x,y)}$  – средняя глубина в окрестности пикселя,  $\alpha = 0,65$ .

Гибридная RGB-D-сегментация продемонстрировала повышение средней IoU-метрики с 0,79 (RGB-U-Net) до 0,88 (RGB-D-U-Net). Наибольший прирост наблюдался для классов «просадка» и «размыв», где глубинная информация играет определяющую роль.

Погрешность определения границ дефектов по вручную размеченным данным снизилась с 42 мм до 19 мм.

Анализ продольного профиля глубины подтвердил наличие выраженной деформации земляного полотна.

Максимальное отклонение составило 142 мм, что соответствует критической категории просадки и требует оперативного вмешательства.

Полное время обработки миссии из 350 кадров составило около 4 мин.

Таким образом, обеспечивается практически «почти реальное время» анализа, что особенно важно при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

**Заключение.** Проведённое исследование подтвердило, что использование гибридных методов обработки, основанных на совмещении RGB-изображений и псевдоглубины, позволяет существенно повысить точность диагностики состояния железнодорожной инфраструктуры при применении лёгких БПЛА. Несмотря на отсутствие аппаратного LiDAR-модуля, DJI Mini 4 Pro обеспечивает достаточное качество аэрофотосъёмки для построения устойчивой глубинной модели и последующей сегментации дефектов.

Экспериментальные результаты показали прирост точности детекции на 10-15 %, снижение погрешности локализации дефектов почти вдвое и возможность восстановления продольных профилей глубины с метрической интерпретацией. Полученные значения объёма разрушений и максимального отклонения подтверждают применимость метода для инженерной оценки степени повреждений [9].

Алгоритмический конвейер демонстрирует высокую вычислительную эффективность и может быть использован в полевых условиях в составе мобильных комплексов мониторинга и при обследовании аварийных участков. Предложенный подход создаёт основу для интеграции данных БПЛА в BIM- и ГИС-системы и дальнейшего развития цифровых двойников железнодорожной инфраструктуры.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением устойчивости нейросетевых моделей к неблагоприятным погодным условиям, интеграцией данных наземных сенсоров и развитием распределённых систем мониторинга на основе группы БПЛА [10].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Guerrero D., Sánchez-Jiménez D., Hernandez López D., Barbero-García I. A Robust Tool for 3D Rail Mapping Using UAV Data Photogrammetry, AI and CV: qAicedrone-Rail // Drones. 2025. Vol. 9, no. 3. Art. 197. DOI: 10.3390/drones9030197.
2. Wallner M., Steininger D., Widhalm V. RGB-D railway platform monitoring and scene understanding for enhanced passenger safety // arXiv preprint. 2021. arXiv:2102.11730. URL: <https://arxiv.org/abs/2102.11730>.
3. Dominguez Sanchez R. D., Diaz Ortiz X. LiDAR-guided monocular 3D object detection for long-range railway monitoring // arXiv preprint. 2025. arXiv:2504.18203. URL: <https://arxiv.org/abs/2504.18203>.
4. Aela P., Jiafu C., Guoqing J., Chi Hung-Lin I. Vision-based monitoring of railway superstructure: A review: Construction and Building Materials // Railway Engineering. 2024. Art. 442. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137385.
5. Ivashov, S. I., Tataraidze, A. B., Razevig, V. V. and Smirnova, E. S. (2019) Railway Transport Infrastructure Monitoring by UAVs and Satellites. Journal of Transportation Technologies, 2019, Vol. 9, pp. 342-353. URL: <https://doi.org/10.4236/jtts.2019.93022>.
6. Engineering the future: A deep dive into remote inspection and reality capture for railways // Lecture Notes in Civil Engineering. Springer, 2024. Vol. 357. P. 211–229. DOI: 10.1007/978-3-031-49589-2\_12.
7. Сацюк, А. В. Мониторинг инфраструктуры на основе искусственного интеллекта / А. В. Сацюк // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 9. – С. 32-34.
8. Липанов, И. Д. Цифровые двойники железнодорожной инфраструктуры на основе данных лёгких БПЛА / И. Д. Липанов, А. Д. Хомоненко // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. – 2025. – Т. 17. – № 2. – С. 98-107. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovyye-dvoyniki-zheleznodorozhnoy-infrastruktury-na-osnove-dannyh-lyogkih-bpla> (дата обращения: 09.12.2025). – Текст: электронный.
9. Липанов, И. Д. Интеграция и передача данных с БПЛА при мониторинге и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на железнодорожной инфраструктуре / И. Д. Липанов, А. Д. Хомоненко // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 10. – С. 112-121. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-i-pereдача-dannyh-s-bpla-pri-monitoringe-i-likvidatsii-posledstviy-chrezvychaynyh-situatsiy-na-zheleznodorozhnoy> (дата обращения: 11.12.2025). – Текст: электронный.
10. Ranftl R., Lasinger K., Hafner D., Schindler K., Koltun V. Towards Robust Monocular Depth Estimation: Mixing Datasets for Zero-shot Cross-dataset Transfer: arXiv preprint // Computer Science. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.1907.01341.



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

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ШУМОВ И ПРОПУСКОВ ДАННЫХ НА КАЧЕСТВО НЕЙРОСЕТЕВОГО РАНЖИРОВАНИЯ

## INFLUENCE OF VARIOUS TYPES OF NOISES AND DATA MISSINGS ON THE QUALITY OF NEURAL NETWORK RANKING

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

**Аннотация.** В научной статье рассматривается влияние различных типов текстового шума и пропусков данных на качество нейросетевого ранжирования в задачах релевантного поиска по крупным коллекциям. Предлагается формальная схема задания искажений запросов и документов, и вводится интегральный показатель относительной деградации метрик качества. На экспериментальной коллекции с трёхуровневой разметкой релевантности сравнивается несколько архитектур нейросетевых моделей (включая трансформерную) при различных сценариях шума. Показано, что трансформерные модели демонстрируют более высокую устойчивость к искажениям по сравнению с базовыми архитектурами, что позволяет рекомендовать их для применения в поисковых системах, работающих с шумными и неполными текстовыми данными.

**Summary.** This article examines the impact of various types of text noise and missing data on the quality of neural network ranking in relevance search tasks across large collections. A formal framework for defining query and document distortions is proposed and an integral indicator of the relative degradation of quality metrics is introduced. Several neural network model architectures (including the transformer one) are compared under different noise scenarios using an experimental collection with three-level relevance labeling. It is shown that transformer models exhibit higher resistance to distortions compared to basic architectures, which allows them to be recommended for use in search engines working with noisy and incomplete text data.

**Ключевые слова:** информационный поиск, нейросетевое ранжирование, релевантность, текстовый шум, пропуски данных, робастность моделей, метрики MAP, MRR, NDCG.

**Key words:** Information retrieval, neural network ranking, relevance, text noise, missing data, model robustness, MAP, MRR, NDCG.

УДК 004.832.2:004.58

**Введение.** В последние годы стремительное накопление текстовых данных в электронном виде делает задачу эффективного поиска информации одной из ключевых для современных информационных систем. Центральное место в её решении занимают технологии релевантного поиска, предназначенные для выдачи пользователю документов, наилучшим образом соответствующих его информационной потребности [1]. Замена традиционных алгоритмов ранжирования на методы, основанные на глубоких нейронных сетях, привела к существенному росту качества поисковых систем, прежде всего за счёт более тонкого учёта скрытых семантических связей между формулировками запросов и содержанием документов.

Однако при использовании подобных моделей в реальных промышленных сценариях существенно проявляется проблема качества входных данных. В типичных коллекциях текстов неизбежно присутствуют опечатки, устаревшие или лишь частично обновлённые фрагменты, неоднородные форматы представления содержимого, а также структурные «дыры», возникающие при автоматизированном сборе, агрегации и предобработке больших массивов документов. В совокупности эти особенности ведут к появлению различных видов шума и неполноты данных, что непосредственно отражается на стабильности и точности работы моделей релевантного поиска.

Исследовательское внимание в области нейросетевого ранжирования в основном сосредоточено на сравнении архитектур и стратегий обучения в условиях аккуратно подготовленных, относительно «чистых» и полно размеченных выборок [2]. При этом аспект устойчивости нейросетевых ранжировщиков к искажениям входной информации изучен значительно менее подробно. На практике шум и пропуски чаще всего трактуются как негативный побочный фактор, который следует по возможности устранить на этапе предобработки коллекции, или же учитываются лишь частично, без систематического анализа их влияния на итоговые метрики качества. В результате остаётся неясным, насколько различные архитектуры нейросетевых моделей чувствительны к тому или иному типу искажений и какие именно решения оказываются более предпочтительными в условиях существенно зашумлённых, неполных данных, характерных для реальных систем поиска по большим данным.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время отсутствует устоявшаяся методика, позволяющая систематически оценивать и сопоставлять нейросетевые модели ранжирования по степени их устойчивости к искажениям входных данных. Для разработчиков и операторов поисковых систем важен не только максимально возможный уровень метрик на искусственно «вычищенных» тестовых коллекциях, но и характер работы модели в условиях, близких к эксплуатационным: при наличии опечаток и неточных формулировок в запросах, при усечении текстов и выпадении отдельных полей документа, а также при наличии случайных и систематических ошибок, возникающих в процессе автоматического сбора, индексации и обновления корпусов. Отсутствие количественно определённых показателей такой робастности существенно осложняет рациональный выбор архитектуры нейросетевого ранжировщика и стратегии его обучения для конкретных практических задач.

В этой связи целью работы является экспериментальное исследование того, как различные виды шума и неполноты данных отражаются на качестве нейросетевого ранжирования в задаче релевантного поиска. Разрабатываются подход к параметрическому заданию шума и пропусков как в текстах запросов, так и в представлениях документов, а также методика экспериментальной оценки робастности ряда современных архитектур нейросетевых моделей. На базе полученных экспериментальных данных выполняется сравнительный анализ чувствительности разных архитектур к тем или иным типам искажений и формулируются практико-ориентированные рекомендации по выбору модели и настройке процесса обучения для поисковых систем по большим данным, функционирующих в условиях неизбежного шума и неполноты входных текстов.

В дальнейших экспериментах для каждого типа искажений вводился числовой параметр интенсивности шума, интерпретируемый как доля модифицированных элементов текста:

- для сценариев с опечатками и заменами символов  $\alpha$  определялся как доля слов в запросе (или документе), в которые вносились случайные изменения;
- для сценариев усечения текстов  $\alpha$  задавал долю удалённых токенов от исходной длины;
- для сценариев выпадения полей документа  $\alpha$  равнялся доле отсутствующих полей от полного набора.

Таким образом, одно и то же значение  $\alpha$  (например,  $\alpha = 0,3$ ) означает, что искажения затрагивают около 30 % текстовой информации независимо от конкретного типа шума. Это обеспечивает сопоставимость результатов для различных типов и уровней шума и позволяет корректно сравнивать устойчивость моделей по единой шкале.

**Формальная постановка задачи.** Рассматривается задача релевантного поиска по коллекции документов  $D$ . Пользовательский запрос обозначим через  $q$ , документ из коллекции – через

$d \in D$ . Нейросетевая модель ранжирования задаётся как функция  $f_\theta(q, d)$ , которая каждой паре «запрос  $q$  – документ  $d$ » сопоставляет скалярную оценку релевантности. Здесь  $\theta$  обозначает совокупность параметров (весов) нейронной сети. Чем больше значение  $f_\theta(q, d)$ , тем выше предполагаемая релевантность документа  $d$  запросу  $q$ ; ранжирование строится по убыванию значений этой функции. Параметры  $\theta$  подбираются по обучающей выборке размеченных пар  $(q, d, y)$ , где  $y$  – истинная метка релевантности путём минимизации заданной функции потерь. В дальнейшем под качеством нейросетевого ранжирования будем понимать качество работы функции  $f_\theta(q, d)$ , измеряемое стандартными метриками информационного поиска. В контексте настоящей работы нас интересует не только базовое качество  $f_\theta(q, d)$  на «чистых» данных, но и изменение значений метрик при искажении входной информации. Это можно рассматривать как замену исходных входов  $(q, d)$  на зашумлённые варианты  $(\tilde{q}, \tilde{d})$  и анализ поведения функции  $f_\theta(\tilde{q}, \tilde{d})$  по сравнению с  $f_\theta(q, d)$ .

**Обзор существующих решений.** Исторически развитие алгоритмов релевантного поиска опиралось прежде всего на классические вероятностные и векторные схемы информационного поиска. К ним относятся, в частности, BM25 и различные языковые модели, в рамках которых запросы и документы кодируются как разреженные векторы признаков, а оценка соответствия строится на основе частотной статистики терминов и параметров коллекции [3]. Подобные решения до сих пор остаются основой большинства промышленных поисковых систем: их легко реализовать, несложно масштабировать и относительно просто интерпретировать. Вместе с тем такие модели фактически ограничены поверхностным учётом лексики и слабо справляются с задачами, связанными с синонимичностью, многозначностью терминов и разнообразием языковых форм.

Появление и широкое распространение распределённых представлений слов и текстов (word embeddings) – векторных численных представлений лексических единиц в непрерывном пространстве признаков, таких как word2vec (нейросетевой алгоритм для обучения векторных представлений слов по контексту их употребления), GloVe (Global Vectors for Word Representation – метод, использующий глобальную статистику совместной встречаемости слов в корпусе текстов) и doc2vec (расширение word2vec для получения векторных представлений целых документов и предложений) – открыло возможность перехода к более информативным и плотным признаковым описаниям текстов. Это, в свою очередь, создало основу для широкого применения нейросетевых подходов (методов машинного обучения на основе искусственных нейронных сетей) к задачам релевантного поиска (поиска документов, наилучшим образом соответствующих информационной потребности пользователя) и ранжирования (упорядочивания документов по степени их предполагаемой релевантности запросу) [4].

Современные нейросетевые ранжировщики образуют несколько условных групп. Одним из первых направлений стали модели, строящие совместное встраивание запросов и документов в общее латентное пространство (модели типа DSSM – Deep Structured Semantic Model, т. е. «глубокая структурированная семантическая модель», и её модификации), где релевантность определяется по близости векторов запросов и документов в этом пространстве. Далее появились архитектуры, специально ориентированные на явное моделирование взаимодействия между единицами текста, такие как DRMM (Deep Relevance Matching Model – «глубокая модель релевантного сопоставления»), KNRM (Kernel-based Neural Ranking Model – «нейросетевая ранжирующая модель на основе ядерных функций»), Conv-KNRM (Convolutional KNRM – «свёрточное расширение модели KNRM»), – в них анализируются распределения мер сходства между словами запроса и документа, а затем эти распределения агрегируются нейронной сетью. Отдельный класс составляют решения на основе рекуррентных и свёрточных сетей: CNN (Convolutional Neural Network – «свёрточная нейронная сеть»), LSTM (Long Short-Term Memory – «длинная краткосрочная память», разновидность рекуррентной сети), BiLSTM (Bidirectional LSTM – «двунаправленная LSTM» в сочетании с механизмами внимания), – которые позволяют учитывать порядок слов и локальный контекст при построении представлений запросов и документов.

Качественно новый этап связан с внедрением предобученных трансформерных моделей (глубоких нейросетевых архитектур на основе механизма внимания, заранее обученных на больших корпусах текстов), прежде всего, модели BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers – «двунаправленные кодирующие представления на основе трансформеров») и её последующих модификаций. Эти модели используются в двух основных режимах.

Во-первых, в качестве cross-encoder-архитектур (кросс-энкодеров), когда запрос и документ объединяются в одну входную последовательность и обрабатываются совместно одной и той же моделью; в этом случае на выходе трансформера формируется общее представление пары «запрос-документ», из которого затем вычисляется оценка релевантности.

Во-вторых, в рамках dual-encoder-подходов (двойных энкодеров), где запросы и документы кодируются раздельно двумя (как правило, однотипными) энкодерами. В результате для каждого запроса и каждого документа получаются их эмбединги (векторные представления в непрерывном признаковом пространстве), которые далее сравниваются с помощью простой меры близости (например, косинусного сходства или скалярного произведения) для получения оценки релевантности.

Параллельно с развитием нейросетевых архитектур для представления текстов активно исследуется использование глубоких моделей внутри парадигмы learning to rank («обучение ранжированию») – класса методов машинного обучения, специально ориентированных на построение функций упорядочивания объектов (в нашем случае документов) по степени релевантности запросу [5]. В таком подходе нейронная сеть выступает в роли универсального аппроксиматора в рамках классических схем обучения:

- pointwise-подход – «покомпонентное» обучение, когда для каждого документа по отдельности предсказывается его оценка релевантности;
- pairwise-подход – парное обучение, в котором модель учится сравнивать пары документов (какой из двух более релевантен запросу);
- listwise-подход – списковое обучение, где модель оптимизирует качество ранжирования сразу для всего списка документов, рассматриваемого целиком.

Параметры модели подбираются путём минимизации специально сконструированной функции потерь (loss function), напрямую связанной с задачей упорядочивания документов; за счёт этого удаётся улучшать ключевые поисковые метрики по сравнению с традиционными алгоритмами ранжирования. К таким метрикам относятся:

- MAP (Mean Average Precision – средняя точность) – измеряет усреднённую по запросам точность поиска с учётом положения всех релевантных документов;
- MRR (Mean Reciprocal Rank – среднее значение обратного ранга) – показывает, насколько высоко в среднем в выдаче появляется первый релевантный документ;
- NDCG (Normalized Discounted Cumulative Gain – нормализованный дисконтированный кумулятивный выигрыш) – оценивает качество ранжирования с учётом как степени релевантности документов, так и их позиций в списке.

В качестве основной списковой метрики используется показатель NDCG@10 (Normalized Discounted Cumulative Gain at 10, нормализованный дисконтированный кумулятивный выигрыш на глубине 10 выдачи). Для фиксированного запроса  $q$  и упорядоченного списка документов на позиции  $k$  определяется дисконтированный кумулятивный выигрыш:

$$DCG@10 = \sum_{k=1}^{10} \frac{2^{rel_k} - 1}{\log_2(k + 1)},$$

где  $rel_k$  – истинная оценка релевантности документа на позиции  $k$ . Нормализация осуществляется делением на максимум, достигаемый при «идеальном» ранжировании документов по невозрастающей релевантности:

$$NDCG@10 = \frac{DCG@10}{IDCG@10}.$$

Значения  $NDCG@10$  лежат в диапазоне  $[0,1]$ : значение 1 соответствует полностью корректному ранжированию (идеальный порядок документов в топ-10), значения, близкие к 0, отражают практически полностью неверный порядок.

Для сопоставления поведения моделей при разных типах и уровнях шума дополнительно используется нормированный показатель относительной деградации метрики качества:

$$\Delta m(\alpha) = \frac{m_0 - m(\alpha)}{m_0},$$

где  $m_0$  – значение метрики (MAP, MRR или  $NDCG@10$ ) на «чистых» данных, а  $m(\alpha)$  – значение той же метрики при уровне шума  $\alpha$ , заданном в соответствии с описанной выше схемой.

Поскольку и параметр  $\alpha$ , и величина  $\Delta m(\alpha)$  нормированы в диапазоне  $[0,1]$ , полученные кривые для различных типов шума напрямую сопоставимы: большее значение  $\Delta m(\alpha)$  при фиксированном  $\alpha$  соответствует более сильному ухудшению качества ранжирования.

Существенную роль в эффективности таких систем играет выбор архитектуры нейросети, вида целевой функции (конкретной формы функции потерь) и правил формирования обучающих пар, триплетов (например, «запрос – релевантный документ – нерелевантный документ») или списков документов. Это даёт возможность тонко подстраивать модель под особенности конкретного предметного домена и прикладного сценария использования поисковой системы.

Отдельный блок работ посвящён вопросу устойчивости систем информационного поиска к искажениям и загрязнению данных. В рамках классического IR (Information Retrieval, информационного поиска) исследовалась робастность алгоритмов к вариативности формулировок запросов, неполному или неточному индексированию, а также к присутствию шумовых и нерелевантных документов в коллекции. На этапе предобработки традиционно применяются методы нормализации текста, коррекции опечаток, удаления дубликатов и фильтрации спама, призванные максимально снизить влияние шума ещё до стадии ранжирования.

На фоне стремительного распространения нейросетевых методов сформировалась отдельная ветвь исследований, посвящённая adversarial-воздействиям (adversarial attacks – преднамеренным «враждебным» вмешательствам в работу модели) и анализу устойчивости (robustness) моделей глубокого обучения к небольшим, но целенаправленным модификациям входных данных. Под adversarial-примером понимают специально сконструированный вход (изображение, текстовый запрос, документ и т. п.) с минимальными по величине изменениями по сравнению с исходным, которые, однако, приводят к существенному искажению ответа модели.

Однако подавляющая часть этих работ фокусируется на задачах классификации изображений и текстов (image/text classification), тогда как аспекты робастности (robustness – устойчивости к таким perturbations, т. е. возмущениям входа) именно ранжировочных моделей и поисковых систем (information retrieval systems) в целом до сих пор освещены существенно менее подробно.

В рамках нейросетевого релевантного поиска уже опубликован ряд работ, в которых изучается влияние качества сигналов обучения на поведение ранжирующих моделей: анализируются последствия ошибок ручной разметки, шумных кликов и неполных логов пользовательских действий. В этих исследованиях предлагаются различные механизмы работы с ненадёжными метками – от модификации функции потерь и введения специальных весов до процедур отбраковки или переоценки подозрительных наблюдений.

При этом гораздо меньше внимания уделяется систематическому анализу того, как собственно текстовый шум и структурная неполнота запросов и документов отражаются на работе современных нейросетевых архитектур ранжирования. Во многих случаях наличие шумовых фрагментов и пропусков трактуется как нежелательный, но побочный аспект, который стремятся устранить на этапе предобработки, а устойчивость моделей описывается лишь в виде отдельных иллюстративных кейсов без строгой количественной оценки.

В совокупности имеющиеся результаты подтверждают высокий потенциал нейросетевых методов в задачах релевантного поиска и демонстрируют широкий спектр применяемых архитектур – от относительно простых двусторонних кодировщиков до сложных трансформерных систем.

Однако проблема формализованной, сопоставимой оценки их робастности к различным формам шума и неполноты данных, характерным для реальных систем больших данных, остаётся изученной явно недостаточно.

Именно этот методологический разрыв и лежит в основе рассматриваемой работы: в ней предлагается формальная модель влияния искажений входной информации на качество ранжирования и разрабатывается экспериментальная процедура, позволяющая количественно сравнивать устойчивость различных нейросетевых подходов к релевантному поиску.

**Постановка задачи.** Задача релевантного поиска формализуется как задача ранжирования множества документов по степени их соответствия пользовательскому запросу [6]. Пусть задано множество запросов  $Q = \{q_1, \dots, q_N\}$  и множество документов  $D = \{d_1, \dots, d_M\}$ . Для каждой пары «запрос-документ»  $q_i, d_j$  определяется показатель релевантности  $r_{ij}$ , который в зависимости от используемой коллекции может быть бинарным (релевантен/нерелевантен) или принимать несколько градаций («нерелевантен», «частично релевантен», «полностью релевантен»). Целью системы поиска является построение такой функции ранжирования, которая для каждого запроса  $q_i$  упорядочивает документы  $d_j$  по убыванию их истинной релевантности  $r_{ij}$ .

В качестве аппроксиматора функции ранжирования рассматривается нейросетевая модель, задаваемая параметрической функцией:

$$f_{\theta}(q, d),$$

где  $\theta$  – вектор параметров (весов) модели.

Для каждого запроса  $q_i$  и документа  $d_j$  модель вычисляет численную оценку релевантности  $s_{ij} = f_{\theta}(q_i, d_j)$ , на основании которой формируется порядок документов в выдаче для данного запроса.

Текстовые объекты предварительно отображаются в численное пространство посредством функций представления. Запросу  $q_i$  сопоставляется вектор признаков  $x_i = \varphi_q(q_i)$ , документу  $d_j$  – вектор  $y_j = \varphi_d(d_j)$ , после чего модель фактически реализует отображение  $f_{\theta}(x_i, y_j) \rightarrow s_{ij}$ .

Обучение модели проводится по размеченной выборке пар (или троек) «запрос-документ» с известными значениями релевантности. В зависимости от выбранной схемы learning to rank используется pointwise, pairwise или listwise постановка.

После отображения текстов запросов и документов в признаковое пространство обучающая выборка задаётся множеством троек

$$\{(x_i, y_j, r_{ij})\},$$

где  $x_i = \varphi_q(q_i)$  – вектор признаков запроса,  $y_j = \varphi_d(d_j)$  – вектор признаков документа, а  $r_{ij}$  – известная метка их релевантности. Нейросетевая модель ранжирования определяется функцией  $f_{\theta}(x_i, y_j)$ , которая для каждой пары «запрос-документ» выдаёт оценку релевантности. Параметры модели подбираются путём минимизации агрегированной функции потерь на всей обучающей выборке:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \sum_{(i,j)} l(f_{\theta}(x_i, y_j), r_{ij}),$$

где  $l$  – выбранная функция потерь.

В простейшем pointwise-подходе формируется множество обучающих примеров  $\{(x_i, y_j, r_{ij})\}$  и параметры модели подбираются путём минимизации агрегированной функции потерь вида

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \sum_{(i,j)} l(f_{\theta}(x_i, y_j), r_{ij}).$$

В pairwise-подходе рассматриваются пары документов для одного запроса, для которых известно, что один документ более релевантен, чем другой. Обучающая выборка имеет вид

$$(x_i, y_j^+, y_k^-),$$

где документ  $d_j^+$  релевантен запросу  $q_i$  в большей степени, чем  $d_k^-$ . В этом случае модель обучается минимизировать функцию потерь, зависящую от разности оценок

$$s_{ij}^+ - s_{ik}^-,$$

что способствует формированию корректного относительного порядка документов.

Независимо от выбранной схемы обучения качество полученной модели оценивается с использованием стандартных метрик информационного поиска, таких как MAP, MRR и NDCG, вычисляемых на тестовой выборке запросов с известной релевантностью документов.

Для исследования влияния шума и пропусков данных вводится формализованное описание искажений входной информации. Исходные тексты запросов и документов могут подвергаться воздействию преобразований, моделирующих различные типы шума: опечатки и случайные модификации слов, усечение текста до ограниченной длины, удаление отдельных структурных полей (заголовков, аннотаций, атрибутов), подмешивание нерелевантных фрагментов и т. п. Эти преобразования задаются оператором  $T_\alpha$ , действующим в пространстве текстов и параметризованным вектором  $\alpha$ , характеризующим тип и интенсивность искажений.

Для документов оператор шума задаётся как

$$\tilde{d}_j = T_\alpha^d(d_j),$$

для запросов – как

$$\tilde{q}_i = T_\alpha^q(q_i).$$

При этом отдельно выделяется параметр уровня шума  $\rho \in [0,1]$ , который может интерпретироваться как доля изменённых токенов, удалённых фраз или пропущенных полей. В экспериментах рассматриваются несколько фиксированных значений  $\rho$  и набор типов шума, соответствующих различным сценариям ухудшения качества данных.

С учётом введённых искажений нейросетевая модель фактически работает не с исходными, а с модифицированными текстами. На этапе инференса вместо  $q_i$  и  $d_j$  используются  $\tilde{q}_i$  и  $\tilde{d}_j$ , для которых формируются векторные представления:

$$\tilde{x}_i = \varphi_q(\tilde{q}_i), \quad \tilde{y}_j = \varphi_d(\tilde{d}_j),$$

а затем вычисляются оценки релевантности:

$$\tilde{s}_{ij} = f_\theta(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j).$$

Соответствующее качество ранжирования при заданном уровне и типе шума характеризуется значением метрики

$$M(f_\theta; \rho, \tau),$$

где  $\tau$  обозначает выбранный тип шума (текстовый шум в запросах, усечение документов, удаление полей и др.). Таким образом, исследование фокусируется на зависимости качества работы нейросетевой функции ранжирования от параметров искажений входных данных.

Устойчивость конкретной архитектуры можно количественно характеризовать через относительное падение качества при переходе от чистых данных к искажённым в виде показателя  $\Delta M(\rho_0, \tau)$ , определяемого как нормированная разность значений метрики на уровне шума  $\rho_0$  и при  $\rho = 0$ . Сопоставление значений этой величины для различных моделей и сценариев шума позволяет проводить формальный анализ их робастности и делать выводы о предпочтительности тех или иных архитектур нейросетевого ранжирования в условиях шумных и неполных данных.

**Эксперимент.** Экспериментальная часть работы была выполнена на коллекции запросов и документов. В выборку вошло порядка 500 различных пользовательских запросов и около 1000 документов; для подмножества пар «запрос-документ» имелись экспертные оценки релевантности по трёхуровневой шкале (0 – нерелевантный документ, 1 – частично релевантный, 2 – полностью релевантный).

Для последующей корректной оценки качества ранжирования коллекция была разбита на три непересекающихся подмножества на уровне запросов: приблизительно 70 % запросов использовались для обучения моделей, 10 % – для подбора гиперпараметров (валидация), и оставшиеся 20 % – для итогового тестирования. При разбиении соблюдалось требование, чтобы все документы, связанные с конкретным запросом, целиком попадали только в одну из подвыборок, что предотвращало утечку информации между стадиями обучения и оценки.

Для исследования использовались три архитектуры нейросетевых моделей ранжирования, реализующих функцию оценки релевантности пары «запрос-документ»

$$f_{\theta}(q, d) = f_{\theta}(x, y),$$

где  $x = \varphi_q(q)$ ,  $y = \varphi_d(d)$  – векторные представления запроса и документа.

В качестве базовой модели (далее M1) рассматривалась простая двухслойная полносвязная сеть над статическими эмбедингами [7]: для каждого запроса и документа вычислялся усреднённый по токенам вектор размерности 300, далее векторы конкатенировались и подавались на многослойный перцептрон (MLP) с одним скрытым слоем на 256 нейронов, в котором в качестве активационной функции использовался выпрямленный линейный элемент.

Вторая модель (M2) реализовывала подход с явным учётом взаимодействий: на основе токен-уровневых представлений строилась матрица попарных скалярных произведений между токенами запроса и документа, к которой далее применялась свёрточная сеть с последующим max-pooling и выходным полносвязным слоем [8].

Третья модель (M3) была построена на основе предобученного трансформера: запрос и документ объединялись в единую входную последовательность вида [CLS]  $q$  [SEP]  $d$  [SEP], где [CLS] – специальный служебный токен «classification», а [SEP] – токен-разделитель. Полученная последовательность пропускалась через BERT-подобную архитектуру [9] (двунаправленный трансформер-энкодер), после чего скрытое представление токена [CLS] на выходе последнего слоя подавалось на линейный выходной слой (полносвязный слой без нелинейности), формирующий скалярный скор релевантности – численную оценку степени соответствия документа заданному запросу.

Все три модели обучались в pairwise-постановке learning to rank. Обучающая выборка формировалась в виде троек

$$(x_i, y_j^+, y_k^-),$$

где документ  $d_j^+$  более релевантен запросу  $q_i$ , чем документ  $d_k^-$ , согласно исходным оценкам  $r_{ij}$ . В качестве функции потерь использовалась логистическая pairwise-функция:

$$l_{\text{pair}}(s_{ij}^+, s_{ik}^-) = \log(1 + \exp(-(s_{ij}^+ - s_{ik}^-))),$$

где  $s_{ij}^+$  и  $s_{ik}^-$  – оценки релевантности для более и менее релевантного документа соответственно. Оптимизация параметров  $\theta$  в каждом случае осуществлялась методом Adam (Adaptive Moment Estimation – алгоритм оптимизации, который используется для обучения нейронных сетей) с одинаковыми для всех моделей гиперпараметрами (начальный шаг обучения, коэффициенты  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , коэффициент L2-регуляризации). Обучение моделей проводилось на «чистых» данных, т. е. без добавления искусственного шума или adversarial-возмущений. После каждой эпохи обучения вычислялась метрика NDCG@10 на валидационной выборке (quality at top-10 результатов). Если в течение трёх последовательных эпох не наблюдалось улучшения значения NDCG@10, процесс обучения останавливался (ранняя остановка, early stopping). Для последующего анализа и экспериментов сохранялась та версия модели, которая показала наилучшее значение NDCG@10 на валидационном наборе.

Метрика NDCG@10 в данном случае агрегируется по всем запросам тестовой выборки усреднением, при этом более высокие значения (ближе к 1) соответствуют лучшему качеству ранжирования в топ-10 выдачи.

После обучения моделей на неизменённых данных проводилась серия экспериментов по оценке их устойчивости к искажениям входной информации. Искажения моделировались с помощью операторов шума  $T_\alpha^q$  и  $T_\alpha^d$ , действующих соответственно на тексты запросов и документов и параметризуемых вектором

$$\alpha = (\tau, \rho),$$

где  $\tau$  обозначает тип шума, а  $\rho \in [0,1]$  – его уровень.

Рассматривались три типичных сценария:

1. Текстовый шум в запросах (тип Q-Noise): часть токенов исходного пользовательского запроса случайным образом заменялась на другие токены из словаря или полностью удалялась, что имитирует опечатки, неточные формулировки и различные искажения ввода.

2. Усечение документов (тип D-Trunc): текст документа искусственно обрезался по длине, так что в модель поступала лишь начальная часть исходного содержимого; таким образом моделировались ситуации с неполной индексацией или ограничением длины входной последовательности.

3. Удаление структурных полей документа (тип D-FieldDrop): для каждого документа его заголовок, аннотация и/или часть основного текста с заданной вероятностью полностью исключались из входа модели, что позволяет оценить зависимость качества ранжирования от наличия отдельных структурных компонент документа.

Во всех случаях уровень шума  $\rho$  интерпретировался количественно:

1. для Q-Noise – как доля модифицированных токенов запроса;

2. для D-Trunc – как доля исходного текста, удалённого при усечении ( $\rho = 0,5$  соответствует сохранению только половины документа);

3. для D-FieldDrop – как вероятность удаления каждого из полей. В эксперименте рассматривались пять фиксированных уровней шума  $\rho \in \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5\}$ . Значение  $\rho = 0$  соответствовало исходным «чистым» данным и использовалось в качестве базового сценария для сравнения.

Для каждого типа шума  $\tau$  и каждого уровня  $\rho > 0$  исходные запросы  $q_i$  и документы  $d_j$  из тестовой выборки преобразовывались в модифицированные тексты  $\tilde{q}_i = T_\alpha^q(q_i)$ ,  $\tilde{d}_j = T_\alpha^d(d_j)$ . Далее вычислялись их векторные представления  $\tilde{x}_i = \varphi_q(\tilde{q}_i)$ ,  $\tilde{y}_j = \varphi_d(\tilde{d}_j)$ , после чего уже обученные модели рассчитывали оценки релевантности  $\tilde{s}_{ij} = f_\theta(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$  и формировали ранжированные списки документов для каждого запроса [11]. Чтобы снизить влияние случайности, связанной с генерацией шума, для каждого сочетания  $(\tau, \rho)$  процедура зашумления и оценки повторялась пять раз с разными начальными состояниями генератора случайных чисел, а итоговые значения метрик усреднялись по этим повторам.

Качество ранжирования во всех сценариях оценивалось по стандартным метрикам информационного поиска: средняя точность MAP, средний обратный ранг первого релевантного результата MRR и нормализованный дисконтированный кумулятивный выигрыш NDCG@10 [10]. Обозначим через  $M(f_\theta; \rho, \tau)$  значение выбранной метрики (NDCG@10), вычисленной на тестовой выборке при заданных типе и уровне шума. Базовое качество на чистых данных задаётся величиной  $M_0 = M(f_\theta; 0, \tau)$ . Для количественной характеристики устойчивости моделей к искажениям вводилась величина относительного падения качества:

$$\Delta M(\rho, \tau) = \frac{M_0 - M(f_\theta; \rho, \tau)}{M_0},$$

которая интерпретируется как доля утерянного качества при переходе от исходных данных к зашумлённым. Чем меньше  $\Delta M(\rho, \tau)$  при фиксированных  $\rho$  и  $\tau$ , тем более робастной считается модель к соответствующему типу шума.

В экспериментах рассматривались **3 типа шума** (способа искажения данных):

1. Q-Noise – искажение пользовательского запроса;

2. D-Trunc – усечение текстов документов;
3. D-FieldDrop – случайное «выбрасывание» отдельных полей документа.

Для каждого типа шума варьировался его уровень  $\rho$ , который задаёт долю зашумлённых объектов (например, долю искажённых токенов или документов). В частности,  $\rho = 0$  соответствует отсутствию шума (чистые данные), а  $\rho = 0,2$  – умеренному шуму, когда искажается около 20 % данных.

Для наглядности основные результаты были сведены в таблицы. В табл. 1 представлены значения  $NDCG@10$  для трёх моделей (M1, M2, M3) на чистых данных ( $\rho = 0$ ) и при умеренном уровне шума  $\rho = 0,2$  для всех трёх типов искажений (Q-Noise, D-Trunc, D-FieldDrop).

Таблица 1

Значения  $NDCG@10$  для моделей M1 – M3 при разных типах шума (уровень шума  $\rho = 0,2$ )

Модель	Без шума ( $\rho = 0$ )	Q-Noise ( $\rho = 0,2$ )	D-Trunc ( $\rho = 0,2$ )	D-FieldDrop ( $\rho = 0,2$ )
M1	0,35	0,28	0,27	0,29
M2	0,39	0,33	0,32	0,34
M3	0,43	0,39	0,38	0,40

Как видно из табл. 1, на чистых данных наилучшее качество демонстрирует трансформерная модель M3 ( $NDCG@10 \approx 0,43$ ), тогда как M1 и M2 уступают ей (0,35 и 0,39 соответственно). После введения шума  $\rho = 0,2$  все модели демонстрируют снижение качества, при этом падение наиболее заметно для базовой модели M1, наименее – для M3: при запросном шуме Q-Noise снижение  $NDCG@10$  для M1 составляет порядка 20 %, для M2 – около 15 %, а для M3 – порядка 9 % относительно базового уровня.

Показатели относительной деградации  $\Delta M(\rho, \tau)$  при различных уровнях шума  $\rho \in 0,1; 0,2; 0,3; 0,5$  позволяют сравнить робастность моделей на единичной шкале (см. табл. 2).

Таблица 2

Значения относительной деградации качества  $\Delta M(\rho, \tau)$  для моделей M1 – M3 при различных уровнях шума  $\rho$

Модель	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,2$	$\rho = 0,3$	$\rho = 0,5$
M1	0,08	0,15	0,24	0,40
M2	0,06	0,12	0,20	0,35
M3	0,03	0,06	0,10	0,22

Приведённые в табл. 1 и 2 результаты наглядно демонстрируют, как конкретные значения метрик качества и показатели относительной деградации зависят от типа архитектуры и интенсивности шума. По мере роста параметра шума расхождение между моделями M1 – M3 усиливается, причём трансформерная модель M3 стабильно сохраняет преимущество как по абсолютным значениям  $NDCG@10$ , так и по робастности, тогда как базовая модель M1 деградирует значительно быстрее. Таким образом, сравнение по единой шкале относительной потери качества позволяет корректно оценить устойчивость разных подходов к ранжированию в условиях искажённых данных.

**Заключение.** Был проведён комплексный анализ влияния различных типов шума и пропусков данных на качество нейросетевого ранжирования в задачах информационного поиска. Предложенная модель относительной деградации качества и серия экспериментов показали, что трансформерная архитектура существенно превосходит более простые модели как по исходным значениям метрик, так и по устойчивости к искажениям запросов и документов. Полученные результаты подтверждены статистически и могут служить практическими рекомендациями при выборе и настройке ранжировщиков для поисковых систем, работающих с шумными и неполными текстовыми коллекциями.



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Насташук, Н. А. Методы искусственного интеллекта в развитии информационно-поисковых систем / Н. А. Насташук // Перспективы развития информационных технологий. – 2011. – № 3-1. – С. 220-224.
2. Гаврилов, Д. А. Автоматизированная переработка визуальной информации с помощью технологий искусственного интеллекта / Д. А. Гаврилов, Д. А. Ловцов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2020. – № 4. – С. 33-46.
3. Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge University Press, 2008. 506 p.
4. Li H., Chen Y. Ranking and Relevance in Search Engines // Data Science Insights. – 2021. – Vol. 20, No. 7. – P. 145-159.
5. Ibrahim, O. A. S. An evolutionary strategy with machine learning for learning to rank in information retrieval / O. A. S. Ibrahim, D. Landa-Silva // Soft Computing – A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications. – 2018. – Vol. 22, No. 10. – P. 3171-3185.
6. Патент № 2744029 С1 Российская Федерация, МПК G06N 20/00. Система и способ формирования обучающего набора для алгоритма машинного обучения: № 2018147501: заявл. 29.12.2018; опубл. 02.03.2021 / Сафронов А. В., Антонова А. А., Мисюрёв А. В. [и др.]; заявитель ООО «ЯНДЕКС». – 44 с.
7. Мищенко, С. Н. Вопросы построения, разработки и применения искусственных нейронных сетей / С. Н. Мищенко // Мягкие измерения и вычисления. – 2021. – Т. 49. – № 12. – С. 60-72.
8. Алхатем, А. Применение свёрточных нейронных сетей в задачах классификаций сложных технических систем / А. Алхатем // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2023. – Т. 1. – С. 276-278.
9. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, В. А. Соловьев [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 40-46.
10. Фролов, Д. О. Эффективный семантический поиск на базе универсальных текстовых эмбеддингов при ограниченных ресурсах / Д. О. Фролов, А. Н. Петрова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № VII (87). – С. 87-92.
11. Петрова, А. Н. Разработка модели для ранжирования объектов в системах больших данных / А. Н. Петрова, Д. О. Фролов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 43-47.

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MACHINERY

**Максимов И. С., Галанский С. А., Рахчеев В. Г., Кушнир А. И.**  
**I. S. Maksimov, S. A. Galanskiy, V. G. Rakhcheev, A. I. Kushnir**

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ  
РЕЛЬСОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА ФАСОННЫМИ  
АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ**

**FEATURES OF THE PROCESS OF RESTORING THE SURFACE GEOMETRY OF RAILS  
AND TURNOUT COMPONENTS USING FORM-SHAPED ABRASIVE WHEELS**

**Максимов Илья Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь и строительство» Приволжского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара). E-mail: i.maksimov@samgups.ru.

**Ilya S. Maksimov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Track and Construction Department, Volga State University of Railway Engineering (Russia, Samara). E-mail: i.maksimov@samgups.ru.

**Галанский Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь и строительство» Приволжского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара). E-mail: galanski@samgups.ru.

**Sergey A. Galanskiy** – PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Track and Construction Department, Volga State University of Railway Engineering (Russia, Samara). E-mail: galanski@samgups.ru.

**Рахчеев Валерий Геннадьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Железнодорожный путь и строительство» Приволжского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара). E-mail: rahcheev@samgups.ru.

**Valery G. Rakhcheev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Railway Track and Construction Department, Volga State University of Railway Engineering (Russia, Samara). E-mail: rahcheev@samgups.ru.

**Кушнир Анастасия Игоревна** – младший научный сотрудник кафедры «Железнодорожный путь и строительство» Приволжского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара). E-mail: kurnish04@yandex.ru.

**Anastasia I. Kushnir** – Junior Researcher, Railway Track and Construction Department, Volga State University of Railway Engineering (Russia, Samara). E-mail: kurnish04@yandex.ru.

**Аннотация.** Проведён экспериментально-технологический анализ способа профильного шлифования рабочей поверхности головок рельсов специализированным шлифовальным кругом, применяемым на мобильной рельсошлифовальной тележке. Описаны конструктивные особенности и физико-механические свойства используемого шлифовального инструмента из циркониевого электрокорунда марки 38AF36P6B B3. Испытания проведены на образцах рельсов марки Р65 категории ДТ350 из закалённой стали Э76ХФ. Установлено, что применение периферии фасонного круга способствует равномерному распределению нагрузки среди отдельных абразивных частиц, снижает уровень концентрации механических напряжений и увеличивает ресурс эксплуатации самого шлифовального круга. Анализ разрушений показывает, что процесс износа обусловлен преимущественно механическим воздействием, что гарантирует стабильные условия работы каждой отдельной частицы круга и предупреждает преждевременный выход инструмента из строя. Способ обеспечивает высокое качество обработки поверхности рельса благодаря эффективному участию всех абразивных зёрен, что значительно улучшает эксплуатационные показатели рельсов и уменьшает затраты на обслуживание железнодорожного пути. Таким образом, предложенный способ является перспективным решением для увеличения надёжности и срока службы элементов железнодорожного пути.

**Summary.** An experimental and technological analysis of the method of profile grinding of the working surface of rail heads using a specialized grinding wheel mounted on a mobile rail grinding trolley has been conducted. The design features and physical and mechanical properties of the used grinding tool made of 38AF36P6B B3 zirconium electrocorundum have been described. The tests were conducted on samples of rail steel grade R65 of the DT350 category made of hardened steel E76HF. It has been established that the use of the periphery of a shaped wheel contributes to the uniform distribution of load among individual abrasive particles, reduces the level of con-

centration of mechanical stresses, and increases the service life of the grinding wheel itself. The analysis of failures shows that the wear process is primarily caused by mechanical stress, which ensures stable operating conditions for each individual particle of the wheel and prevents premature failure. The method provides high-quality surface treatment of the rail due to the effective participation of all the abrasive grains, which significantly improves the performance of the rails and reduces the maintenance costs of the railway track. Thus, the proposed technology is a promising solution for increasing the reliability and service life of railway track elements.

**Ключевые слова:** железнодорожный путь, шлифование рельсов, шлифовальный фасонный круг, периферия круга, износ абразивных зёрен, процесс разрушения шлифовального круга, износ круга, электрокорунд.

**Key words:** railway track, rail grinding, abrasive wheel, wheel periphery, grinding shaped wheel, grinding wheel destruction process, wheel wear, electrocorundum.

УДК 621.922.025

В ходе эксплуатации железнодорожных рельсов и стрелочных переводов под влиянием нагрузок от колёс подвижного состава, воздействующих на металлические элементы железнодорожного пути, возникают деформации и локализованный износ. Наиболее частыми повреждениями, обусловленными усиленным износом, недостаточной устойчивостью металла к контактно-усталостным явлениям и несоблюдением нормативных требований к геометрии рельсовой колеи и содержанию стрелочных переводов, являются наплывы металла (его продольное смещение или «сползание») и выкрашивания (отделение частиц металла) [1; 2].

Устранение дефектов производится в процессе текущего содержания железнодорожного пути. В зависимости от категории и класса пути и вида дефекта элементы классифицируются как острodefектные (ОД) или дефектные (Д). Острodefектные элементы подлежат немедленной замене. Если замена невозможна, скорость движения поездов ограничивается до значений, соответствующих категории и классу пути, при которых элемент не считается острodefектным. Дефектные элементы шлифуются (при необходимости наплавляются), проверяются измерительным инструментом и продолжают эксплуатироваться до плановой замены под контролем. Наблюдение за развитием дефекта осуществляется при регулярных проверках рельсов и стрелочных переводов.

Шлифование рельсов железнодорожного пути является ответственной операцией, определяющей их ресурс. Традиционное шлифование на перегонах производится рельсошлифовальными поездами РШП-48. Механическая обработка адресных локальных дефектов выполняется работниками путевого хозяйства в основном с использованием рельсошлифовальных станков МС-3, станков типа 2152 (для шлифовки под углом 60°), а также пневмошлифовальными машинами ИП-2014Б для шлифования крестовины стрелочного перевода (см. рис. 1).

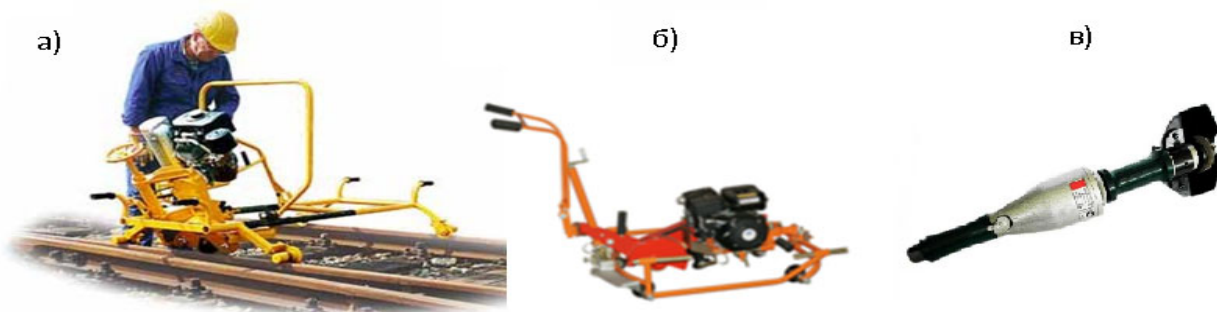


Рис. 1. Ручные рельсошлифовальные станки для шлифования железнодорожных рельсов и контррельсов в зоне стрелочных переводов всех типов: а – станок МС-3; б – станок рельсошлифовальный 2152Д; в – машина шлифовальная пневматическая радиальная ИП-2014Б

Ключевым фактором, определяющим образование ремонтных профилей, является изнашивание головки рельса (вертикальный, боковой износ) – взаимодействие колёс поездов с поверхностью рельса. Постоянное трение приводит к постепенному деформированию металла на поверхности рельса, особенно в местах, где происходит частое торможение и разгон подвижного состава. Эволюция формы поперечного сечения рельса связана с неравномерным распределением нагрузки от колёс на поверхность рельса и влечёт за собой изменение формы его поперечного сечения, что выражается в появлении волнообразных деформаций, сколов и других повреждений на поверхности рельсов.

В результате жизненного цикла и в процессе эксплуатации железнодорожных рельсов и элементов стрелочных переводов происходят следующие технологические стадии формирования ремонтных профилей. Первоначальный этап – возникновение незначительных неровностей и царапин на поверхности рельса; промежуточный этап – заметные изменения в форме поперечного сечения, появление волновых деформаций и небольших трещин; финальный этап – значительное отличие профиля от первоначального состояния, образование глубоких трещин, крупных повреждений и существенных отклонений от нормативных требований [3–9].

Так, при осмотре стрелочного перевода в рамках текущего содержания выявлен наплыв металла по рабочей грани острьяка до 5 мм ниже поверхности катания (полочка острьяка), выкрашивание острьяка от острья до первой стрелочной тяги и выкрашивание гребнеобразного наплыва острьяка, образованные в процессе воздействия гребней колёс подвижного состава (см. рис. 2). На рис. 3, отображены выявленные дефекты в виде наплыва и выкрашивания, требующие механической обработки.



Рис. 2. Силы воздействия колеса на острьяк стрелочного перевода

В процессе механической обработки рельсов и элементов стрелочных переводов применяются абразивные круги с разными характеристиками, которые во время обработки устанавливаются под разными углами относительно поверхности катания головки рельса. Если абразивный круг расположен не оптимально по отношению к обрабатываемой поверхности, то не достигается его равномерный износ. Это ведёт к неравномерному снятию металлического слоя с головки рельса и, как следствие, деформации его формы. Если дорожка качения имеет относительно прямолинейную поверхность, то рабочая грань головки рельсов является сопряжением трёх радиусов, образуя фасонную поверхность [10; 12].

**Материалы и методы.** Объектом изучения являлся профильный шлифовальный круг, предназначенный для мобильной рельсошлифовальной тележки, изготовленный из циркониевого электрокорунда 38AF36P6B Б3.

В работе были применены аналитические методы моделирования процессов абразивной обработки и параметров абразивного инструмента, а также натурные и лабораторные исследования. В процессе шлифования применялись объёмно-закалённые рельсы Р65 категории ДТ350 из

рельсовой стали марки Э76ХФ. Определение геометрических параметров шлифовальных кругов (внешнего и внутреннего диаметров, а также высоты) осуществлялось с использованием штангенциркуля ШЦ-20-200x0,02 и микрометра МК-100x0,01. Для анализа шероховатости поверхности катания железнодорожного рельса применялся профилометр ИШП-210.

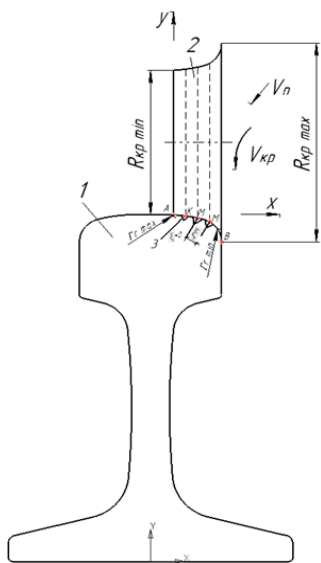


Рис. 3. Дефекты в виде наплыва на острейке, требующие механической обработки

Анализ технологических аспектов износа инструмента при шлифовании рельсов выявил комплексный характер разрушения абразивных зёрен и связующего материала круга [13; 14].

**Результаты.** Предлагается эффективный способ обработки рабочей грани головки рельсов шлифованием периферией абразивного круга (см. рис. 4). Перед шлифованием абразивные круги подвергаются алмазному профилированию. Периферия абразивных кругов полностью соответствует профилю рабочей грани головки рельсов.

Если учесть, что абразивный круг взаимодействует с фасонной гранью головки рельсов, то распределение усилий  $P_1$  и  $P_2$ , действующих на абразивное зерно, силы микрорезаний  $P_y$ ,  $P_z$  и равнодействующей  $P_\Sigma$  выглядит следующим образом (см. рис. 5).



1 – обрабатываемый рельс; 2 – абразивный круг; 3 – выступающие зёрна обрабатываемого круга

Рис. 4. Способ шлифования рабочей грани головки рельса периферией абразивного круга

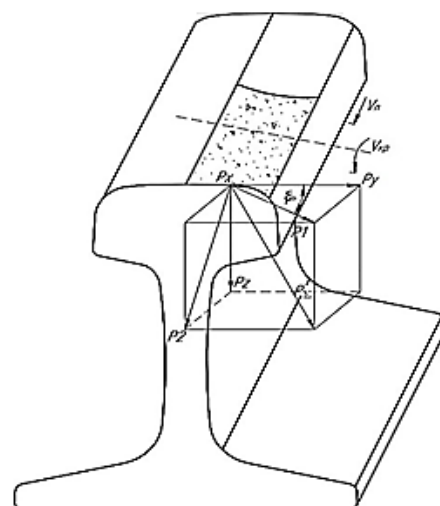


Рис. 5. Схема определения усилий, действующих на абразивное зерно, которые характеризуют реальный процесс обработки периферией круга

Будем считать, что ось конуса зерна перпендикулярна к образующей фасонного профиля круга в точке заделки зерна в связке. Усилия  $P_1$  направлены вдоль оси конуса,  $P_2$  – перпендикулярно к ней. Следовательно, эти силы являются нормальной и тангенциальными составляющими результирующей силы  $P_\Sigma$ , действующей на зерно. В свою очередь, результирующая силы  $P_\Sigma$  есть векторная сумма сил  $P_z$ , действующая перпендикулярно к плоскости, проходящей через ось вращения круга и приложенной к точке контакта ( $P_2$  и  $P_z$  лежат в касательной плоскости к фасонной поверхности круга в точке контакта), и силы  $P_y$ , действующей параллельно направлению подачи круга ( $P_1$  и  $P_y$  действуют в плоскости, проходящей через точку контакта круга и обрабатываемой поверхности).

При шлифовании рабочей грани головки рельсов периферией круга ось зерна конуса (в соответствии с принятым условием) не параллельна направлению движения круга, а составляет с ним угол  $\xi$ , который в зависимости от формы фасонного профиля меняется от 0, когда касательная в этой точке к образующей профиля круга параллельна оси вращения, до  $\frac{\pi}{2}$ .

Если ввести коэффициент  $v = \frac{P_y}{P_z}$ , то в соответствии с приведёнными схематично рисунками (см. рис. 4 и 5) имеем

$$P_1 = P_y \cos \xi = P_z \cos \xi;$$

$$P_2 = \sqrt{P_z^2 + (P_y \sin \xi)^2} = P_z \sqrt{1 + v^2 \sin^2 \xi}.$$

При исследовании различных марок стали коэффициент  $v$  колеблется от 1,5 до 3,8. Износ зёрен  $\Delta h$  по нормали к рабочей поверхности фасонного круга будет

$$\Delta h_3 = \frac{\sqrt{P_z} \cos \xi}{\sqrt{\pi \sigma_b} \sqrt{2}} \left\{ \left[ v(A_1 - B_1) \cos \xi + (A_2 - B_2) \sqrt{1 + v^2 \sin^2 \xi} \right]^2 + [v(C_1 - A_1) \cos \xi + (C_2 - A_2) \sqrt{1 + v^2 \sin^2 \xi}]^2 + 6[(vD_1 \cos \xi + D_2 \sqrt{1 + v^2 \sin^2 \xi}) + (1 + v^2 \sin^2 \xi)(E_1^2 + G_1^2)] \right\}^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности материала;  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2, E_1$  и  $G_1$  могут быть определены следующим образом:

$$A_1 = \frac{\mu(1 + \cos \xi) - (3\lambda + 4\mu) \cos \xi}{2\lambda(1 - \cos^3 \xi) + \mu(1 - \cos \xi)(1 + \cos^2 \xi)},$$

здесь  $\mu$  – модуль упругости второго рода;  $\lambda$  – постоянная Ламе;

$$A_2 = \frac{\sin \xi \cos \xi \left( 2\mu \frac{1 + \cos \xi}{1 - \cos \xi} - 3\lambda - 4\mu \right)}{[(2 + \cos \xi)\lambda + 2\mu](1 - \cos \xi)^2};$$

$$B_1 = \frac{\mu \cos \xi (1 - \cos \xi)}{2[\lambda(1 - \cos^3 \xi) + \mu(1 - \cos \xi)(1 + \cos^2 \xi)](1 + \cos \xi)};$$

$$B_2 = \frac{\mu \sin \xi \left[ 1 + \frac{(1 + \cos \xi)^2 (1 - \cos \xi)}{\sin^2 \xi (1 + \cos \xi)} - 2 \frac{1 - \cos \xi}{1 + \cos \xi} \right]}{[(2 + \cos \xi)\lambda + 2\mu](1 - \cos \xi)^2};$$

$$C_1 = \frac{\mu \left( \cos \xi - \frac{1 - \cos \xi}{1 + \cos \xi} \right)}{2 \left[ \lambda (1 + \cos^2 \xi) + \mu (1 - \cos \xi) (1 + \cos^2 \xi) \right]};$$

$$C_2 = \frac{\mu \sin \xi \cos \xi \left[ 1 - \frac{(1 + \cos \xi)^2 (1 - \cos \xi)}{\sin^2 \xi (1 + \cos \xi)} \right]}{\left[ (2 + \cos^2 \xi)\lambda + 2\mu \right] (1 - \cos \xi)^2};$$

$$D_1 = \frac{\mu \sin \xi (\cos \xi - 1)}{2 \left[ \lambda (2 + \cos^3 \xi) + \mu (1 - \cos \xi) (1 + \cos^2 \xi) \right] (1 + \cos \xi)};$$

$$D_2 = \frac{\mu \cos \xi (1 - \cos \xi)}{\left[ (2 + \cos \xi)\lambda + 2\mu \right] (1 + \cos \xi)};$$

$$E_1 = \frac{\mu \sin \xi (1 + \cos \xi) (1 - \cos \xi)}{\left[ (2 + \cos \xi)\lambda + 2\mu \right] (1 - \cos \xi)^2 (1 + \cos \xi) \sin \xi};$$

$$G_1 = \frac{\mu \sin \xi \left[ 1 + \frac{(1 + \cos \xi)^2}{1 + \cos \xi} - \frac{(1 + 2 \cos \xi)(1 + \cos \xi)}{1 - \cos \xi} \right]}{\left[ (2 + \cos \xi)\lambda + 2\mu \right] (1 - \cos \xi)^2}.$$

Для определения составляющей силы микрорезания  $P_z$  одним зерном получим следующее уравнение:

$$P_z = A \left[ \frac{V_n}{60V_{кр} \pm 2V_n} \right]^{1-\kappa} \cdot t_\phi^{\frac{(1-\kappa)}{2}} \cdot t_\phi^{1-\kappa} \cdot \left[ \frac{D_{кр+r_r}}{D_{кр} \cdot r_r} \right]^{\frac{(1-\kappa)}{2}} \cdot \left[ \frac{S}{B} \right]^{1-\kappa} \cdot [\sqrt{2\rho a_z - a_z^2} + (a'_z - a_z) \tan \xi_m], \quad (2)$$

где  $A = P_\psi \cdot a_\psi^k$ ,  $P_\psi$  – условное напряжение резания для толщины слоя в произвольной точке  $\psi$ , здесь  $a_\psi$  – толщина слоя в точке  $\psi$ ;  $V_n$  – скорость круга;  $\kappa$  – показатель степени ( $\kappa = 0,33$ );  $t_\phi$  – фактическое среднее расстояние между абразивными зёрнами;  $D_{кр}$  – диаметр круга;  $r_r$  – радиус головки рельса;  $S$  – поперечная подача круга;  $B$  – высота круга;  $\rho$  – радиус вершины зерна;  $a_z$  – толщина снимаемого слоя абразивным зерном;  $a'_z$  – максимальная глубина проникновения зёрен при заданном радиусе вершины зерна  $\rho$ ;  $\xi_m$  – угол при вершине зерна.

Подставив соотношение (2) в (1), а также используя допущение  $B_1 = B_2 = C_2 = D_1 = D_2 = E_1 = G_1 = 0$ , получим выражение, характеризующее износ круга в произвольном его поперечном сечении при шлифовании головки рельсов с учётом реальных условий выполнения данного процесса:

$$\Delta h_3 = \frac{\cos \xi}{\sqrt{\pi \sigma_b} \sqrt{2}} \left\{ A \left[ \frac{V_{II}}{60V_{кр} \pm 2V_{II}} \right]^{1-\kappa} \cdot t_\phi^{\frac{(1-\kappa)}{2}} \cdot t_\phi^{1-\kappa} \cdot \left[ \frac{D_{кр+r_r}}{D_{кр} \cdot r_r} \right]^{\frac{(1-\kappa)}{2}} \cdot \left[ \frac{S}{B} \right]^{1-\kappa} \right\}.$$

$$\left\{ \sqrt{2\rho a_z - a_z^2} + (a'_z - a_z) \tan \xi_m \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ v(A_1 - B_1) \cos \xi + (A_2 - B_2) \sqrt{1 + v^2 \sin^2 \xi} \right]^2 + \\ + (vC_1 \cos \xi)^2 + \left[ v(C_1 - A_1) \cos \xi - A_2 \sqrt{1 + v^2 \sin^2 \xi} \right]^{\frac{1}{4}}.$$

Среднее число зёрен, действующих в пределах полной длины дуги контакта круга и головки рельсов при шлифовании, определим следующим образом.

Будем считать, что абразивные зёрна на рабочей поверхности абразивного круга находятся на одинаковом расстоянии  $l_\phi$  вдоль образующей  $y = \psi(x)$  в интервале от  $A$  до  $B$  (см. рис. 4), длина которой

$$L_{ав} = \int_a^b \sqrt{1 + \psi'^2} dx.$$

Тогда в пределах длины образующей периферии круга одновременно будет действовать следующее число рядов абразивных зёрен с расстоянием между ними, равным  $l_\phi$ :

$$Z_p = \frac{L_{ав}}{l_\phi} = \frac{1}{l_\phi} \int_a^b \sqrt{1 + \psi'^2} dx.$$

Рассмотрим произвольное сечение  $X$ , которому соответствует определённый ряд зёрен. Длина дуги контакта круга и головки рельсов при шлифовании находится из выражения

$$L(x) = \left( 1 \pm \frac{V_n}{60V_{кр}} \right) \sqrt{\frac{2\psi(x) \cdot f(x)t}{\psi(x) + f(x)}}, \quad (3)$$

где  $\psi(x)$  и  $f(x)$  – соответственно радиусы круга и головки рельсов в сечении  $X$ ;  $t$  – глубина резания, мм/об.

Число зёрен, действующих в сечении  $X$ , равно

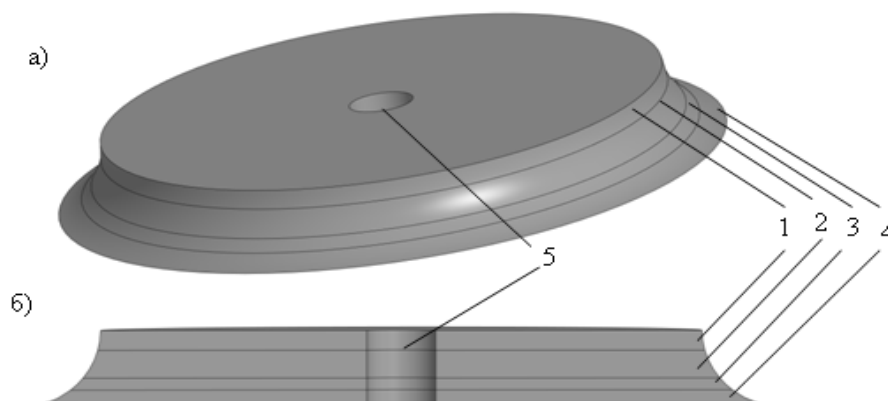
$$Z(x) = \frac{1}{l_\phi} \left( 1 \pm \frac{V_n}{60V_{кр}} \right) \sqrt{\frac{2\psi(x) \cdot f(x)t}{\psi(x) + f(x)}}.$$

Отсюда в пределах площади (зоны) контакта фасонных поверхностей круга и головки рельсов при шлифовании общее число зёрен определяется по формуле

$$Z_\Sigma = \int_a^b Z(x) \frac{1}{l_\phi} \sqrt{1 + \psi'^2} dx = \frac{\sqrt{t}}{l_\phi^2} \cdot \int_a^b \left( 1 \pm \frac{V_n}{60V_{кр}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2\psi(x) \cdot f(x)t}{\psi(x) + f(x)}} \cdot \sqrt{1 + \psi'^2} dx. \quad (4)$$

Таким образом, для того чтобы обеспечить стабильность формы круга и его равномерную интенсивность износа, необходимо, чтобы общее число зёрен в зоне контакта фасонных поверхностей круга и головки рельсов при шлифовании соответствовало  $Z_\Sigma$ . Этого можно достичь путём регулирования концентрации зёрен в материале круга, меняя характер структуры в теле круга в зависимости от радиуса в поперечном сечении его фасонной поверхности. Отсюда меньшему радиусу на фасонной поверхности соответствует большая плотность структуры и наоборот.

В соответствии с этим было предложено при создании такого инструмента сделать разделение объёма круга на четыре слоя, как показано на рис. 6. Каждый слой в зависимости от радиуса будет иметь свою структуру.



1, 2, 3, 4 – абразивные слои круга с различной структурой, 5 – посадочное отверстие  
 Рис. 6. Схема определения усилий, действующих на абразивное зерно, которые характеризуют реальный процесс обработки периферией круга

Так, в соответствии с формулами (3) и (4) принимается номер структуры круга на бакелитовой связке и циркониевом электрокорунде для первого слоя – 8, второго – 7, третьего – 6, четвертого – 5 (см. рис. 6). Производить такие круги можно подбором фракционного состава абразивного материала и добавками соответствующих наполнителей в абразивную шихту.

Формирование ремонтных профилей рельсов и элементов стрелочных переводов предлагается осуществлять по технологической схеме, представленной на рис. 7, с использованием мобильной рельсошлифовальной тележки с установленными фасонными кругами (см. рис. 8). Схема расположения кругов относительно поверхности головки рельса показана на рис. 7.

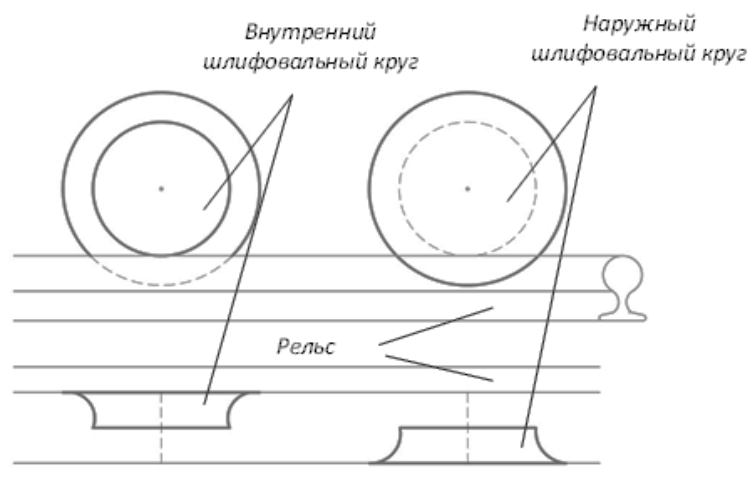


Рис. 7. Технологическая схема расположения шлифовальных фасонных кругов

**Заключение.** На основании результатов изучения технологии профильного шлифования и разработанного для неё шлифовального круга можно заключить следующее: предложенный способ обработки рабочих граней головки рельса с использованием периферии фасонного круга создаёт тенденции для равномерного распределения нагрузки между абразивными зёрнами. Это позволяет каждому зерну выполнять сопоставимый объём работы по резке, что, в свою очередь, обеспечивает равномерный износ круга и исключает потребность в его правке.

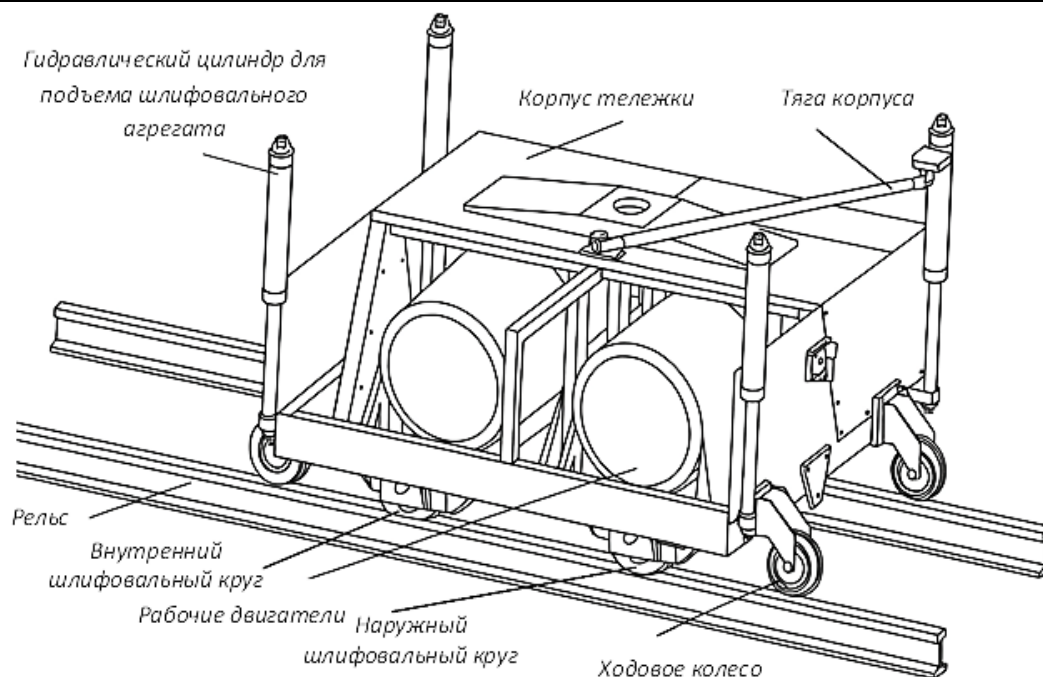


Рис. 8. Мобильная рельсошлифовальная тележка с фасонными кругами

Данные условия способствуют достижению повышенной точности шлифования, что позитивно влияет на увеличение срока эксплуатации рельсов. Благодаря равномерному износу круга отпадает необходимость в частых корректировках, что также снижает затраты на обслуживание и увеличивает общую эффективность процесса шлифования. Таким образом, технология профильного шлифования с использованием специализированного круга представляется перспективным решением для поддержания железнодорожных рельсов в исправном рабочем состоянии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Профильная обработка рельсов шлифовальными поездами с активными рабочими органами / В. Г. Альбрехт и др. – М.: МПС РФ, 1999. – 93 с.
2. Профильное шлифование рельсов / А. Ю. Абдурашитов, Л. Г. Крысанов, В. Б. Каменский и др. – М.: Транспорт, 2001. – 79 с.
3. Теоретические особенности формирования поверхности катания головок рельсов при шлифовании / В. Г. Рахчеев, И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V (53). – С. 65-70.
4. Галанский, С. А. К методике разработки абразивного инструмента для шлифования рельсов в пути / С. А. Галанский, И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 2. – С. 105-107.
5. ГОСТ Р 51685-2022. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия = Railway rails. General specifications: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 декабря 2022 г. № 1509-ст: взамен ГОСТ Р 51685-2013: дата введения 2023-08-01 / разработан Акционерным обществом «Уральский институт металлов», Акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», Обществом с ограниченной ответственностью «ЕВРАЗ Торговая компания», Акционерным обществом «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», Акционерным обществом «ЕВРАЗ Объединённый Западно-Сибирский металлургический комбинат», Обществом с ограниченной ответственностью «Управляющая компания “Мечел-Сталь”», Публичным акционерным обществом «Челябинский металлургический комбинат», Открытым акционерным обществом «Российские железные дороги». – М.: Росстандарт, 2022. – 110 с.



6. Анализ механизма износа абразивных кругов при шлифовании рельсов / В. Г. Рахчеев, И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 68-75.
7. Максимов, И. С. Объектно-ориентированное проектирование процесса шлифования рельсов в пути с использованием композиционных абразивных инструментов / И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № III (59). – С. 99-109.
8. Rakhcheev V. G., Maksimov I. S., Galanskiy S. A., Mustafin A. G., Zolkin A. L. On the issue of wearing mechanism of abrasive wheels during rails grinding. Journal of Physics: Conference Series. III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022). Krasnoyarsk, 2022. С. 22002.
9. Rakhcheev V. G.; Galanskiy S. A.; Maksimov I. S.; Tarasov A. V.; Zolkin A. L. Study of grinding rails with concentric wheels. AIP Conference Proceedings. II International scientific and practical symposium «Materials science and technology» (MST-II-2022). Dushanbe, 2023. С. 20009.
10. Максимов, И. С. Особенности износа инструмента в технологическом процессе шлифования железнодорожных рельсов / И. С. Максимов, С. А. Галанский, В. Г. Рахчеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 7. – С. 453-458.
11. Галанский, С. А. К расчёту износа абразивных кругов в процессе шлифования рельсов железнодорожного пути / С. А. Галанский, И. С. Максимов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2024. – № 5. – С. 11-17.
12. Технологические особенности шлифования рельсов железнодорожного пути / В. Г. Рахчеев, С. А. Галанский, И. С. Максимов, Е. А. Андреева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2024. – № 8. – С. 32-36.
13. On the issue of designing and creation of a composite grinding wheels of increased productivity for rails treatment / I. S. Maksimov, S. A. Galanskiy, A. L. Zolkin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2697, No. 1. – P. 012047.
14. Максимов, И. С. Проектирование и создание композиционных шлифовальных кругов повышенной производительности для обработки рельсов / И. С. Максимов // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – № 1 (79). – С. 233-241.

Ваниев Э. Р., Джемилев Э. Ш., Бекиров Э. Л., Тимофеев С. А., Башкова Т. И.  
ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ  
СПЛАВОВ ЗА СЧЁТ ПРИРАБОТКИ

**Ваниев Э. Р., Джемилев Э. Ш., Бекиров Э. Л., Тимофеев С. А., Башкова Т. И.**  
**E. R. Vaniev, E. Sh. Dzhemilov, E. L. Bekirov, S. A. Timofeev, T. I. Bashkova**

## **ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЁТ ПРИРАБОТКИ**

### **INCREASING THE LIFETIME OF END MILLS WHEN MACHINING TITANIUM ALLOYS DUE TO RUNNING-IN**

**Ваниев Эльдар Рустемович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Крым, Симферополь). E-mail: e.vaniev@kipu-rc.ru.

**Eldar R. Vaniev** – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Crimea, Simferopol). E-mail: e.vaniev@kipu-rc.ru.

**Джемилев Эшреб Шефикович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Крым, Симферополь). E-mail: eshreb@mail.ru.

**Eshreb Sh. Dzhemilov** – PhD in Engineering, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Fevzi Yakubov Crimean Engineering and Pedagogical University (Crimea, Simferopol). E-mail: eshreb@mail.ru.

**Бекиров Эскендер Лятифович** – преподаватель, заведующий лабораторией кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Крым, Симферополь). E-mail: eska1691@mail.ru.

**Eskender L. Bekirov** – Lecturer, Head of the Laboratory, Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Crimea, Simferopol). E-mail: eska1691@mail.ru.

**Тимофеев Степан Алексеевич** – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Крым, Симферополь). E-mail: hlivvih@gmail.com.

**Stepan A. Timofeev** – Postgraduate Student, Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Crimea, Simferopol). E-mail: hlivvih@gmail.com.

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

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

**Аннотация.** Приведены результаты исследования возможности повышения стойкости концевых фрез с покрытием при обработке титановых сплавов за счёт приработки. Для этого проанализированы существующие методы повышения стойкости инструментальных материалов. Отмечается, что для упрочнения твёрдого сплава перед покрытием широко применяются способы поверхностного упрочнения. С целью дальнейшего повышения стойкости инструмента на примере фрезерования сплава ВТ6 твёрдосплавными фрезами, в которых перед нанесением покрытия TiAlN проведено упрочнение виброабразивной обработкой, рассматривается возможность дальнейшего повышения стойкости этого инструмента за счёт предварительной приработки в технологической среде «Promoledge 9 %», которая подавалась в зону резания способом минимальной смазки.

**Summary.** The article presents the results of a study on the possibility of increasing the tool life of coated end mills when machining titanium alloys through break-in. Existing methods for increasing the tool life of tool materials are analyzed. It is noted that surface hardening is widely used to strengthen the carbide before coating. To further enhance tool life, using the example of milling VT6 alloy with carbide cutters that were hardened by vibroabrasive machining before applying the TiAlN coating, the possibility of further increasing the tool life through preliminary



break-in in a «Promoledge 9 %» process medium, which was supplied to the cutting zone using a minimum lubrication method, is considered.

**Ключевые слова:** титановый сплав; приработка; стойкость; износ; концевая фреза; твёрдый сплав; план эксперимента; упрочнение; технологическая среда.

**Key words:** titanium alloy; running-in; durability; wear; end mill; hard alloy; experimental design; strengthening; process environment.

УДК 621.914

**Введение.** Титан и его сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам [1]. Однако по своим физико-механическим свойствам они значительно отличаются от жаропрочных и нержавеющей сталей, относящихся к этой же группе материалов. Так, например, по удельной прочности титановый сплав ВТ6 значительно превышает сплавы на основе железа и никеля и характеризуются меньшим модулем упругости, что означает склонность титановых сплавов к упругим деформациям в процессе резания [2].

Кроме того, титановый сплав имеет в 4 раза меньшую теплопроводность, чем у никеля, в 5 раз ниже, чем у железа, и в 14 раз ниже, чем у алюминия. Именно низкая теплопроводность в основном влияет на обрабатываемость титана и его сплавов, на устойчивость инструмента и производительность изготовления из них изделий.

Низкая теплопроводность приводит к значительному повышению температуры инструмента, особенно в области контакта со стружкой. Если при обработке стали эта температура колеблется в диапазоне 300...350 °С, то при обработке титановых сплавов температура достигает значений 1100...1200 °С и с повышением скорости резания возрастает [2]. Это приводит к перегреву стружки и её окислению. Кроме того, нагревание титановой стружки вызывает появление другого вредного явления, связанного с высокой растворимостью материалов в титане.

Таким образом, титановая стружка скользит по поверхности инструмента при высокой температуре, вследствие чего происходит её легирование инструментальным материалом и увеличивается интенсивность износа инструмента.

Для обработки титана и его сплавов используются инструменты из вольфрамокобальтовых сплавов с покрытиями TiAlN [3]. Ввиду широкого использования титановых сплавов при изготовлении деталей двигателей, компрессоров, основной операцией обработки является фрезерование.

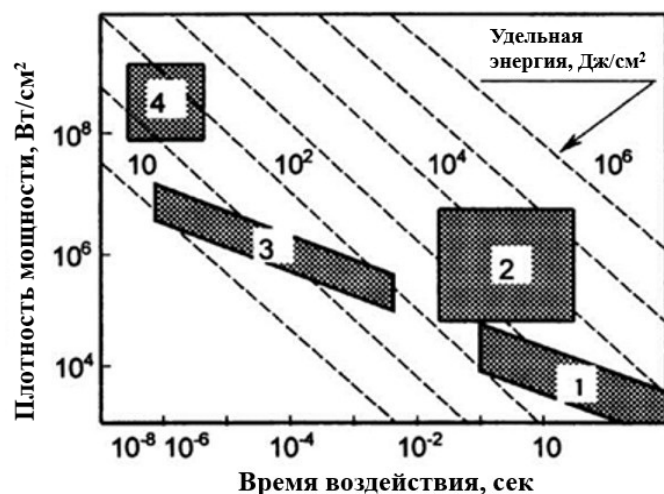
По разным источникам, например [1; 2], во время чернового фрезерования титановых сплавов концевыми фрезами рекомендуется скорость резания  $V = 10...30$  м/мин, подача на зуб  $S_z = 0,05...0,1$  мм/зуб, глубина резания  $t = 1,5...5,0$  мм, а при получистовой и чистовой обработке –  $V = 30...60$  м/мин,  $S_z = 0,03...0,08$  мм/зуб,  $t = 0,5...2,0$  мм.

**Анализ последних исследований и публикаций.** С развитием автоматизированного производства повышение работоспособности инструмента на основе эффективного использования оборудования является одной из важнейших проблем. Анализ показал, что они направлены на совершенствование каждого из существующих способов повышения режущих свойств инструмента.

Следует отметить, что одновременное использование существующих способов повышения работоспособности инструмента, в частности твёрдосплавного, практически не исследовано. Поэтому возникает задача определения возможности комплексного использования нескольких методов для повышения работоспособности твёрдосплавного инструмента.

Известно, что существующие способы повышения режущих свойств инструмента можно представить четырьмя группами методов направленного, поверхностного и объёмного воздействия на структуру инструментального материала (см. рис. 1).

Для повышения работоспособности твёрдого сплава широко применяются способы поверхностного упрочнения, относящиеся к отделочным операциям, обеспечивающим удаление тонких поверхностных слоёв инструментального материала, относительно неглубокое пластическое деформирование.



1 – механическое упрочнение; 2 – химико-термическая обработка;  
3 – физико-химическое упрочнение; 4 – физическое упрочнение

Рис. 1. Методы поверхностного упрочнения инструментальных материалов по энергетическим затратам и временному фактору

По данным [4], можно особо выделить отделочно-упрочняющую обработку перед нанесением покрытий. Так, при использовании твёрдосплавных резцов и фрез для полустойкой обработки титановых сплавов перед нанесением износостойких покрытий рекомендуется виброабразивная или магнитно-абразивная обработка [4; 5], что обеспечивает повышение периода стойкости в 1,5...2,5 раза.

Следует отметить, что предварительная упрочняющая обработка перед покрытием широко применяется в мировой практике производства инструмента. Таким образом, приведённый анализ показывает, что дальнейшее повышение режущих свойств инструмента с покрытием не осуществляется.

Известно [4; 6], что одним из эффективных способов дальнейшего повышения стойкости инструмента является его предварительная приработка.

Однако в основном она исследовалась для быстрорежущего инструмента. В работе [7] показано, что одним из эффективных методов является термомеханическое упрочнение инструмента путём приработки на заниженных режимах резания в смазочно-охлаждающей технологической среде (СОТС). Эффективность приработки на заниженных режимах резания твёрдосплавным инструментом с покрытием не исследовалась.

Поэтому исследования возможности повышения стойкости твёрдосплавного инструмента с покрытием за счёт создания на контактных поверхностях вторичных упрочнённых структур приработкой являются актуальными.

Целью работы является определение возможности образования вторичных упрочнённых структур на контактных поверхностях инструмента с покрытием за счёт приработки в среде СОТС и на этой основе повышения стойкости инструмента.

**Методика проведения эксперимента** Экспериментальные исследования проводились на базе универсального фрезерного станка модели 6Б75ВФ1, который соответствовал нормам точности и жёсткости. На данном станке был смонтирован испытательный комплекс, обеспечивавший возможность проведения измерений. В качестве обрабатываемого материала использовалась заготовка размерами 75×15×141,3 мм из титанового сплава ВТ6 по ГОСТ 19807-91. Обработка проводилась цельными двузубыми фрезами Sandvik Coromant 1P230 (без покрытия) из твёрдого сплава H10F Ø10 мм с предварительно упрочнённой поверхностью виброабразивной обработкой перед покрытием TiAlN (см. рис. 2).

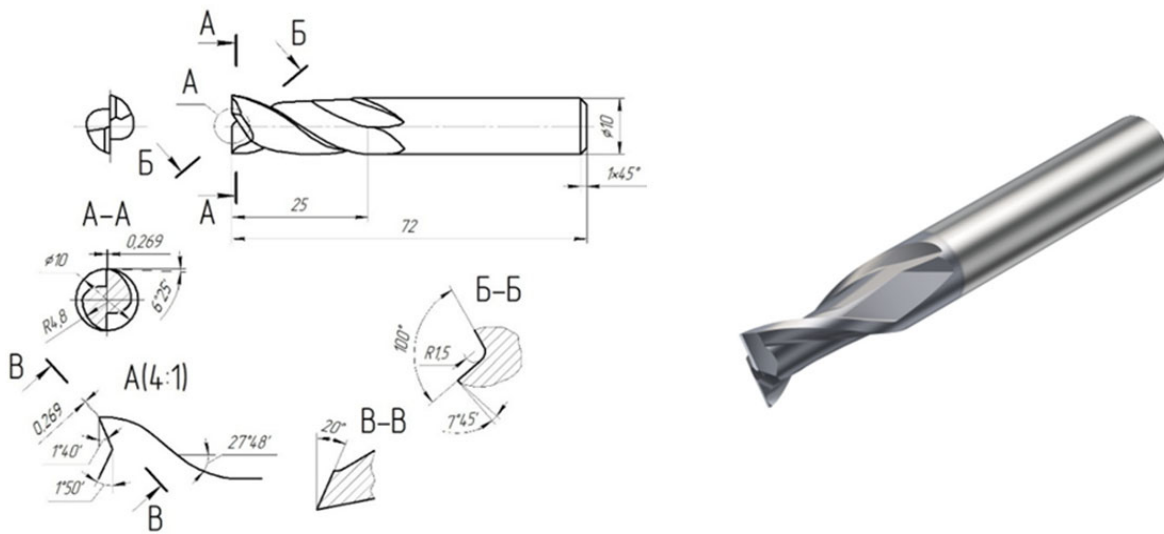


Рис. 2. Режущий инструмент: фреза концевая Sandvik Coromant 1P230 из твёрдого сплава H10F

На первом этапе была поставлена задача выбора режимов приработки. Она решалась на основе сравнительных исследований приработанного инструмента на заниженных режимах с последующим его использованием для полустогового и чистового фрезерования [7; 8], а именно: при скорости резания  $V = 43,96$  м/мин, подачах  $S_z = 0,16$  и  $S_z = 0,05$  мм/зуб соответственно, глубине фрезерования  $t = 3$  мм.



Рис. 3. Подача СОТС в зону резания

Приработка осуществлялась на следующих режимах:  $S_z = 0,03$  мм/зуб, и  $S_z = 0,05$  мм/зуб,  $t = 1$  мм;  $V = 10$  м/мин,  $V = 15$  м/мин,  $V = 20$  м/мин,  $V = 25$  м/мин.

Приработка и последующая эксплуатация инструмента выполнялись с использованием водосмешиваемой СОТС «Promoledge 9 %», которая рекомендована при обработке титановых сплавов. Подача СОТС осуществлялась по задней поверхности зуба фрезы с помощью устройства фирмы Noga Minicool, предназначенного для реализации технологии минимального смазывания (см. рис. 3).

После предварительной настройки, смазывающий материал и сжатый воздух коаксиально подаются по кабелям системы до дозирующей форсунки. Смесеобразование происходит на выходе форсунки на основе принципа Вентури. Распыляясь, тонкодисперсный воздушно-масляный аэрозоль направляется к зоне обработки (см. рис. 4).

Ввиду особенностей конструкции аэрозольный поток точно направляется и охватывает контактную зону обработки. При этом концентрация воздушно-масляной смеси в рабочей части станка существенно снижается.

**Обсуждение полученных результатов.** Результаты исследования показали, что приработка с подачами  $S_z = 0,03$  мм/зуб не влияет на повышение стойкости инструмента, в то время как максимальное повышение стойкости наблюдается с подачей  $S_z = 0,05$  мм/зуб (см. рис. 5).

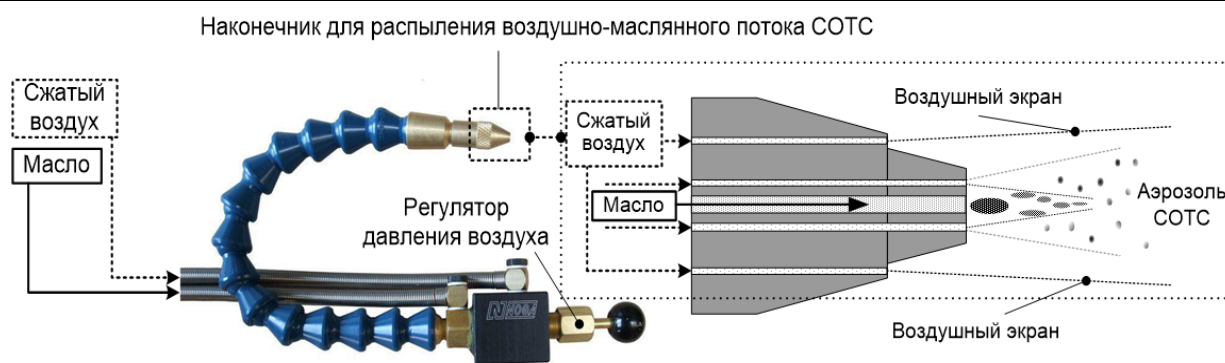
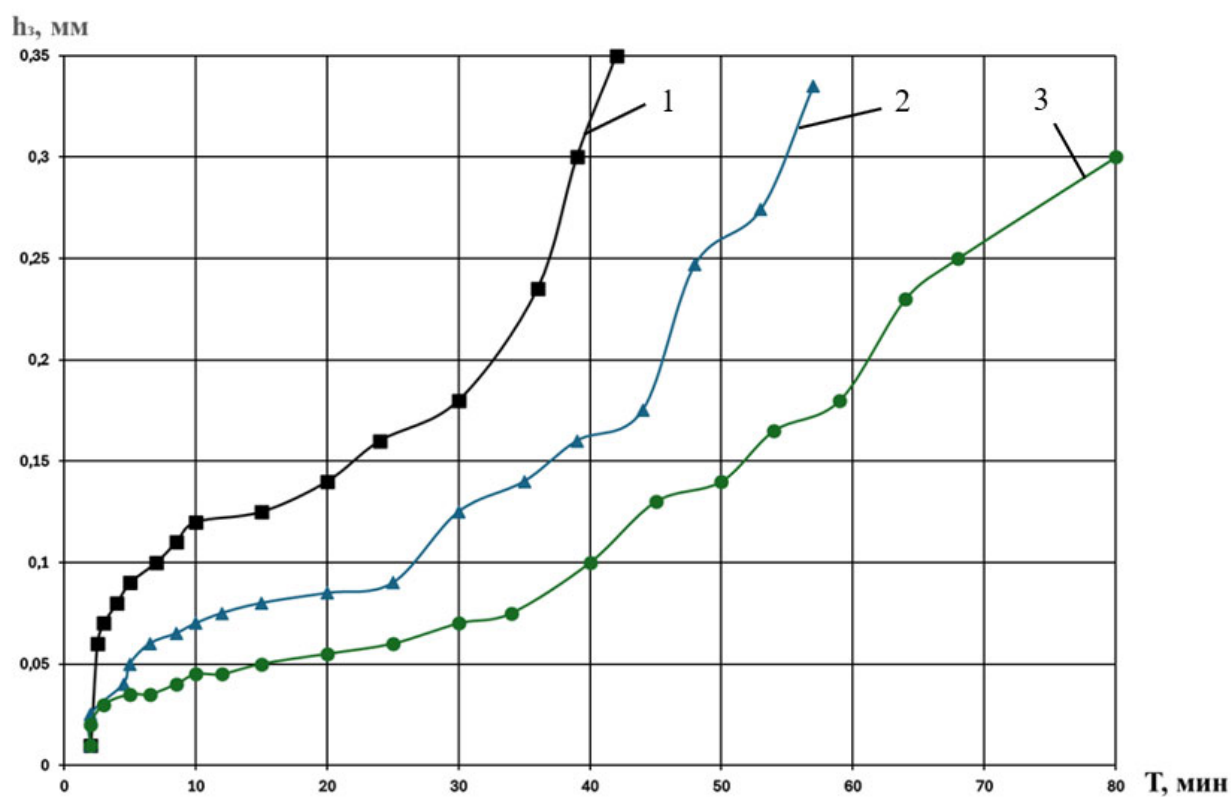


Рис. 4. Общий вид дозирующего устройства фирмы Noga «Minicool»  
 (образование воздушно-масляного аэрозоля)

После каждого прохода фрезерования заготовки (141,3 мм) проводилось измерение износа по задней поверхности фрезы, для чего на столе станка был установлен микроскоп модели МБС-1.

Полученные результаты исследований показали, что за счёт упрочняющего действия СОТС при приработке твёрдосплавного инструмента с покрытием можно повышать его стойкость. Это является принципиально новым механизмом упрочняющего действия при применении СОТС, представленным в работе [9] для инструментов с покрытиями. Этот механизм по своей природе сложный и требует дальнейших исследований, направленных на повышение работоспособности твёрдосплавного инструмента с покрытием.



1 – без приработки при  $S_z = 0,16$  мм/зуб; 2 – приработка при  $S_z = 0,03$  мм/зуб;  
 3 – приработка при  $S_z = 0,05$  мм/зуб

Рис. 5. Зависимость износа по задней поверхности фрезы от времени обработки ( $V = 43,96$  м/мин)



**Заключение.** На примере исследования повышения стойкости концевых цельных твёрдосплавных фрез с покрытием во время обработки титанового сплава ВТ6 было определено, что при применении СОТС возможно дальнейшее повышение его стойкости за счёт предварительной приработки на заниженных режимах. Результаты проведённых исследований показывают, что предварительная приработка твёрдосплавного инструмента с покрытием является перспективным направлением дальнейшего повышения работоспособности и требует исследований по раскрытию механизма действия этого процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учеб. пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
2. Кривоухов, В. А. Обработка резанием титановых сплавов / В. А. Кривоухов, А. Д. Чубаров. – М.: Машиностроение, 1970. – 180 с.
3. Высокоскоростная и высокопроизводительная обработка (режимы, характеристика станков, инструмент) / М. А. Болотов [и др.]. – Самара, 2010. – 88 с. // Репозиторий Самарского университета. – URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repo.ssau.ru/jspui/bitstream/123456789/41110/1/%d0%91%d0%be%d0%bb%d0%be%d1%82%d0%be%d0%b2%20%d0%9c.%d0%90.%20%d0%92%d1%8b%d1%81%d0%be%d0%ba%d0%be%d1%81%d0%ba%d0%be%d1%80%d0%be%d1%81%d1%82%d0%bd%d0%b0%d1%8f%20%d0%b8%20%d0%b2%d1%8b%d1%81%d0%be%d0%ba%d0%be%d0%bf%d1%80%d0%be%d0%b8%d0%b7%d0%b2%d0%be%d0%b4%d0%b8%d1%82%d0%b5%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d0%b0%d1%8f.pdf> (дата обращения: 12.10.2025). – Текст: электронный.
4. Васин, С. А. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учеб. / С. А. Васин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.
5. Джулий, Д. Ю. Применение метода магнитно-абразивной обработки для повышения устойчивости многогранных неперетачиваемых твёрдосплавных пластин / Д. Ю. Джулий, В. С. Майборода // Процессы механической обработки в машиностроении: сб. науч. пр. – Житомир: ЖДТУ, 2012. – Вып. 12. – С. 32-40.
6. Якубов, Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким. – Симферополь: Крымучпедгиз, 2005. – 300 с.
7. Якубов, Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием: моногр. / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с.
8. Повышение эффективности концевого фрезерования нержавеющей сталей применением модифицированной смазочно-охлаждающей технологической среды / Э. Р. Ваниев, В. В. Скакун, Э. Ш. Джемилов, И. Д. Абдулкеримов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 7 (736). – С. 10-18.
9. Сысоев, О. Е. Прогнозирование периода стойкости концевых фрез при обработке высокотвёрдых материалов / О. Е. Сысоев, С. Б. Марьин, Е. О. Сысоев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 72-75.

# Content

Научное издание

## AVIATION AND ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

<b>S. I. Feoktistov, S. B. Maryin, I. V. Lozovsky, A. K. Kravchenko</b> DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES AT ELASTIC-PLASTIC BENDING OF SHEET STOCK WITH RADIAL COMPRESSION .....	4
--	---

## ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

<b>A. V. Frolov, A. Y. Pukas</b> PULSE SIMULATOR OF THE RESISTANCE THERMOMETER SIGNAL FOR ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES VENTILATION SYSTEMS .....	11
---	----

## CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

<b>S. V. Stelmashchuk, Yu. I. Lakeev</b> LIMITING THE ELASTIC TORQUE IN A TWO-MASS MECHANICAL SYSTEM OF AN INDUCTION ELECTRIC DRIVE WITH FREQUENCY-VECTOR CONTROL.....	22
---	----

<b>S. N. Sysoyev, V. S. Sidorov</b> AUTOMATED CORRECTION OF THE RELATIVE POSITION OF MATED BUSHINGS .....	35
---	----

<b>A. A. Pukhov</b> IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE ELECTRICAL ENERGY GENERATION PROCESS BY A DIESEL POWER PLANT WHEN MANAGING THE PARAMETERS OF THE AIR ENTERING THE ENGINES.....	44
---	----

<b>D. V. Urasov</b> METHOD FOR ASSESSING ARC STABILIZATION IN ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES BASED ON THE ANALYSIS OF THREE-PHASE CURRENT STATISTICAL CHARACTERISTICS .....	50
---	----

<b>N. R. Sbitnev, D. O. Savelyev, S. P. Cherniy</b> FEATURES OF MODELING CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC DRIVES OF ROBOTIC PLATFORMS .....	55
---	----

## COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

<b>D. S. Magola</b> MODELING OF AN ADAPTIVE SENSORY SYSTEM FOR ANOMALY DETECTION BASED ON A BIOINSPIRED AGENT-BASED APPROACH .....	64
--	----

<b>K. D. Khryapenko, A. L. Grigorieva</b> PREDICTION OF THE PROBABILITY OF CRACK FORMATION IN PLATES OF VARIOUS METALS UNDER LONGITUDINAL TENSION USING NEURAL NETWORKS .....	72
--	----

<b>B. S. Ivanov, S. M. Kopytov, A. V. Ulyanov</b> JUSTIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS OF A CONTROLLED GAS-MAGNETIC SUPPORT .....	77
--	----

<b>I. D. Lipanov</b> AUTOMATED DIAGNOSTICS OF RAILWAY INFRASTRUCTURE BASED ON RGB AND PSEUDO-LIDAR DATA FROM UAVS USING NEURAL NETWORK MODELS .....	86
--	----

<b>A. N. Petrova, D. O. Frolov</b> INFLUENCE OF VARIOUS TYPES OF NOISES AND DATA MISSING ON THE QUALITY OF NEURAL NETWORK RANKING .....	94
---	----

## MACHINERY

<b>I. S. Maksimov, S. A. Galanskiy, V. G. Rakhcheev, A. I. Kushnir</b> FEATURES OF THE PROCESS OF RESTORING THE SURFACE GEOMETRY OF RAILS AND TURNOUT COMPONENTS USING FORM-SHAPED ABRASIVE WHEELS .....	105
---	-----

<b>E. R. Vaniev, E. Sh. Dzhemilov, E. L. Bekirov, S. A. Timofeev, T. I. Bashkova</b> INCREASING THE LIFETIME OF END MILLS WHEN MACHINING TITANIUM ALLOYS DUE TO RUNNING-IN .....	115
--	-----

Учёные записки КНАГТУ  
2026 № 1 (89)  
Науки о природе  
и технике

Выпускающий редактор  
Е. П. Иванкова

Подписано в печать 27.03.2026  
Дата выхода в свет 31.03.2026

Формат А4.  
Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.  
Усл. печ. л. 14,18.  
Уч.-изд. л. 13,60.  
Тираж 200. Заказ 31411

Отпечатано:  
в типографии КНАГУ  
681013,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 27;  
в типографии «Агора»  
681024,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 39.

