

ISSN 1813-8225 (Print)
ISSN 2541-7541 (Online)

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАУЧНЫЕ

2023

№ 1 (185)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издается с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 1 (185) 2023

УЧРЕДИТЕЛИ:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»

Свидетельство о регистрации
ПИ № ТУ55-00559 от 06.10.2017 г.
выдано Управлением Роскомнадзора
по Омской области

Сайт журнала:
<https://journals.omgту.ru>

Страница журнала на сайте учредителя:
[http://www.omgту.ru/
general_information/media.omgту/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgту.ru/general_information/media.omgту/journal_of_omsk_research_journal/)

Подписной индекс
в каталоге Роспечать 83597

Ответственный секретарь
М. Ф. Федорчук

Редактор
Т. П. Семина

Компьютерная верстка
О. Н. Чирун

Макет обложки
В. С. Гуринов

© Редакция журнала
«Омский научный вестник», ОмГТУ

Подписано в печать 16.02.2023 г.
Дата выхода в свет 27.02.2023 г.

Формат 60x84 1/8. 15,58 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 12
Цена свободная

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- КОСЫХ Анатолий Владимирович**, главный редактор, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ОВЧАРЕНКО Сергей Михайлович**, д. т. н., профессор, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск
- ГАЛИЕВ Ильхам Исламович**, д. т. н., профессор, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск
- АВДЕЕВА Диана Константиновна**, д. т. н., профессор, Томский политехнический университет, г. Томск
- БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- БУБНОВ Алексей Владимирович**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ВАВИЛОВ Владимир Платонович**, д. т. н., профессор, Томский политехнический университет, г. Томск
- ГОРЮНОВ Владимир Николаевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ГРАДОБОВЕВ Александр Васильевич**, д. т. н., профессор, Томский политехнический университет, г. Томск
- ЗАХАРЕНКО Владимир Андреевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- КАРПОВ Валерий Васильевич**, д. э. н., профессор, Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Омск
- КОЗЛОВ Александр Геннадьевич**, д. т. н., доцент, Омский государственный технический университет, г. Омск
- КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович**, д. т. н., профессор, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск
- МАЙСТРЕНКО Василий Андреевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- НАУМЕНКО Александр Петрович**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- НОВИКОВ Алексей Алексеевич**, д. т. н., Омский государственный технический университет, г. Омск
- НОВОЖИЛОВ Александр Николаевич**, д. т. н., профессор, Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар, Республика Казахстан
- ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич**, д. т. н., Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск
- ПАНЧУК Константин Леонидович**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ПОЛЕЩЕНКО Константин Николаевич**, д. т. н., профессор, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск
- ПОЛИЩУК Владимир Иосифович**, д. т. н., профессор, Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул
- ПОПОВ Андрей Юрьевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ПОПОВ Евгений Владимирович**, д. т. н., профессор, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород
- РАУБА Александр Александрович**, д. т. н., профессор, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск
- РОТКОВ Сергей Игоревич**, д. т. н., профессор, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород
- СУШКОВ Валерий Валентинович**, д. т. н., профессор, Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск
- СЫЗРАНЦЕВ Владимир Николаевич**, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень
- ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович**, к. т. н., доцент, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ТОЛОК Алексей Вячеславович**, д. т. н., профессор, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва
- ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич**, к. т. н., Омский государственный технический университет, г. Омск
- ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск
- ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович**, д. т. н., доцент, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович**, д. т. н., доцент, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ШАЛАЙ Виктор Владимирович**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ЩЕРБА Виктор Евгеньевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, г. Омск
- ЮРКОВ Виктор Юрьевич**, д. т. н., профессор, Омский государственный педагогический университет, г. Омск
- ЯКОВЛЕВА Елена Владимировна**, д. э. н., доцент, Омский государственный технический университет, г. Омск

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. Ю. Попов, В. А. Прокофьев. Повышение точности обработки глубоких отверстий электроэрозионной обработкой вращающимся трубчатым электродом	5
Е. В. Васильев, Ю. А. Блохина, М. М. Лакман. Схема формообразования задней поверхности пятигранных твердосплавных пластин на станках с ЧПУ	10
А. В. Жданов. Теоретические исследования гидросистемы рулевого управления строительных и дорожных машин с усилителями потока	14
А. Г. Кисель, Д. С. Макашин, Д. Ю. Белан, К. В. Аверков. Влияние режима обработки и метода охлаждения зоны резания на потребляемую максимальную мощность, высоту образовавшихся при сверлении заусенцев и получаемое отклонение диаметра	19
Е. В. Любчинов, К. Л. Панчук, Т. М. Мясоедова. Решение обратной задачи измененной циклографической модели	25
А. М. Бадамшин, С. Н. Поворознюк, В. В. Акимов, Е. А. Рогачёв, А. А. Крутько. Модификация металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 непрерывными ионными пучками	31
Л. Р. Сафарова, С. В. Касьянов, Д. Т. Сафаров. Методика нахождения параметров переходов обработки резанием в ARQP процессе подготовки производства новых автокомпонентов	37
И. А. Лоскутов, Д. А. Скворцова, В. Г. Искандарова. Динамическое нормирование с использованием метода агентного моделирования процесса сборки оборудования для атомных электростанций	46
И. А. Лоскутов, В. Г. Искандарова. Экосистемный контроллинг как решение сложной задачи оптимизации технологического процесса промышленного производства	53

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. А. Бельский, А. И. Замятин. Анализ энергетических характеристик ветроэлектрических установок	58
В. Ю. Карандей, О. Б. Попова, Б. К. Попов, В. Л. Афанасьев. Исследование изменения электромагнитных параметров в управляемых асинхронных специальных электрических приводах	65
Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева. Двенадцатипульсовые выпрямители в системе электроснабжения городского электрического транспорта	71
А. Е. Савенко, П. С. Савенко. Устойчивость работы электротехнических комплексов морских судов при изменении настроек регуляторов частоты дизель-генераторов	76
Г. Ю. Киселёв, В. М. Троценко, Е. В. Петрова, В. А. Криволапов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков, В. Н. Горюнов. Потери электрической энергии в электрических сетях	80
Н. А. Терещенко, К. И. Никитин, М. А. Холмов, В. И. Новосёлов. Расчет добавочного шунта для диагностики изоляторов	86
А. В. Симаков, В. В. Харламов, М. Ю. Чернев. Разработка математической модели функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций	93

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Г. Н. Анисимов, К. К. Ким, А. А. Ткачук, А. Ю. Кузьменко. Способ неразрушающего измерения ударного тока силовых тиристоров	99
А. А. Вальке, В. А. Захаренко, Д. Г. Лобов, Д. Б. Пономарев, А. Г. Шкаев, М. Ю. Николаев, С. В. Лукута. Инфракрасный мониторинг температуры металла поверхности труб пароперегревателей в переходных режимах	103
М. Н. Лютикова, С. М. Коробейников, А. В. Ридель. Применение хромато-масс спектрометрии для определения кислотного состава трансформаторного масла	109
Е. В. Леун. Основы построения струйно-капельных оптических систем трехкоординатных измерений напряженностей электрического, магнитного и гравитационного полей методом висящей капли. Часть 1	114
А. И. Корниенко, Д. К. Авдеева, М. М. Южаков, М. Л. Иванов, Н. В. Турушев, С. И. Еньшин. Наносенсоры для повышения разрешающей способности аппаратуры для ЭКГ и ЭЭГ картирования	122

Contents	129
Summary. Keywords	130
Требования к оформлению научных статей, направляемых в журнал «Омский научный вестник»	3

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

О содержании. Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты исследований автора (авторов), не опубликованный ранее и не направленный для рассмотрения в другом издании.

О рассмотрении поступивших материалов. На первом этапе все научные статьи проходят обязательную проверку на наличие заимствований. Материалы, содержащие менее 70 % уникального текста и не соответствующие действующим требованиям оформления статей, возвращаются автору (авторам). Статьи, прошедшие проверку на уникальность текста и соответствие тематике научных направлений журнала, редакция направляет на рецензирование. Высказанные замечания передаются автору (авторам). После доработки материалы вновь рассматривают рецензенты, после чего принимается решение о направлении в печать.

Об оформлении. Статью необходимо набрать в текстовом редакторе Word (с расширением *.doc или *.docx) (шрифт — Times New Roman Cyr 14 пт, абзацный отступ — 0,5 см, межстрочный интервал — полуторный, **без переносов в словах**). Распечатать на бумаге форматом А4 (210×297 мм).

Оригинал должен быть чистым, не согнутым, без ручных правок. Страницы должны быть пронумерованы карандашом на обороте. Объем статьи — **10–15** страниц, включая рисунки и таблицы (без учета аннотации, ключевых слов, библиографического списка и сведений об авторах); при этом собственно текст — не менее **6–7** страниц.

Поля: сверху и снизу — по 2,5 см; слева и справа — по 2 см.

Заголовок. В верхнем левом углу листа представляется УДК. Далее, по центру, печатается название статьи (**прописная буква только первая**). В названии статьи нельзя использовать аббревиатуры. Ниже — инициалы, фамилия автора (авторов), строкой ниже — полное название организации, через запятую — город.

Ниже через строку помещаются текст аннотации и ключевые слова на русском языке.

Аннотация должна отражать основную тему статьи, её актуальность, цель и задачи исследования, а также его результаты. В аннотации автор (авторы) указывает, что нового несет в себе данная работа в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению. Рекомендуемый средний объем аннотации — от 500 печатных знаков.

Ключевые слова — 6–8 слов/словосочетаний, которые должны отражать специфику темы, субъект и результаты исследования. Следует избегать слов/словосочетаний общего характера. При подборе ключевых слов рекомендуется использовать термины и словосочетания, используемые в исследуемых областях.

Через строку **на английском языке** приводятся инициалы и фамилия автора (авторов), название статьи, полное название организации, аннотация и ключевые слова (Keywords).

Далее через строку помещают основной текст статьи.

Текст статьи должен быть структурирован. Рекомендуемые названия разделов: **«Введение»**, **«Постановка задачи»**, **«Теория»**, **«Результаты экспериментов»**, **«Обсуждение экспериментов»**, **«Выводы»** и/или **«Заключение»**.

Если в тексте есть **примечания**, то после основного текста, перед библиографическим списком, набирается по центру заголовков «Примечания» и через строку помещаются тексты примечаний, пронумерованные числом в виде верхнего индекса (например, ¹) в порядке ссылок по тексту. **Ссылка на примечание** в основном тексте оформляется числом в виде верхнего индекса с полужирным начертанием (например, ... модели¹). Автоматическая нумерация примечаний не допускается.

Формулы. Простые внутривстрочные и однострочные формулы, не содержащие специальных символов (отсутствующих на клавиатуре), должны быть набраны символами с клавиатуры без использования специальных редакторов. Одиночные специальные символы, отсутствующие на клавиатуре, формулы, содержащие специальные символы, отсутствующие на клавиатуре, а также сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** или **MathType**. Не допускается набор части формулы символами, а части — в редакторе формул. Если в тексте статьи формулы нумеруются, то эту нумерацию следует выполнять набором чисел. Автоматическая нумерация не допускается.

В тексте статьи должны содержаться ссылки на источники информации (не менее 10–15 источников):

— обязательное цитирование современных работ (оценивается доля цитируемых публикаций, изданных по тематике статьи за последние 5 лет);

— наличие баланса между ссылками на отечественные и иностранные публикации (показывает, насколько автор (авторы) рукописи владеет современным состоянием проблемы в России и за рубежом);

— доля ссылок на статьи автора (авторов), изданных ранее, не должна превышать 20 % от общего количества ссылок.

В научных обзорах количество ссылок на источники информации должно быть не менее 25.

Ссылки на источники информации нумеруются последовательно, по мере упоминания в тексте, и обозначаются числами, заключенными в квадратные скобки (например, [1]). Если ссылка на источник информации в статье упоминается неоднократно, то повторно в квадратных скобках указывается его номер из списка (без использования в библиографическом списке следующего порядкового номера и ссылки «Там же»). В случае, когда ссылаются на различные материалы из одного источника, в квадратных скобках указывают каждый раз еще и номер страницы, например, [1, с. 17] или [1, с. 28–29].

Библиографический список. В тексте должны содержаться ссылки на источники информации. Ниже основного текста (или текстов примечаний) печатается по центру заголовок «Библиографический список» и через строку помещается пронумерованный перечень источников в порядке ссылок

по тексту в соответствии с действующими требованиями редакции к библиографическому описанию. В одном пункте перечня следует указывать только один источник информации.

Таблицы помещаются на новой странице после библиографического списка. Нумерация таблиц производится в порядке ссылок по тексту. Нумерационный заголовок таблицы набирается шрифтом с полужирным начертанием с выравниванием по правому краю (например, **Таблица 1**). Тематический заголовок (если имеется) набирается на следующей строке шрифтом с полужирным начертанием с выравниванием по центру. Ссылка на таблицу в основном тексте оформляется шрифтом с полужирным начертанием в скобках — например, **(табл. 1)**. Если таблица имеет большой объем, она может быть помещена на отдельной странице, а в том случае, когда она имеет значительную ширину, — на странице с альбомной ориентацией.

Рисунки последовательно размещаются на новой странице после таблиц (или библиографического списка). Нумерация рисунков производится в порядке ссылок по тексту. Нумерационный заголовок набирается шрифтом с полужирным начертанием с выравниванием по центру (например, **Рис. 1**). Тематический заголовок (если имеется) — в той же строке сразу же после нумерационного (например, **Рис. 1. Зависимость...**). Ссылка на рисунок в основном тексте оформляется шрифтом с полужирным начертанием в скобках — например, **(рис. 1)**. Если рисунок имеет большой формат, он должен быть помещен на отдельной странице, а в том случае, когда он имеет значительную ширину, — на странице с альбомной ориентацией. Рисунки могут быть

сканированными с оригинала (с разрешением 150–300 dpi) или выполнены средствами компьютерной графики и сохранены в форматах JPEG, TIFF, BMP, PSD. Объем файла рисунка не должен превышать **3 Мб**. Использование графики в формате MS Visio, различных CAD и других программ не допускается. Рисунки должны быть четкими. Все позиции на рисунке должны быть расшифрованы и описаны. Легенда рисунка должна быть легко читаемой, шрифт не менее 8–9 пт. Название рисунка ставится непосредственно под рисунком и не должно включаться в формат рисунка.

Допускается не более **восьми** рисунков и таблиц.

На последней странице указать следующие **сведения об авторе (авторах)**: фамилию, имя, отчество; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, номер телефона (не публикуется); адрес для переписки; для иногородних авторов — почтовый адрес, на который отправляется журнал в случае публикации их статьи; SPIN-код, AuthorID (РИНЦ), ORCID, AuthorID (SCOPUS), ResearcherID.

В редакцию необходимо предоставить распечатанный вариант статьи (с личной подписью автора (авторов)) и электронную версию на любом из носителей или отправить по e-mail: **onv@omgtu.ru**.

Распечатанный вариант статьи, оригинал экспертного заключения о возможности открытого опубликования отправить по адресу:

644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ОмГТУ, редакция журнала «Омский научный вестник»

Тел. 8 (3812) 65-32-08, e-mail: onv@omgtu.ru

УДК 621.9.048.4
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-5-9

А. Ю. ПОПОВ
В. А. ПРОКОФЬЕВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ ВРАЩАЮЩИМСЯ ТРУБЧАТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

В статье рассмотрены факторы, влияющие на точность электроэрозионной обработки. Главным образом исследуется процесс образования конгломератов шлама, возникающих в результате обработки. На основе литературного анализа сопоставлена теоретическая и реальная схема электроэрозионной обработки. В результате проведенных экспериментов было выявлено, что в процессе изготовления глубоких отверстий электрод отклоняется от своей оси вследствие дестабилизации инструмента из-за не жесткости электрода и налипания шлама, образующегося в зоне обработки. Отклонение электрода от оси вращения приводит к неравномерному давлению со стороны жидкости, вымывающей шлам, что ведет к неравномерному износу на боковой стороне электрода. В ходе исследования были собраны и изучены образцы электроэрозионного шлама. Выявлена прямая зависимость между глубиной обработки и величиной отклонения: чем больше глубина обработки, тем больше величина отклонения, которая приводит к искажению формы сечения отверстия и образованию конуса вместо цилиндра. Для повышения точности обработки глубоких отверстий необходимо минимизировать отклонение электрода от оси вращения и защитить боковую поверхность электрода от воздействия тока.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, точность обработки отверстия, шлам, супердрель, обработка глубоких отверстий, трубчатый электрод-инструмент, конгломераты шлама.

Введение. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) на практике сегодня — это изменение размеров изделий из токопроводящего материала, создание отверстий различного диаметра и формы, извлечение сломанного инструмента и крепежа из узлов и деталей, шлифовка, резка, а также получение фасонных полостей, упрочнение поверхности и т.д. [1]. Многие подобные технологические проблемы не представляется возможным решить механическими методами обработки, в то время как электроэрозионные методы обработки могут быть эффективны

для получения глубоких отверстий, пазов различной формы, получение фасонных поверхностей и т.д.

Теория. В современном машиностроении широкое применение находят материалы с повышенными механическими свойствами. При изготовлении деталей и машин из труднообрабатываемых материалов получение глубоких отверстий является весьма трудоемкой операцией [2]. Применение электроэрозионной обработки зачастую становится незаменимым при решении подобных технологических проблем [3]. Главным конкурентом ЭЭО явля-

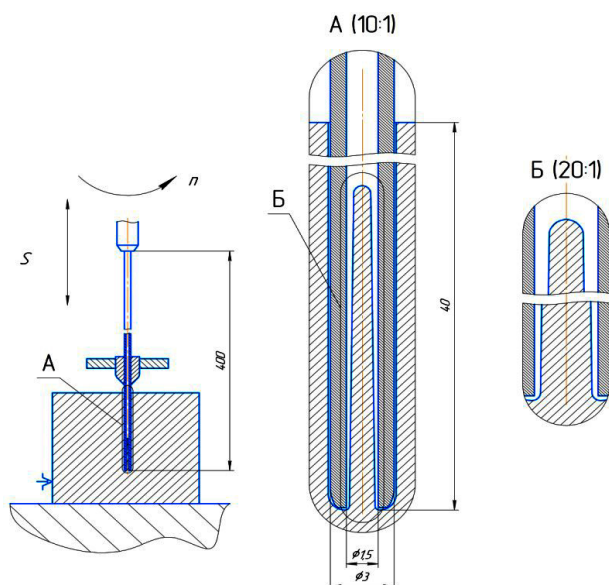


Рис. 1. Теоретическая схема обработки отверстий малого диаметра

ется метод сверления ружейными сверлами, однако такой метод позволяет получать отверстия меньшей глубины ($L/D < 100$), в то время как возможности электроэрозионной обработки позволяют получать отверстия глубиной до ($L/D < 300$).

Реальная схема обработки отличается от теоретической. В теоретически правильной схеме электрод в форме трубки должен работать только торцом (рис. 1), но в реальных условиях, когда начинается изгиб трубки, возникают силы, удерживающие и отжимающие электрод от оси отверстия. Когда отжимающие силы увеличиваются, в работу вступает боковая сторона электрода. Удерживает электрод в оси отверстия давление жидкости, протекающей между наружной поверхностью стенки электрода и стенкой отверстия детали. Стенка трубчатого инструмента прожигается, вследствие чего поток жидкости становится неконтролируемым и не вымывает шлам из зоны обработки, что приводит к подклиниванию и прекращению образования отверстия [4].

В теоретической схеме сила электрического тока максимальная за счет небольшой площади воздействия (площадь торца электрода и отверстия без учета отверстия в электроде).

В реальной схеме сила тока минимальна по причине увеличения площади воздействия электрического тока (т.к. к работе присоединяется боковая поверхность инструмента, увеличивающая суммарную площадь контакта). Вследствие чего происходит интенсивный износ боковой поверхности инструмента, что ведет к нестабильному зазору между инструментом и обрабатываемым отверстием, зоны разноименного давления создают соответствующие зоны скорости течения рабочей жидкости. Отклонение электрода от оси отверстия влечет за собой образование зон повышенного и пониженного давления, что вносит дестабилизацию в процесс обработки, уменьшается эффективность и качество обработки (рис. 2). Учитывая низкую жесткость трубчатого электрода-инструмента, данная дестабилизация обратно пропорциональна сечению электрода-инструмента [5].

При электроэрозионной обработке отверстий инструментом трубчатой формы возникают две

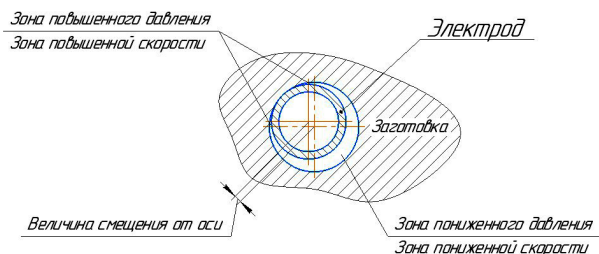


Рис. 2. Реальная схема обработки отверстий малого диаметра



Рис. 3. Образование конусности в глухом отверстии

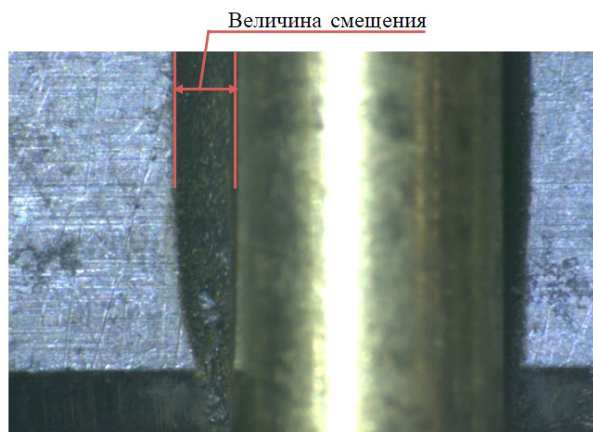


Рис. 4. Образование конусности на выходе из сквозного отверстия

причины отклонения электрода-инструмента от оси его вращения.

Первая причина кроется в низкой жесткости трубки и погрешностях базирования, которые приводят к отклонениям электрода от оси. Трубка легко деформируется и получает биение на рабочем торце. Это затрудняет равномерное обтекание ее жидкостью с частицами шлама. При обработке глубоких отверстий в зоне стесненного пространства происходит активное скопление продуктов эрозии, что приводит к возникновению вторичных структур на поверхностях электродов, увеличивающих отклонение трубки от оси вращения [6].

Вторая причина заключается в образовании конгломератов из частиц, которые, частично слипаясь друг с другом, подклинивают электрод в отверстии и смещают его от первоначальной оси. В результате этого электрод начинает работать боковой

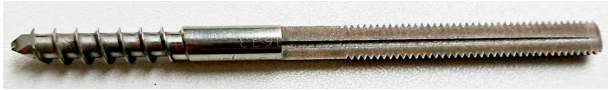


Рис. 5. Конусное глухое отверстие в детали

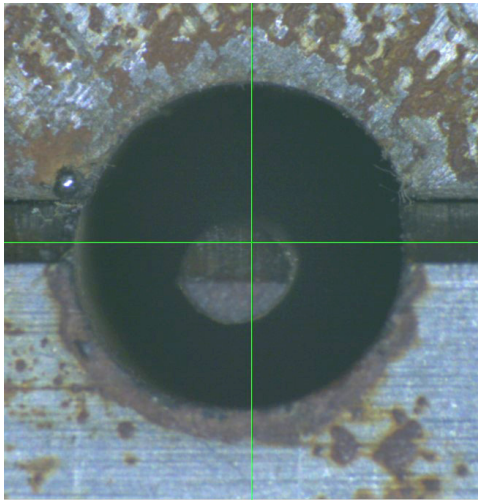


Рис. 6. Овальность получаемого отверстия

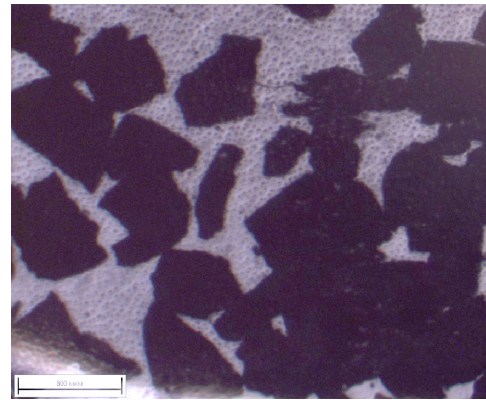
стороной, а не торцом, что приводит к утончению и полному износу стенки электрода (рис. 3). Это связано с тем, что воздействие происходит с двух сторон — торец и боковая поверхность, из-за чего электрод приобретает форму конуса, процесс получения отверстия практически прекращается (рис. 4, рис. 5). При обработке происходит увеличение диаметра электрода вследствие осаждения на его поверхности частиц уже обработанного металла, которые не успевают эвакуироваться из зоны обработки. Соответственно, увеличение диаметра электрода-инструмента ведет к увеличению диаметра обработанного отверстия [3].

В процессе электроэрозионной обработки материал обрабатываемой заготовки подвергается воздействию электрических импульсов. Под действием высоких температур происходит фазовый переход обрабатываемого материала из твердого состояния в парообразное. Пары металла при взаимодействии с рабочей жидкостью, заполняющей межэлектродное пространство, твердеют и формируют электроэрозионный шлам [7].

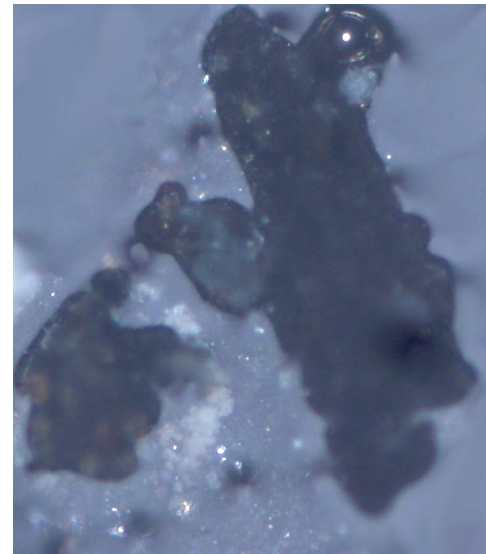
При минимальной мощности импульса размер единичной частицы минимален [2, 8]. Происходит интенсивная конгломерация мелких частиц, затрудняющая удаление продуктов эрозии из зоны обработки. Конгломераты, полученные при режимах с меньшей мощностью (чистовые режимы), крупнее и состоят из большего числа мелких частиц, чем при режимах с большой мощностью [9]. Зависимость режимных параметров электроэрозионной обработки на формирование конгломератов до конца не изучена [2, 8, 10].

Перемещение электроэрозионного шлама в зоне обработки зависит от процесса формирования и перемещения газовых пузырей (образующихся в результате высокой контактной температуры в зоне обработки) [10].

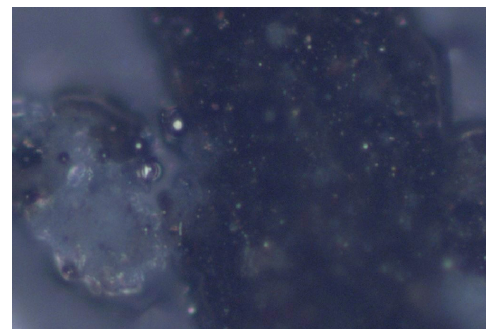
Из-за описанных выше факторов вытекает следующая проблема — отклонение формы (овальность и цилиндричность) отверстия, что негативно



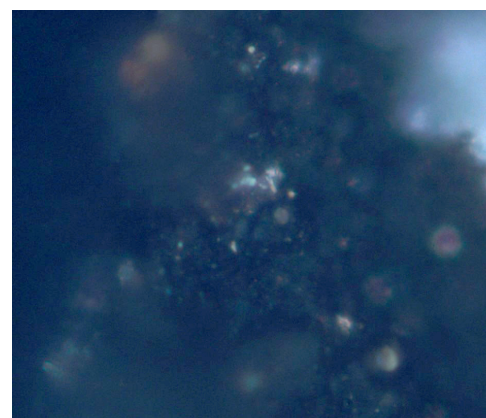
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Конгломераты шлама, полученного в процессе ЭЭО: а) 1,25 ×; б) 30 ×; в) 50 ×; г) 100 ×

:отражается на точности и качестве получаемых отверстий (рис. 6).

Известны способы улучшения эвакуации продуктов эрозии из рабочей зоны за счет вибрации электродного инструмента (амплитуда ~ 0,1 мм, частота 50 Гц), релаксации электродного инструмента (амплитуда 1–2 мм, частота 0,5–1 Гц) или за счет прокачки рабочей жидкости через электрод-инструмент. Использование только этих способов не позволяет решить задачу повышения производительности перфорации глубоких отверстий одновременно несколькими электродами [7, 11, 12].

Результаты экспериментов. В ходе работы были собраны и исследованы образцы продуктов, возникающих в процессе электроэрозионной обработки. Данные образцы были рассмотрены при различном увеличении. Измерение производилось на микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m. Электрод-инструмент изготовлен из латунного сплава, выполненный в виде одноканальной трубки наружным диаметром 3 мм. Для экспериментов использовали высокоскоростной электроэрозионный станок для выполнения мелких отверстий D720. Режимные параметры обработки: частота импульсов 55 Гц, значение рабочего тока 6 А, скорость 9 мм/мин, диэлектрическая жидкость — дистиллированная вода.

Сначала были рассмотрены частицы при наименьшем увеличении (1,25 ×) микроскопа с целью определить диапазон габаритных размеров слипшихся частиц (конгломератов). Полученный снимок представлен на рис. 7а. На снимке можно увидеть, что размеры образованных конгломератов находятся в диапазоне от нескольких десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров.

При дальнейшем рассмотрении частиц с большей кратностью увеличения (30 ×) видно скопление более мелких слипшихся частиц размером от 60 мкм до 480 мкм, имеющие различное происхождение (относящиеся к электроду-инструменту или к заготовке) (рис. 7б).

Следующий снимок сделан с кратностью увеличения микроскопа (50 ×). На нём можно увидеть структуру — более мелкие частицы, из которых состоит крупное зерно (конгломерат). Размер самых крупных частиц достигает до 40 мкм, а самых мелких — от нескольких микрометров. Снимок изображен на рис. 7в. На данном снимке видно разнородную морфологию конгломерата.

Снимок с максимальной кратностью увеличения 100 × представлен на рис. 7г. Размер мелких частиц находится в диапазоне от 1 до 4 мкм. Также на снимке можно заметить, что пространство между частицами конгломерата заполнено.

Обсуждение экспериментов. При анализе частиц шлама под микроскопом с различным увеличением, было установлено, что электроэрозионный шлам неоднороден. По своей структуре он состоит из частиц различного размера и формы, слипшихся в конгломераты. Сами конгломераты сформированы из частиц обрабатываемого материала и частиц электрода.

Относительно большие (до нескольких миллиметров) габаритные размеры конгломератов в зоне затрудненной эвакуации (особенно в зоне обработки глубоких отверстий) являются одной из главных проблем электроэрозионной обработки.

Выводы. На основе проведенного анализа, исследования и экспериментов предлагаются следующие варианты по повышению точности обработки

глубоких отверстий электроэрозионной обработкой вращающимся трубчатым электродом:

1. Контролировать расход рабочей жидкости, для очищения зоны обработки от шлама и уменьшения перепада давления, вызывающего дополнительное воздействие, способствующее отклонению инструмента от оси его вращения.

2. Целесообразно применять износостойкие изолирующие покрытия на наружной поверхности электрода в целях увеличения точности получаемого отверстия.

Библиографический список

1. Владыкин А. В., Макаров В. Ф. Эффективность электроэрозионного сверления отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов // Технология машиностроения 2011. № 5. С. 13–17.
2. Zhang Z., Zhang Y., Ming W. A review on magnetic field assisted electrical discharge machining // Journal of Materials Processing Technology. 2021. Vol. 64 (13). P. 694–722. DOI: 10.1016/j.jmatpro.2021.01.054.
3. Левинсон Е. М., Лев В. С. Электроэрозионная обработка: справочное пособие по электротехнологии. Ленинград: Лениздат, 1972. 328 с.
4. Schumacher B. M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed // J. Matl. Proc. Tech. 2004. № 149. P. 376–381. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.060.
5. Rajamanickama S., Prasannab J. Multi Objective Optimization during Small Hole Electrical Discharge Machining (EDM) of Ti-6Al-4V using TOPSIS // ScienceDirect. 2019. Vol. 18. P. 3109–3115. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.184.
6. Cetin S., Okada A., Uno Y. Effect of debris distribution on wall concavity in deep-hole EDM // JSME International Journal Series C. 2004. № 47. P. 553.
7. Саушкин Б. П. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей. Москва: Дрофа, 2002. 655 с.
8. Ганцев Р. X. Оптимизация управления параметрами разрядных импульсов в процессе электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 10, № 2 (27). С. 42–47.
9. Сафонов И. И., Дорошкина Н. Н. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя. Кишинев: Stiinta, 1999. 472 с.
10. Попилов Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Москва: Машиностроение, 1982. 400 с.
11. Оглезнев Н. Д., Абляз Т. Р. Влияние режимов электроэрозионной обработки на точность получения отверстий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4-2. С. 396–398.
12. Jianga Y., Zhao W., Xi X. A study on pulse control for small-hole electrical discharge machining // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212 (7). P. 3109–3115.

ПОПОВ Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4871-2344

ORCID: 0000-0002-7703-9283

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

Адрес для переписки: popov_a_u@list.ru

ПРОКОФЬЕВ Владимир Андреевич, инженер-конструктор 2-й категории научно-технического управления по разработке комплексов АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск.

SPIN-код: 3976-3404

AuthorID (РИНЦ): 1110099

ORCID: 0000-0001-7270-673X

Адрес для переписки: vladimirprokofev1999@mail.ru

Для цитирования

Попов А. Ю., Прокофьев В. А. Повышение точности обработки глубоких отверстий электроэрозионной обработкой вращающимся трубчатым электродом // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-5-9.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022 г.

© А. Ю. Попов, В. А. Прокофьев

СХЕМА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЯТИГРАННЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН НА СТАНКАХ С ЧПУ

Рассмотрены способы шлифования задних поверхностей многогранных твердосплавных пластин, а также различные схемы формообразования задних поверхностей. Смоделирован процесс формообразования задней поверхности пятигранной твердосплавной пластины. Разработан алгоритм реализации кинематической схемы формообразования задней поверхности пятигранных твердосплавных пластин средствами САПР. Осуществлена обработка многогранной твердосплавной пластины на шлифовально-заточном станке с ЧПУ с использованием полученной математической зависимости.

Ключевые слова: восстановление режущего инструмента, затачивание, твердосплавные пластины, моделирование, способ шлифования, схемы формообразования.

I. Введение. В современности существует тенденция к повышению требований к точности изготавливаемых деталей в промышленности. Повышение механических характеристик материалов и уменьшение допусков приводит к значительному усложнению обработки и затруднению получения указанных параметров. Для достижения заданной точности используется современное оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ).

Для осуществления обработки на станках с ЧПУ применяется монокристаллический твердосплавный инструмент и режущий инструмент со сменными твердосплавными пластинами. На производстве используется более 90 % инструментов импортного производства [1].

В настоящее время наблюдаются перебои с поставками режущего инструмента, что может привести к срыву выполнения заказов. В связи с этим есть потребность в восстановлении режущего инструмента как монокристаллического, так и со сменными пластинами [2–4].

Режущий инструмент может составлять до 20 % стоимости одной детали [5]. С целью снижения затрат на изготавливаемую деталь необходимо обеспечить переточку твердосплавных пластин с максимальной производительностью и с полученной стойкостью данного инструмента, практически или полностью соответствующей новому инструменту [6–7].

На данный момент существует два способа снижения расходов промышленных предприятий на инструментальное обеспечение:

1. Реновация твердосплавного инструмента алмазным шлифованием и затачиванием [8–10].
2. Использование изношенного твердосплавного инструмента, не подлежащего восстановлению

как заготовки для изготовления инструмента новой конструкции [1, 5, 11].

На промышленных предприятиях преобладает практика утилизации режущего инструмента в том числе многогранных твердосплавных пластин (МТП), аргументируя это необратимыми изменениями в структуре твердого сплава, запрещающими его дальнейшее использование. Однако массовые испытания изношенных и восстановленных МТП не подтверждают этот тезис [5].

Решение данной проблемы остается в реновации изношенных МТП алмазным шлифованием и затачиванием. Себестоимость восстановления изношенного инструмента может составлять до 20 % от стоимости нового при практически идентичном периоде стойкости [12].

II. Постановка задачи. В данной научной статье сформулированы следующие задачи:

1. Смоделировать процесс алмазного шлифования задней поверхности пятигранной твердосплавной пластины.
2. Разработать алгоритм реализации кинематической схемы формообразования задней поверхности пятигранных твердосплавных пластин средствами САПР.

III. Теория. Шлифование задних поверхностей МТП осуществляется двумя способами: копированием и бескопирным способом [8].

Бескопирный способ шлифования задних поверхностей МТП основан на использовании станков с ЧПУ. При данном методе главные формообразующие движения — поступательное в направлении оси X, вращательные вокруг осей B и C осуществляются с помощью шаговых электродвигателей, управляемых системой числового программного управления (ЧПУ) станка (рис. 1). Такой

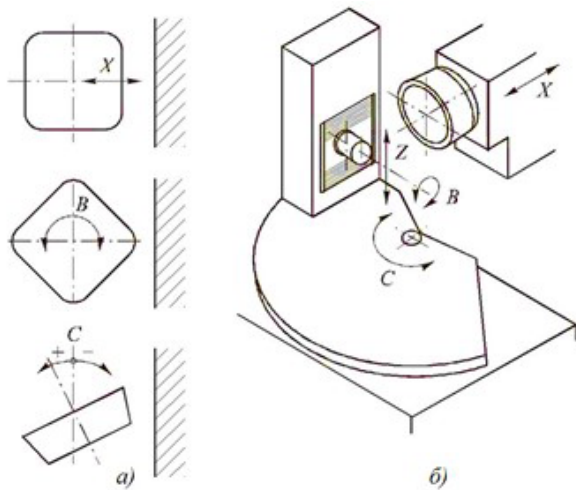


Рис. 1. Схема шлифования задних поверхностей МТП на станке с ЧПУ: а — главные формообразующие движения; б — данные движения на станке
 Источник: https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KIRSSANOV/met_work/Tab2/Tab1/ST2.pdf

способ шлифования позволяет производить обработку задних поверхностей пластин любых форм, в том числе пластин, имеющих задний угол на гранях и вершинах [8].

В настоящее время второй способ зарекомендовал себя как более точный метод и, на данный момент, более широко распространен, чем первый.

Для разработки управляющих программ для станка с ЧПУ необходимо рассмотреть две схемы формообразования задней поверхности МТП.

При осуществлении первой схемы МТП совершает движение огибания относительно инструмента, а инструмент — движение резания. В существующем научном труде было установлено, что данная схема нецелесообразна к применению, так как при осуществлении движения огибания МТП выйдет за пределы рабочей поверхности шлифовального круга [13].

При осуществлении второй схемы движение МТП раскладывается на две взаимосвязанные составляющие: возвратно-поступательное движение МТП относительно инструмента и вращательное движение вокруг оси, проходящей через центр модели инструмента в смещенном положении. В данной работе будет рассмотрена только вторая схема формообразования.

Исходными данными для моделирования процесса обработки задней поверхности МТП алмазным шлифованием являются: модель прямой призмы, торцовым сечением которой является равносторонний пятиугольник со стороной, равной t (рис. 2); величина припуска p под шлифование; радиус R ; фрагмент модели инструмента — алмазного шлифовального круга I .

IV. Результаты исследования. Для разработки алгоритма реализации выбранной схемы формообразования проанализируем положения моделей МТП относительно инструмента, приведенные на рис. 3.

В исходном состоянии МТП находится в положении I . Для обеспечения резания МТП необходимо переместиться из положения I в положение II , вращаясь на угол φ относительно точки A , являющейся центром дуги радиуса R . В ходе указанного движения центр пластины переместится из точки O

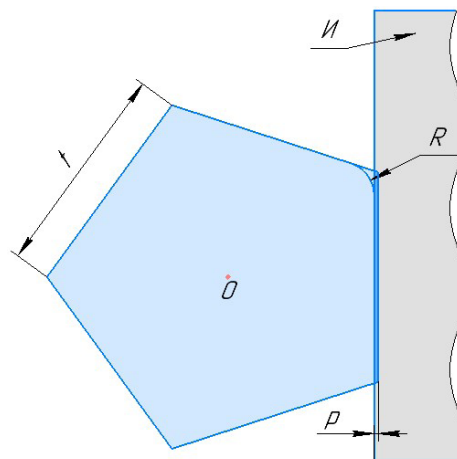


Рис. 2. Твердотельные модели многогранной твердосплавной пластины и инструмента

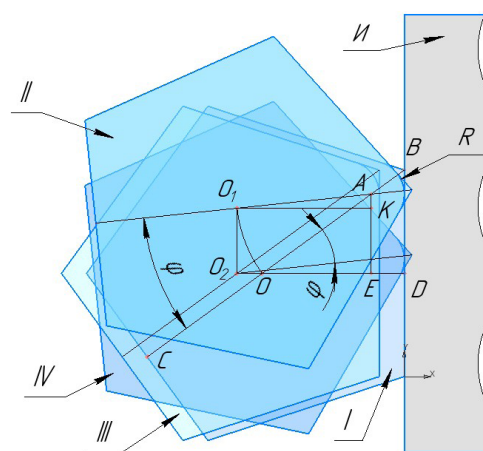


Рис. 3. Схема геометрического перемещения МТП относительно инструмента во время обработки

в точку O_1 . Но станок с ЧПУ не может обеспечить движение со смещением центра МТП, поэтому при движении пластины из положения I в положение II была найдена образующая, по которой после среза части припуска пластина касается инструмента. По той же образующей пластина и инструмент будут касаться, если обеспечить осуществление двух взаимосвязанных движений. Сначала МТП из положения I возвратно-поступательно перемещается в положение III , вследствие чего центр пластины из точки O перемещается в точку O_2 . Далее пластина, вращаясь вокруг центра O_2 на угол φ , перемещается в положение IV , таким образом, обеспечивая совпадение образующей и возможность обработки пластины данным способом на станке с ЧПУ.

Таким образом, выведен следующий алгоритм действий для осуществления указанного взаимосвязанного возвратно-поступательного и вращательного движения:

1. Переместить МТП относительно инструмента в положение III на величину, равную OO_2 ;
2. Повернуть пластину вокруг центра O_2 на угол φ ;
3. Пластина займет IV положение, вследствие чего будет обеспечено резание по необходимой образующей.

Описанная последовательность действий определяет алгоритм реализации указанной кинематиче-

ской схемы формообразования задней поверхности многогранных твердосплавных пластин средствами САПР. Для разработки программы, в соответствии с этим алгоритмом, требуется установить связь между соответствующим поступательным и вращательным движением МТП.

Для начала необходимо определить величину отрезка BD :

$$BD = t/2, \quad (1)$$

где t — размер стороны пятиугольника.

Как известно, размеры стороны t пятиугольника и его высоты H связаны зависимостью

$$t = \frac{2H}{\sqrt{5+2\sqrt{5}}}. \quad (2)$$

Так как в правильном пятиугольнике угол при его вершине равен 108° , то из треугольника ODB имеем:

$$OD = BD \cdot \operatorname{tg}54^\circ = \frac{H}{\sqrt{5+2\sqrt{5}}} \cdot \operatorname{tg}54^\circ. \quad (3)$$

А координаты точки A будут:

$$X_A = OE = OD - R = \frac{H}{\sqrt{5+2\sqrt{5}}} \cdot \operatorname{tg}54^\circ - R. \quad (4)$$

$$Y_A = OE \cdot \operatorname{ctg}54^\circ = \left(\frac{H}{\sqrt{5+2\sqrt{5}}} \cdot \operatorname{tg}54^\circ - R \right) \cdot \operatorname{ctg}54^\circ. \quad (5)$$

Для определения координат центра заготовки в точке O_2 вычислим OA и O_1K . Из рис. 3 следует, что

$$|OA| = |O_1A| = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}. \quad (6)$$

$$O_1K = OA \cdot \sin(\varphi + 54^\circ). \quad (7)$$

Подставляя вычисленные значения в выражениях (4), (6), получаем координаты точек центров O_1 и O_2 соответственно:

$$X_{O_1} = X_{O_2} = OE - O_1K = \frac{H}{\sqrt{5+2\sqrt{5}}} \cdot \operatorname{tg}54^\circ - R - \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} \cdot \sin(\varphi + 54^\circ). \quad (8)$$

$$Y_{O_1} = Y_{O_2} = 0. \quad (9)$$

Приведенный алгоритм и зависимости явились основой для разработки соответствующих программ моделирования формообразования для второй кинематической схемы. Результаты 2D моделирования представлены на рис. 4.

V. Обсуждение экспериментов. Полученные зависимости были использованы при составлении управляющих программ на станке ВЗ-700Ф4 для шлифования МТП по контуру.

Выбран способ крепления многогранных твердосплавных пластин на станке (рис. 5). Сборка крепления данным способом происходит следующим образом: Направляющая 1 устанавливается на на-

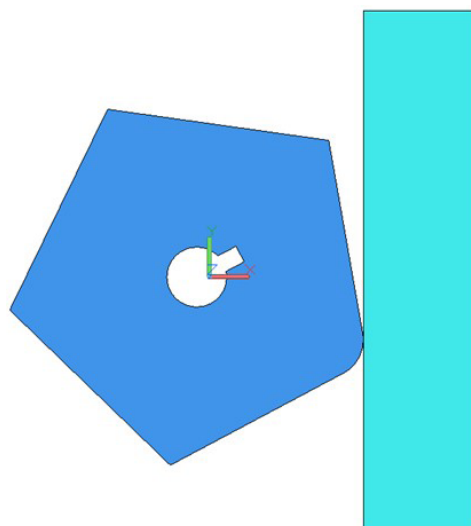


Рис. 4. 2D-модель формообразования многогранной твердосплавной пластины инструментом по второй кинематической схеме

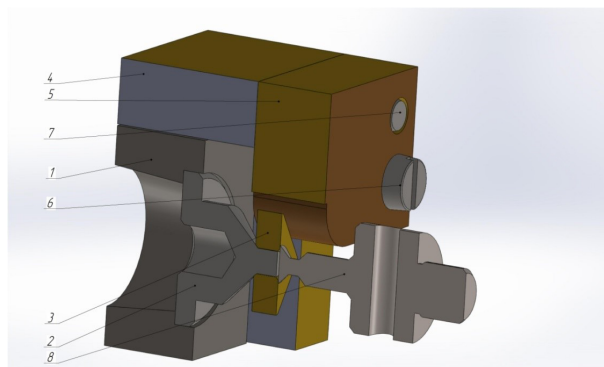


Рис. 5. Сборка крепления МТП на станке

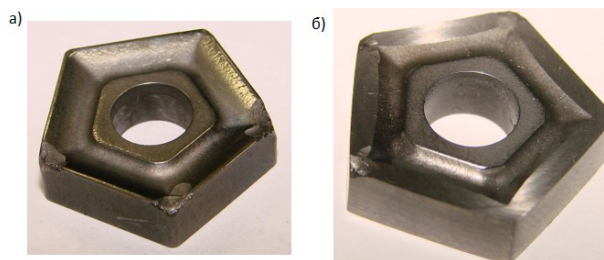


Рис. 6. Восстановление МТП: а) вид изношенной пластины; б) вид пластины после восстановления

ружный конус шлифовальной бабки станка (на рис. не показано). В направляющую 1 устанавливается сменная оправка пластины 2 и фиксируется к направляющей при помощи шомпола (на рис. не показано). На шлифованную бобышку оправки пластины 2 базируется обрабатываемая деталь (пластина) 3 по диаметру бобышки и шлифованной фаски, что обеспечивает надежное базирование и избежание последствий биения сменной оправки пластины 2. Положение пластины 3 выставляется при помощи фиксатора положения пластины 5, который крепится к корпусу 4 с помощью винтов 6 и штифтов 7. Пластина 3 в процессе шлифования поджимается сменным прижимом 8.

Результатом апробации обработки многогранных твердосплавных пластин на шлифовально-за-

точном станке по выведенной выше математической методике является восстановленная геометрия пластин с необходимой шероховатостью (рис. 6).

VI. Выводы и заключения.

1. Смоделирован процесс алмазного шлифования задней поверхности пятигранного инструмента по схеме бескопирного метода. Подробно рассмотрено движение огибания МТП, для удобства программирования на станках с ЧПУ, разбитое на две составляющие: возвратно-поступательное движение относительно инструмента и вращательное движение вокруг оси, проходящей через центр прямой призмы в сдвинутом положении (через точку O_2).

2. Разработан алгоритм реализации указанной кинематической схемы формообразования задней поверхности многогранных твердосплавных пластин средствами САПР. А именно выведены формулы и зависимости движения МТП относительно инструмента для дальнейшего применения в программировании станков с ЧПУ. Внедрение программы, основанной на выведенных математических зависимостях, успешно осуществлено на станке ВЗ-700Ф4 для шлифования пятигранных МТП по контуру.

Библиографический список

1. Vasil'ev E. V., Popov A. Yu., Bugai I. A., Nazarov P. V. Manufacture and Design of Special Hard-Alloy Mills // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, № 8. P. 522–533. DOI: 10.3103/S1068798X14080140.
2. Кузнецов А. М., Якимов С. А., Лобанов Д. В., Янюшкин А. С. Расчет напряжений, возникающих при затачивании твердосплавного инструмента с малым углом заострения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 2 (22). С. 25–30.
3. Медведева О. И., Янюшкин А. С., Лобанов Д. В. [и др.]. Анализ геометрии контактного взаимодействия алмазного круга с обрабатываемой деталью при плоском шлифовании // Механика XXI века. 2013. № 12. С. 104–106.
4. Лобанов Д. В., Янюшкин А. С., Кирпикова Е. И. [и др.]. Сравнительный анализ методов комбинированной алмазной обработки твердых сплавов // Механика XXI века. 2012. № 11. С. 155–159.
5. Васильев Е. В., Попов А. Ю. Определение рациональной геометрии режущей части переточенных твердосплавных пластин, предназначенных для чернового точения // СТИН. 2014. № 2. С. 16–20.
6. Янюшкин А. С., Кудряшов С. М., Сивков Д. В. [и др.]. Перспективный метод обработки твердого сплава на плоскошлифовальном станке // Системы. Методы. Технологии. 2009. Т. 4, № 4. С. 71–74.
7. Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Ковалевский С. В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2009. Т. 1, № 1. С. 95–98.
8. Палей М. М., Дибнер Л. Г., Флид М. Д. Технология шлифования и заточки режущего инструмента. Москва: Машиностроение, 1988. 288 с.

9. Васильев Е. В., Попов А. Ю. Реновация твердосплавных концевых фрез на шлифовально-заточных станках с ЧПУ // СТИН. 2013. № 12. С. 11–14.

10. Васильев Е. В., Попов А. Ю., Реченко Д. С. Алмазное шлифование твердосплавных пластин // СТИН. 2012. № 5. С. 7–10.

11. Vasilyev E. V., Popov A. Y., Rechenko D. S. Diamond grinding of Hard-Alloy plates // Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32, № 11-12. P. 730–732. DOI: 10.3103/S1068798X12110214

12. Vasil'ev E. V., Popov A. Y. Restoration of an axial hard-alloy tool by deep diamond grinding // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35, № 10. P. 780–782. DOI: 10.3103/S1068798X15100251.

13. Васильев Е. В., Попов А. Ю., Ляшков А. А., Назаров П. В. Разработка стратегии обработки твердосплавных многогранных пластин по контуру на шлифовально-заточных станках с ЧПУ // СТИН. 2018. № 2. С. 31–34.

ВАСИЛЬЕВ Евгений Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Металло-режущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6546-3741

AuthorID (РИНЦ): 649120

ORCID: 0000-0001-5986-8873

AuthorID (SCOPUS): 56503710300

ResearcherID: L-8864-2014

БЛОХИНА Юлия Андреевна, аналитик Регионального центра импортозамещения, студент-магистрант гр. КТОМ-222 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7469-1953

AuthorID(РИНЦ): 1108870.

Адрес для переписки: blokhina_julia@mail.ru

ЛАКМАН Михаил Михайлович, аналитик Регионального центра импортозамещения, магистрант гр. КТОМ-222 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8721-8847

AuthorID(РИНЦ): 1113663

Для цитирования

Васильев Е. В., Блохина Ю. А., Лакман М. М. Схема формообразования задней поверхности пятигранных твердосплавных пластин на станках с ЧПУ // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 10–13. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-10-13.

Статья поступила в редакцию 20.10.2022 г.

© Е. В. Васильев, Ю. А. Блохина, М. М. Лакман

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОСИСТЕМЫ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ МАШИН С УСИЛИТЕЛЯМИ ПОТОКА

В статье представлены результаты теоретических исследований функционирования усилителей потока, целью применения которых является повышение полезной мощности гидросистем рулевого управления тяжелых строительных и дорожных машин, что особенно актуально при модернизации существующей техники и проектировании новой. Усилители потока позволяют увеличить подачу рабочей жидкости в гидроцилиндры поворота кратно дозируемого объема насосом-дозатором. Отличительной особенностью исследования является рассмотрение двух усилителей потока дроссельного и объемного типов, работающих в паре. Описаны конструкция, принцип работы, представлены основные расчетные зависимости, на основе которых проводилось математическое моделирование. Для оценки качественных и количественных характеристик усилителей были получены графики переходных процессов в гидросистеме рулевого управления, а также статические характеристики усилителей потока. Анализ полученных зависимостей показал приемлемую точность и качество работы гидросистемы. Полученные результаты могут применяться при синтезе подобных систем.

Ключевые слова: гидросистема рулевого управления, строительные и дорожные машины, усилитель потока, коэффициент усиления, теоретические исследования, переходные процессы, статические характеристики.

Введение. Увеличение объемов земляных работ в строительстве привело к созданию высокопроизводительных тяжелых строительных и дорожных машин. В то же время необходимость перемещения грунта с высокой скоростью и в стесненных условиях потребовало разработки этих машин на базе колесных ходовых устройств [1].

Для обеспечения требований к производительности гидросистем рулевого управления таких машин широко применяют усилители потока, что позволяет увеличить подачу рабочей жидкости в гидроцилиндры поворота кратно дозируемого объема насосом-дозатором.

Постановка задачи. Решение задач оптимизации конструктивных параметров исполнительных рулевых механизмов с усилителями потока невозможно без анализа динамических процессов, протекающих в гидросистеме рулевого управления. Динамику системы наглядно отражают графики переходных процессов, получаемые на основе математического моделирования.

Исследования проводились для гидросистемы рулевого управления фронтального погрузчика на базе трактора К-701 с двумя гидроцилиндрами поворота ЦГ-125.63.40х400.11. В базовом исполнении применяется гидромеханическая система [2], т.к. существующие объемы насосов дозаторов без применения дополнительных гидравлических устройств не обеспечивают достаточную подачу.

По требованиям полный поворот должен осуществляться не менее чем за 6 оборотов рулевого колеса [3].

Для обеспечения необходимой подачи рабочей жидкости в гидроцилиндры поворота предлагается схема гидрообъемного рулевого управления (рис. 1) с усилителями потока дроссельного и объемного типов [4–6], применение которых направлено на повышение полезной мощности гидросистемы рулевого управления. Указанный технический результат достигается за счет увеличения подачи на выходе из системы рулевого управления путем использования в качестве усилителя потока гидромотора 1 и гидронасоса 2, кинематически связанных между собой и установленных в напорной магистрали, выходы гидромотора и гидронасоса гидравлически связаны между собой и соединяются с рабочими гидролиниями исполнительных гидроцилиндров 3. Насос-дозатор 4 через двухпозиционный гидроуправляемый пятилинейный распределитель 5 в рабочих позициях основного гидрораспределителя 6 соединяется с гидромотором 1. В двухпозиционном гидроуправляемом пятилинейном распределителе 5 расположены обратные клапаны 7 и дроссели 8, входы которых соответственно соединены с насосом-дозатором 4 и питающим насосом 9, а суммарный поток рабочей жидкости пропорционально площадям поперечных сечений дросселей 8 поступает в рабочей позиции распределителя 6 на гидромотор 1.

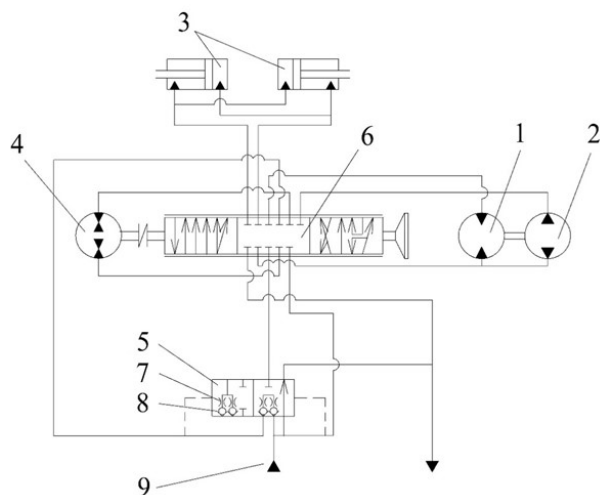


Рис. 1. Схема гидравлическая системы рулевого управления с усилителями потока

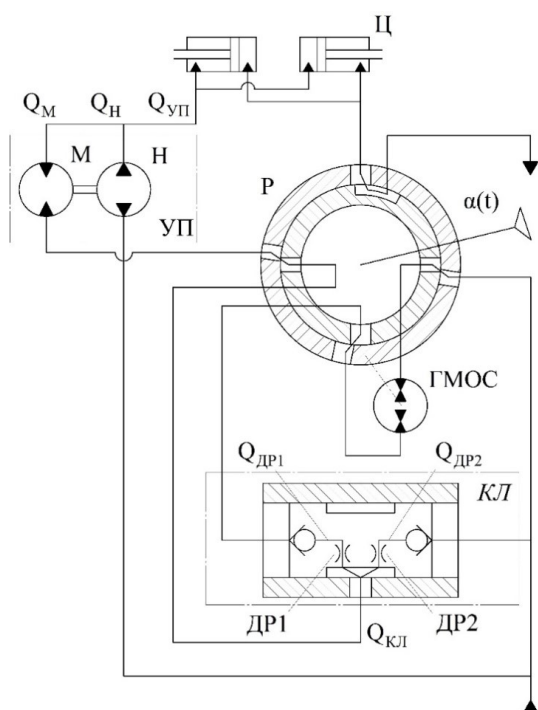


Рис. 2. Расчетная схема гидросистемы рулевого управления с усилителями потока

Таким образом, варьируя рабочими объемами насоса-дозатора 4, гидромотора 1, гидронасоса 2, а также пропорциями потока рабочей жидкости в дросселях 8 двухпозиционного гидроуправляемого пятилинейного распределителя можно получить широкий диапазон подачи на выходе из исполнительного механизма гидросистемы рулевого управления.

Математическое моделирование и результаты.

В настоящее время при изучении сложных, взаимосвязанных друг с другом проблем широко используется системный анализ. В основе системного анализа лежит понятие системы, под которой подразумевается множество компонентов, обладающих определенными свойствами с фиксированными между ними взаимосвязями [7].

При математическом моделировании применен принцип системного анализа, при котором гидро-

система рулевого управления рассматривается как сложная система, состоящая из отдельных взаимосвязанных друг с другом подсистем. Каждая выделенная подсистема имеет свои определенные свойства и законы функционирования, которые описываются математическими моделями. Математические модели подсистем в совокупности образуют сложную математическую модель гидросистемы рулевого управления. Расчетная схема предложенной системы представлена на рис. 2.

Теоретические исследования проводились на ПК с использованием пакета прикладных программ Matlab, позволяющих получать информацию на выходе как в числовой, так и в графической интерпретации, а также имеющих целый набор команд, процедур, функций и графических приложений для анализа полученных данных [8].

Базовые элементы гидропривода описаны системами общеизвестных дифференциальных уравнений первого и второго порядков с переменными нелинейными коэффициентами, начальными условиями, уравнениями, определяющими ограничения решений в виде существенных нелинейностей, алгебраическими уравнениями связи, наложенными на систему [9, 1].

Математическое моделирование исполнительных рулевых механизмов без усилителя потока подробно описано в работах [9, 10, 1]. В настоящей статье уделено внимание моделированию и исследованию усилителей потока.

Усилитель потока дроссельного типа выполнен в виде одного двухпозиционного пятилинейного распределителя с гидравлическим управлением. При повороте рулевого колеса и перемещении золотника гидрораспределителя поток рабочей жидкости поступает на насос-дозатор и в левую полость управления усилителя потока. Золотник усилителя перемещается вправо, прикрывая при этом канал, соединяющий вторую и третью линии усилителя. Одновременно увеличивается давление в правой полости управления усилителя. Под действием давлений в правой и левой полостях управления на усилителе потока происходит выравнивание давлений, значит, выравниваются давления в четвертой и пятой линиях и перепады давления между первой и четвертой, первой и пятой. Благодаря одинаковым перепадам давления в первую линию усилителя поступают два потока из четвертой и пятой линий через обратные клапаны, пропорциональные площадям поперечных сечений дросселей [4, 6] (рис. 1 и 2).

Усилитель потока дроссельного типа описывается следующими уравнениями:

— уравнением движения клапана усилителя и уравнениями расходов через дроссели клапана [10, 6]:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{1}{m} \left(p_{K\lambda 1} \cdot S_{K\lambda 1} - p_{K\lambda 2} \cdot S_{K\lambda 2} - R_{TP} \cdot \text{sign} \frac{dy}{dt} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dQ_{\Delta P i 2}}{dt} = B \left[\mu \cdot f_{\Delta P i} \cdot \text{sign}(p_{\Delta P i 1} - p_{\Delta P i 2}) \times \sqrt{2\rho_{ж}^{-1} |p_{\Delta P i 1} - p_{\Delta P i 2}|} - Q_{\Delta P i 2} \right], \quad (2)$$

где $y(t)$ — линейное перемещение клапана; $p_{K\lambda 1}$ и $p_{K\lambda 2}$ — давления в управляющей (левой) и сливной (правой) полостях соответственно; $S_{K\lambda 1}$ и $S_{K\lambda 2}$ — площади клапана со стороны управления и слива соответственно; m — масса клапана; h — коэффициент

вязкого трения, приведенный к клапану; $R_{\text{тр}}$ — сила сухого трения; $Q_{\text{ДР}1}$ и $Q_{\text{ДР}2}$ — расходы на входе и выходе каждого дросселя соответственно; $p_{\text{ДР}1}$ и $p_{\text{ДР}2}$ — давления на входе и выходе дросселя соответственно, Па; B — коэффициент, учитывающий инерционность столба жидкости; $f_{\text{ДР}1}(y)$ — площадь проходного сечения дросселя; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность рабочей жидкости.

Исследования проводились при использовании П-образного управляющего воздействия, формируемого двумя единичными ступенчатыми сигналами. Первый соответствует пуску привода, второй — его отключению, т.е. прекращению воздействия на рулевое колесо. Такой сигнал позволяет в большей степени оценить динамику привода, при эксплуатации гидросистемы рулевого управления. За входной сигнал принималась частота вращения рулевого колеса численным значением 1 с^{-1} .

Для проведения исследований из конструктивных соображений были выбраны следующие суммарные площади дросселей полости управления $f_{\text{ДР}1} = 42,41 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ и сливной полости $f_{\text{ДР}2} = 127,24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, что соответствует расчетному коэффициенту усиления клапана $k_{\text{КЛ}}^y = 4$. Рабочий объем гидромотора обратной связи принят равным $125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Графики расходов через дроссель полости управления $Q_{\text{ДР}1}$, дроссель сливной полости $Q_{\text{ДР}2}$ и суммарного расхода на выходе из клапана $Q_{\text{КЛ}}$ представлены на рис. 3.

Полученная на данном этапе зависимость расхода на выходе из клапана от времени демонстрирует не только динамику клапана, но и является входным сигналом для объемного усилителя потока.

В качестве усилителя потока объемного типа используются гидромотор и гидронасос, кинематически связанные между собой и установленные в напорной магистрали. Выходы гидромотора и гидронасоса гидравлически связаны между собой и соединяются с рабочими гидролиниями исполнительных гидроцилиндров. При повороте рулевого колеса суммарный поток рабочей жидкости с клапана усилителя потока через гидрораспределитель поступает на гидромотор. Т.к. гидромотор кинематически связан с гидронасосом, крутящий момент от вала гидромотора передается на вал гидронасоса, суммируется с расходом рабочей жидкости, проходящей через гидромотор, и по рабочей гидролинии поступает в полости исполнительных гидроцилиндров [5] (рис. 1 и 2).

Гидромотор усилителя потока описывается следующими уравнениями [10, 1]:

$$Q_{\text{М}2} = Q_{\text{М}1} - Q_{\text{УТ}} - Q_{\text{СЖ}}; \quad (3)$$

$$Q_{\text{М}1} = \frac{d\alpha_{\text{М}}}{dt} \cdot \frac{q_{\text{М}}}{\eta}; \quad (4)$$

$$Q_{\text{УТ}} = k_{\text{УТ}} (p_{\text{М}1} - p_{\text{М}2}); \quad (5)$$

$$Q_{\text{СЖ}} = k_{\text{СЖ}} \cdot \frac{d}{dt} (p_{\text{М}1} - p_{\text{М}2}); \quad (6)$$

$$\frac{d^2\alpha_{\text{М}}}{dt^2} = \frac{1}{I_{\text{М}}} \left[q_{\text{М}}(p_{\text{М}1} - p_{\text{М}2}) - h_{\text{М}} \frac{d\alpha_{\text{М}}}{dt} - [b_{\text{р}}|p_{\text{М}1} - p_{\text{М}2}| + b] \text{sign} \frac{d\alpha_{\text{М}}}{dt} \right]; \quad (7)$$

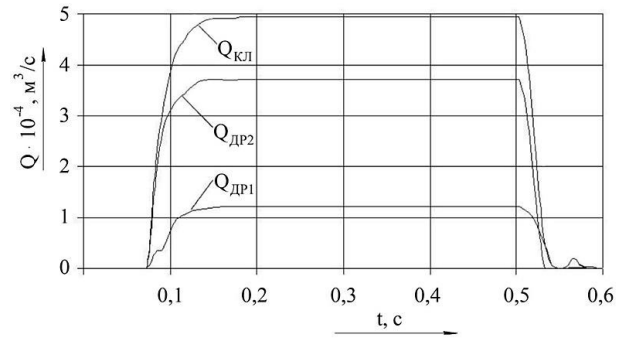


Рис. 3. Графики расходов в клапане усилителя потока дроссельного типа

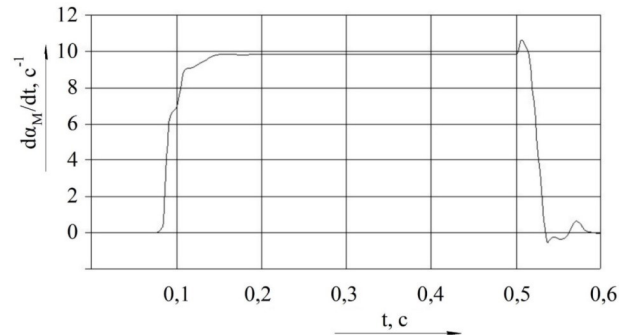


Рис. 4. График угловой скорости вала гидромотора объемного усилителя потока

где $\alpha_{\text{М}}(t)$ — угол поворота вала гидромотора; $Q_{\text{М}1}$ — расход рабочей жидкости на входе, идущий на вращение ротора гидромотора; $Q_{\text{М}2}$ — расход на выходе; $Q_{\text{УТ}}$ — расход, идущий на утечки в гидромоторе; $Q_{\text{СЖ}}$ — деформационный расход; $q_{\text{М}}$ — рабочий объем гидромотора обратной связи; η — КПД гидромотора; $I_{\text{М}}$ — момент инерции вращающихся частей гидромотора; $h_{\text{М}}$ — коэффициент вязкого трения гидромотора; $k_{\text{УТ}}$ — коэффициент утечек; $k_{\text{СЖ}}$ — коэффициент сжатия жидкости; $b_{\text{р}}$ — коэффициент гидромеханических потерь; b — постоянная гидромеханических потерь.

Выходным параметром гидромотора и входным параметром насоса объемного усилителя потока является угловая скорость вала гидромотора $d\alpha_{\text{М}}/dt = d\alpha_{\text{Н}}/dt$. Для исследований рабочий объем гидромотора усилителя $q_{\text{М}}$ был выбран равным $50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ из конструктивных соображений. Таким образом, на рис. 4 представлена временная зависимость частоты вращения вала гидромотора $\alpha_{\text{М}}/dt$ при входном воздействии $Q_{\text{КЛ}}$.

Насос объемного усилителя потока описывается следующими уравнениями [10, 1, 6]:

$$Q_{\text{Н}} = \frac{d\alpha_{\text{Н}}}{dt} \cdot q_{\text{Н}} \cdot e_{\text{Н}} \cdot \eta_{\text{НО}}; \quad (8)$$

$$M_{\text{Н}} = \frac{(p_{\text{Н}2} - p_{\text{Н}1})q_{\text{Н}}}{\eta_{\text{НГМ}}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{Н}}(t)$ — угол поворота вала насоса, рад; $Q_{\text{Н}}$ — расход на выходе из насоса; $p_{\text{Н}1}$, $p_{\text{Н}2}$ — давление на входе и на выходе из насоса соответственно; $q_{\text{Н}}$ — рабочий объем насоса; $e_{\text{Н}}$ — параметр регулирования; $\eta_{\text{НО}}$ — объемный КПД насоса; $\eta_{\text{НГМ}}$ — гидромеханический КПД насоса, $M_{\text{Н}}$ — крутящий момент на валу насоса.

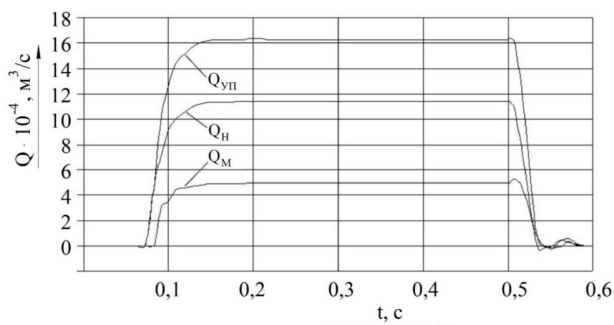


Рис. 5. Графики расходов в усилителе потока объемного типа

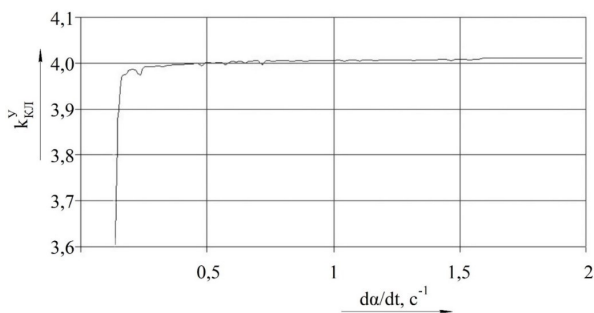


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления усилителя потока дроссельного типа от частоты вращения рулевого колеса

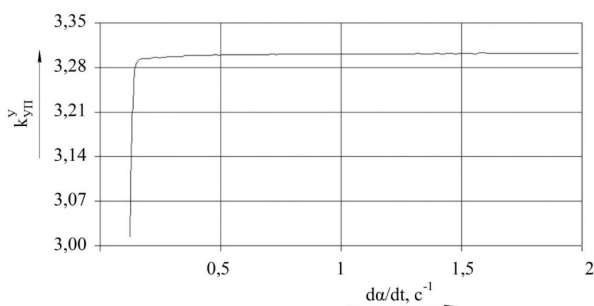


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления усилителя потока объемного типа от частоты вращения рулевого колеса

Для проведения исследований был выбран рабочий объем насоса усилителя потока $q_n = 125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, что соответствует расчетному коэффициенту усиления объемного усилителя потока $k_{уп}^y = 3,5$.

Графики расходов через гидромотор Q_m , насос Q_n и суммарного расхода на выходе из объемного усилителя $Q_{уп}$ представлены на рис. 5.

Первичный анализ графиков переходных процессов показал, что все зависимости имеют аperiodический характер с незначительной колебательностью и задержкой, которая в большей мере является следствием наличия зоны нечувствительности гидрораспределителя. Применение усилителей потока не оказывает значительного влияния на качество переходных процессов и не выводит систему из состояния устойчивости.

Оценка коэффициента усиления усилителей потока. Коэффициент усиления представляет собой отношение действительного расхода на выходе из усилителя потока дроссельного типа $Q_{кл}$ к расходу на управляющем контуре системы для клапана

усилителя потока и расхода на выходе из усилителя потока объемного типа $Q_{уп}$ к расходу на выходе из усилителя потока дроссельного типа $Q_{кл}$ для объемного усилителя потока. В двухконтурных схемах это отношение характеризует стабильность работы усилителя потока и обозначено $k_{кл}^y$ для клапана усилителя потока и $k_{уп}^y$ для объемного усилителя потока. Для клапана усилителя потока расчетное значение коэффициента усиления равно 4 и объемного усилителя — 3,5.

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента усиления клапана усилителя потока от частоты вращения рулевого колеса.

Минимальное значение коэффициента усиления при частоте вращения рулевого колеса $da/dt = 0,127 \text{ с}^{-1}$ и равно $k_{кл}^y = 3,6$, что ниже расчетного значения на 10 %. К своему расчетному значению коэффициент усиления приближается с увеличением частоты вращения рулевого колеса до $da/dt = 0,318 \text{ с}^{-1}$. На установившееся значение коэффициент усиления выходит при частоте вращения $da/dt = 0,497 \text{ с}^{-1}$. При дальнейшем увеличении частоты вращения отклонение от расчетного значения колеблется в интервале от 1 до 3,5 %.

Необходимо отметить, что характеристика отличается небольшой зоной нечувствительности, что говорит о срабатывании клапана на малых частотах вращения рулевого колеса. При частоте вращения до $da/dt = 1,5 \text{ с}^{-1}$ наблюдаются небольшие колебания, обусловленные нестабильностью расхода через дроссели клапана, при дальнейшем наращивании частоты вращения характеристика стабилизируется благодаря полному перекрытию сливного окна золотника.

Зависимость коэффициента усиления объемного усилителя потока от частоты вращения рулевого колеса представлена на рис. 7.

Как видно из графика, характеристика также отличается небольшой зоной нечувствительности, выходит на установившееся значение при $da/dt = 0,421 \text{ с}^{-1}$ и в то же время ведет себя стабильней при различных скоростях вращения рулевого колеса, что объясняется использованием объемного способа усиления потока. Однако значение коэффициента усиления $k_{уп}^y = 3,33$, что ниже расчетного значения на 9,5 %, объясняется это гидромеханическими и объемными потерями в паре мотор-насос из-за сил трения, инерционностью роторов мотора и насоса, а также перетечками и сжимаемостью рабочей жидкости.

Выводы

1. Для обеспечения поворота тяжелых строительных и дорожных машин предложено использование усилителей потока дроссельного и объемного типов с расчетными коэффициентами 4 и 3,5 соответственно.

2. Описаны конструкции и принципы работы усилителей потока дроссельного и объемного типов гидравлического рулевого управления строительных и дорожных машин.

3. Представлены основные уравнения гидроэлементов усилителей потока, на основании которых составлена и решена математическая модель гидросистемы рулевого управления.

4. По результатам решения математической модели получены графики переходных процессов расхода рабочей жидкости на выходе из усилителей потока, а также статические зависимости коэффициентов усиления от частоты вращения рулевого колеса.

5. Первичный анализ графиков переходных процессов позволил сделать заключение о качестве работы гидросистемы с усилителями потока, которое характеризуется небольшим временем запаздывания и нарастания характеристик, отсутствием колебательности и перегулирования, сохранением устойчивости системы.

6. Статические характеристики дали возможность оценить количественные показатели и стабильность коэффициентов усиления. Анализ графиков показал, что коэффициент усиления усилителя потока дроссельного типа достигает расчетного значения, однако присутствуют незначительные отклонения при различных частотах вращения рулевого колеса, что объясняется нестабильностью дроссельного регулирования. Коэффициент усиления усилителя потока объемного типа обеспечивает более линейную характеристику, что обусловлено применением объемной гидропередачи, однако численно коэффициент усиления ниже расчетного значения на 9,5%, что объясняется гидромеханическими и объемными потерями в гидромашине усилителя.

7. Методика данных исследований может быть применена для различных строительных и дорожных машин с усилителями потока того или иного типа, а результаты исследований положены в основу синтеза гидросистем рулевого управления с усилителями потока.

Библиографический список

1. Щербаков В. С., Жданов А. В. Оптимизация конструктивных параметров гидравлических рулевых механизмов строительных и дорожных машин: моногр. Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. 175 с. ISBN 978-5-93204-548-0.
2. Инструкция по эксплуатации Кировец К-701 и К-700А. Санкт-Петербург: ООО Альфа Трейд, 2013. 154 с.
3. ГОСТ 28174–89. Объемный гидропривод рулевого управления. Общие технические требования. Введ. 1991–01–01. Москва: Стандартинформ, 2007. 2 с.
4. Пат. 2026225 С1 Российская Федерация, МПК В 62 D 5/87. Гидрообъемное рулевое управление / Киреев В. Е., Мукушев Ш. К. № 5034556/11; заявл. 27.03.92; опубл. 09.01.95.

5. Пат. 188254 Российская Федерация, МПК В 62 D 5/06. Гидрообъемное рулевое управление транспортного средства / Мукушев Ш. К. № 2018146222; заявл. 24.12.18; опубл. 04.04.19.

6. Щербаков В. С., Мукушев Ш. К., Жданов А. В. Совершенствование объемных гидроприводов рулевого управления дорожно-строительных машин: моногр. Омск: Изд-во СибАДИ, 2011. 161 с. ISBN 978-5-93204-613-5.

7. Буторин В. К. Введение в системный анализ. Курс лекций. 2-е изд., перераб. и доп. Новокузнецк: Изд-во НФИ КемГУ, 2005. 72 с.

8. Потемкин В. Г. Вычисления в среде MATLAB. Москва: Диалог-МИФИ, 2004. 328 с.

9. Жданов, А. В., Меркушева Ю. Е. Теоретические исследования рабочих процессов, протекающих в распределителях гидравлических рулевых механизмов // Омский научный вестник. 2013. № 1 (117). С. 88–91.

10. Малиновский Е. Ю., Зарецкий Л. Б., Беренгард Ю. Г. [и др.]. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ. Москва: Машиностроение, 1980. 216 с.

ЖДАНОВ Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Общепрофессиональные дисциплины» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск.

SPIN-код: 3015-4098

AuthorID (РИНЦ): 647538

Адрес для переписки: avzh_1984@mail.ru

Для цитирования

Жданов А. В. Теоретические исследования гидросистемы рулевого управления строительных и дорожных машин с усилителями потока // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 14–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-14-18.

Статья поступила в редакцию 21.07.2022 г.

© А. В. Жданов

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОБРАБОТКИ И МЕТОДА ОХЛАЖДЕНИЯ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ НА ПОТРЕБЛЯЕМУЮ МАКСИМАЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ, ВЫСОТУ ОБРАЗОВАВШИХСЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ЗАУСЕНЦЕВ И ПОЛУЧАЕМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ДИАМЕТРА

Сверление является чрезвычайно важным процессом, широко используемым при производстве топливно-регулирующей аппаратуры. Перспективным для современной промышленности является устойчивый процесс сверления алюминиевого сплава, при котором снижается потребление энергии и охлаждающей жидкости без ущерба для качества изготовления деталей. В этой статье исследуются влияние подачи и скорости вращения шпинделя на потребляемую максимальную мощность, высоту образовавшихся при сверлении заусенцев и получаемое отклонение диаметра просверленного отверстия.

Ключевые слова: сверление, сплавы, алюминий, точность, отклонение, отверстие, обработка.

1. Введение. Сверление является распространенным процессом механической обработки для изготовления отверстий. Алюминиевые сплавы являются одними из самых универсальных конструкционных материалов с точки зрения их легкости, коррозионной стойкости, электро- и теплопроводности, пригодности для обработки и т. д. Алюминий имеет низкую плотность $2,7 \text{ г/см}^3$ по сравнению с $7,87 \text{ г/см}^3$ для сталей. Обычно они легче (примерно в один-три раза) стали; однако их свойства с точки зрения удельной прочности и ударной вязкости почти аналогичны некоторым сталям. Кроме того, алюминиевые сплавы относительно дешевы. В промышленности для изготовления деталей широко применяются операции механической обработки, особенно сверления. Сверление деталей обычно выполняется в конце производственных процессов, чтобы сделать отверстия для сборки конечного узла с использованием подходящих крепежных деталей. Некоторые дефекты, такие как трещины, заусен-

цы и деформация поверхности, могут появиться во время операций сверления, что может привести к ухудшению технических характеристик деталей и выходу его из строя.

Распространенной проблемой при сверлении отверстий в металлических материалах является нерациональное использование охлаждающей жидкости более чем в 68 % случаев [1]. Несоблюдение параметров резания, таких как режим обработки и подача смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) в процессе сверления, может привести к поломке инструмента, высокому потреблению энергии и низкому качеству полученных деталей [2].

Если после операции сверления отверстие не имеет требуемого качества, то потребуются дополнительные процессы обработки, такие как развертывание и снятие заусенцев, для достижения требуемого качества.

С точки зрения обрабатываемости, алюминиевый сплав АЛ4-Т6 лучше поддается механической

обработке, чем другие металлы, с высокой применимостью в топливно-регулирующей аппаратуре, такие как сталь и титан, благодаря стабильному формированию стружки и легко поддается обработке [3]. По сравнению с другими высокопроизводительными сплавами (например, стали и титана), силы резания, температура резания и энергия, затрачиваемая на обработку алюминиевых сплавов, относительно низкая, что делает их хорошей альтернативой для достижения высокой производительности [4]. Мягкие и пластичные свойства алюминиевого сплава могут привести к термическому размягчению материала во время обработки, что вызывает образование наростов на кромке режущего инструмента и прилипание материала к обрабатываемой поверхности. Следовательно, это приводит к ухудшению чистоты обработанной поверхности и качества отверстия.

В этом исследовании рассматривается наиболее устойчивый метод охлаждения зоны резания вместе с наилучшей комбинацией параметров резания для снижения энергопотребления без влияния на общее качество получаемого отверстия. Вращение сверла создает трение и тепло, которое отводят из рабочей зоны с помощью СОЖ [4]. В процессе сверления из зоны резания отводится около 20–35 % тепла, что значительно ниже, чем при фрезеровании и токарной обработке [5].

2. Постановка задачи. В исследовании изучалось влияние трех конкретных условий резания, а именно обработка с СОЖ, с охлаждением сжатым воздухом и обработка без охлаждения. Качество просверленных отверстий оценивалось по высоте полученных заусенцев и максимальному отклонению геометрии диаметра. Основное новшество заключается в демонстрации влияния одновременных взаимодействий входных переменных, а именно подача, скорость вращения шпинделя и потребляемая мощность при резании, на результаты сверления, чтобы иметь хорошее представление о комбинированном влиянии различных параметров процесса обработки.

Значения параметров были выбраны на основе имеющейся в литературе информации [6], мощности станка и рекомендаций поставщиков режущего инструмента. Сверление производилось на токарно-фрезерном центре INTEGREX с ЧПУ фирмы Mazak (Япония). Максимальная мощность измерялась с помощью стойки ЧПУ Mazatrol. Измерения максимального отклонения диаметра производились с помощью кругломера Talylond. Высота заусенцев измерялась с помощью микрометра с линейной шкалой.

Последовательность измерений была следующей: (а) записывались значения мощности в процессе сверления, (б) измерялась погрешность диаметра, (в) измерялась высота заусенца.

3. Проведение эксперимента. В эксперименте использовались спиральные сверла из быстрорежущей стали P6M5 без покрытия. Сверление отверстий производилось в блоке из алюминиевого сплава АЛ4-Т6 размером 90×70×15 мм. Сверла имели диаметр 10 мм и угол при вершине 118°, были выполнены по ГОСТу 10902-77 [6].

Режущие инструменты, с точки зрения геометрии инструмента, являются важными факторами, которые необходимо определить перед проведением операций сверления, поскольку они влияют на качество поверхности получаемого отверстия. Спиральное сверло, выполненное по ГОСТу 10902-77,

является распространенным типом сверла, которое используется при сверлении алюминия, поскольку оно имеет оптимальный угол спиральной канавки для облегчения эвакуации стружки. Угол винтовой линии — это угол, который образуется между передней кромкой сверла и осью сверла [7]. Для сверления алюминия АЛ4-Т6 обычно используется угол наклона спирали, равный 30°. Угол при вершине, который является формой угла между режущими кромками, также важен для обеспечения эффективности сверления.

Скорость резания измеряется с точки зрения скорости, с которой внешняя или периферийная часть инструмента движется к обрабатываемой детали. Известно, что увеличение скорости резания приводит к уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности из-за улучшения сдвига материала [8]. На основании [9], в которой были проведены эксперименты по сверлению со скоростями резания 180, 200, 220 и 240 м/мин, установлено, что шероховатость поверхности алюминиевых сплавов уменьшается на 5,49 % при увеличении скорости резания со 180 до 240 м/мин. Однако увеличение скорости резания может увеличить вибрацию инструмента, что влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности. Эта точка зрения подтверждается исследованиями [10], в которых сообщается, что увеличение скорости резания может увеличить вибрацию инструмента, вызванную вращением шпинделя, что приводит к ухудшению качества обработанной поверхности. Во избежание вибрации инструмента из-за высокой скорости резания во время сверления перед началом операции сверления необходимо обеспечить правильную фиксацию инструмента с минимальным биением и фиксацию рабочего материала. Кроме того, высокая скорость резания может вызвать повышение температуры резания между инструментом и заготовкой из-за сильного нагрева, выделяемого во время операций сверления, что может привести к более высокой скорости износа инструмента. Когда скорость резания увеличивается, температура резания также увеличивается, что может привести к прилипанию материала заготовки к режущим кромкам. Это подтверждается исследованием [11], которое показало, что увеличение скорости резания с 60 до 100 м/мин приводит к увеличению температуры резания со 190 до 240°C при сверлении алюминиевого сплава. Другое предыдущее исследование [12] показывает, что износ по задней поверхности увеличился с 0,09 до 0,20 мм за счет увеличения скорости резания со 180 до 240 м/мин при подаче 0,1 мм/об, что также привело к уменьшению шероховатости поверхности с 4 до 3 мкм. Хотя более высокая скорость резания вызывает повышенный износ инструмента, использование слишком низкой скорости резания не рекомендуется, так как это может привести к образованию наростов на режущей кромке, что приводит к ухудшению шероховатости обрабатываемой поверхности, а также становится причиной низкой производительности. По данным [12], при сверлении с низкой скоростью резания 40 м/мин наблюдалось образование нароста, что приводит к шероховатости поверхности Ra 1,16 мкм. Таким образом, использование умеренных скоростей резания в диапазоне от 100 до 220 м/мин обычно рекомендуется при сверлении алюминиевых сплавов для поддержания хорошей производительности.

Скорость подачи является основным фактором, влияющим на образование стружки, силы реза-

Параметры эксперимента

№ эксп.	Подача, мм/об	Скорость, об/мин	№ эксп.	Подача, мм/об	Скорость, об/мин
1	0,05	500	8	0,05	500
2	0,05	1500	9	0,1	500
3	0,05	3000	10	0,15	500
4	0,05	4500	11	0,2	4500
5	0,2	500	12	0,05	4500
6	0,2	3000	13	0,1	4500
7	0,2	4500	14	0,15	4500

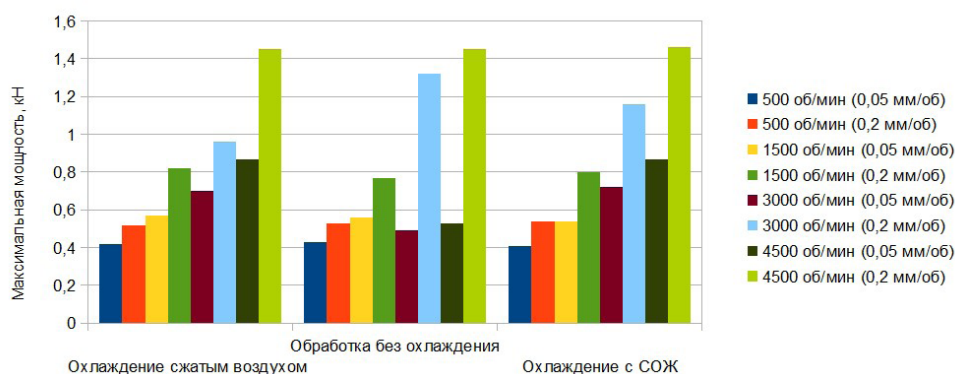


Рис. 1. Значения максимальной мощности при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

ния и качество отверстия. Скорость подачи — это расстояние, на которое сверло входит в заготовку за каждый полный оборот режущего инструмента. Диапазон скоростей подачи, которые обычно используются при сверлении алюминия АЛ4-Т6, находится в пределах от 0,01 до 0,2 мм/об. Исследование [13] показало, что увеличение скорости подачи с 0,05 до 0,25 мм/об при постоянной скорости резания 50 м/мин приводит к увеличению осевого усилия с 825 до 1020 Н и образованию непрерывной стружки, которая может запутываться в канавки сверла, что приводит к ухудшению качества обработанной поверхности. В другом исследовании [14] изучалось влияние подачи на просверленных отверстиях и обнаружилось, что при высоких скоростях подачи происходит ухудшение формы отверстий. Это происходит из-за высоких осевых усилий, вызванных образованием толстой стружки. Как правило, при сверлении алюминия рекомендуется использовать низкую скорость подачи, так как оно вызывает низкое осевое усилие, обеспечивает хорошее качество обработанной поверхности и продлевает срок службы инструмента.

Одно сверло использовалось для сверления только одного отверстия, чтобы свести к минимуму влияние износа инструмента на получаемые значения. План эксперимента указан в табл. 1.

Максимальная мощность при сверлении металла в основном определяется скоростью резания, скоростью подачи, методом подачи СОЖ и геометрическими параметрами инструмента передним, такими как угол инструмента. Результат исследования

представлен на рис. 1 и рис. 2 для разных подач и при разных скоростях резания соответственно при разных способах охлаждения зоны резания.

Общая тенденция заключается в том, что, независимо от используемых охлаждающих жидкостей, более высокие результаты скорости и подачи приводят к более высокой максимальной мощности. Поскольку при увеличении скорости резания происходит значительное увеличение максимальной мощности (рис. 2), поэтому можно констатировать, что воздействие скорости резания выше, чем воздействие из-за изменения подачи. Среднее отклонение максимальной мощности за счет прироста скорости при постоянной подаче составило около 70,4 % из-за большого прироста скорости от 500 об/мин до 4500 об/мин. Но среднее отклонение максимальной мощности из-за приращения подачи при постоянной скорости составляло около 34 % и могло быть связано с увеличением подачи от 0,05 до 0,2 мм/об. Следовательно, увеличение только одного параметра (подачи или скорости) может привести к увеличению максимальной мощности. Однако следует отметить, что общая мощность при сверлении отверстия рассчитывается на основе продолжительности всего процесса. Продолжительность этого процесса минимизируется с увеличением скорости подачи. Приращение скорости сокращает продолжительность процесса и не приведет к значительному приросту мощности, поэтому наилучшей комбинацией для снижения энергопотребления может быть низкая скорость резания и высокая подача. Прочность заготовки также зависит от параметров обработки за счет деформационного

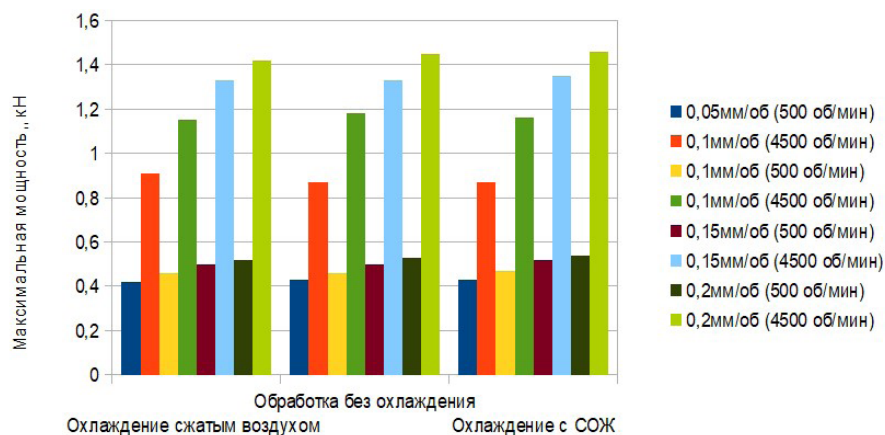


Рис. 2. Значения максимальной мощности при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

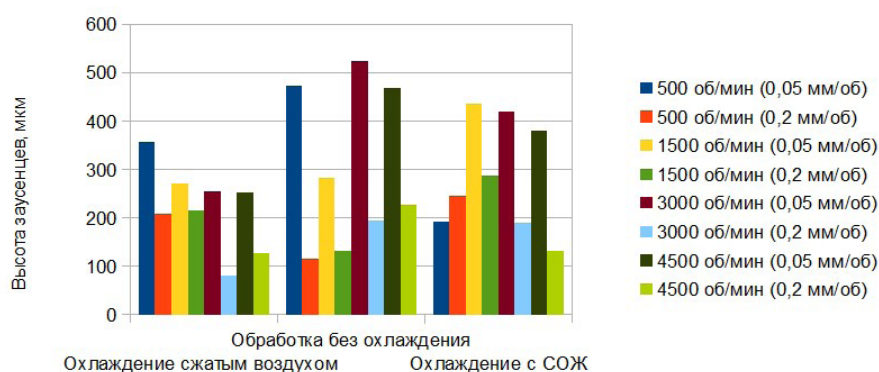


Рис. 3. Значения максимальной высоты заусенцев при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

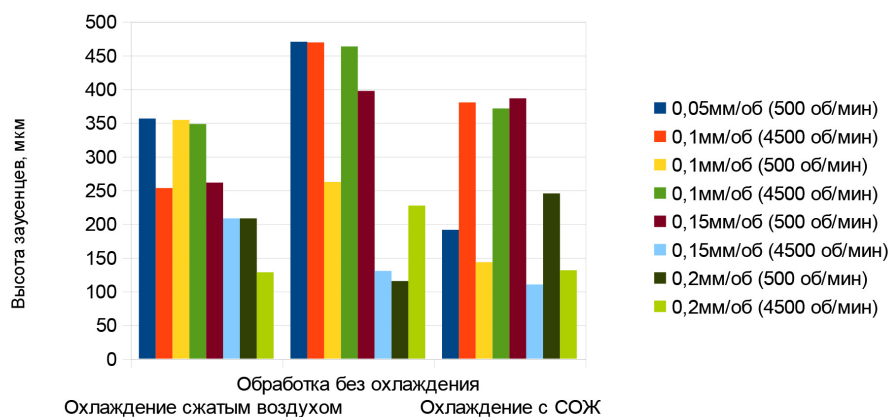


Рис. 4. Значения максимальной высоты заусенцев при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

упрочнения и термического разупрочнения. Более высокая подача и скорость приводят к более высокой скорости деформации, которая локально упрочняет материал заготовки. Глубина резания, подача и скорость вызывают значительный сдвиг материала, а также трение в зоне резания на границе между режущим инструментом-материалом заготовки. Это значительно повышает локальную температуру обработки, что локально размягчает материал заготовки [15].

Свойства материала, термическое размягчение, деформационное упрочнение, трение и толщина последнего слоя материала, подлежащего обработке, играют важную роль в образовании заусенцев [16].

Заусенец — это выступ материала заготовки, как правило, на краях отверстия (вход и выход из отверстия). При обработке алюминиевых сплавов образуются твердые и острые заусенцы, что может вызвать трудности при сборке и привести к трав-

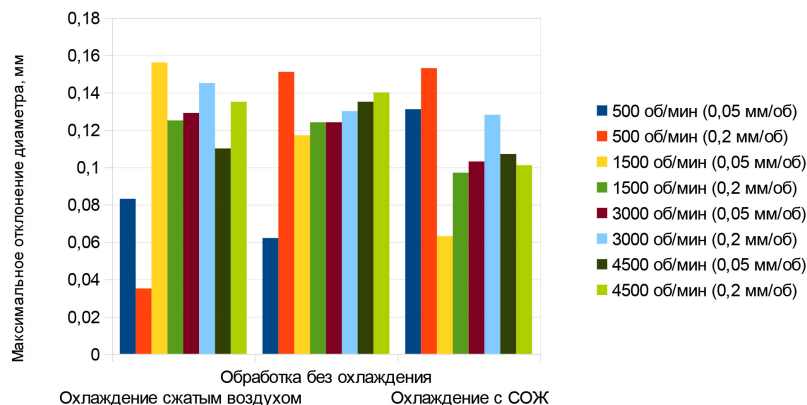


Рис. 5. Значения максимального отклонения диаметра при обработке АЛ4-Т6 с разными значениями скорости вращения шпинделя и двумя различными подачами при сверлении

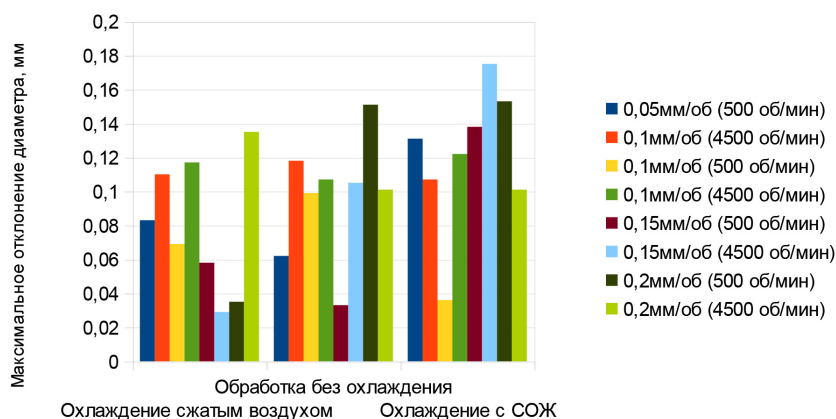


Рис. 6. Значения максимального отклонения диаметра при обработке АЛ4-Т6 с разной подачей при сверлении и двумя скоростями вращения шпинделя

мам сборщика. Поэтому получение заусенцов нежелательно для обеспечения хорошей сборки деталей. Процесс обработки может привести к первичным и вторичным заусенцам. Краевой заусенец возникает во время операции сверления после удаления материала режущими кромками. Вторичный заусенец — это оставшийся материал на краю просверленного отверстия после поломки основного заусенца в процессе удаления заусенцев.

По мере того, как сверло продвигается вперед с большей деформацией материала и наконец достигает своего предела (напряжение разрушения), разрушение начинается в центре отверстия. Благодаря тонкому слою материала на конце образуется заусенец. При обработке пластичного материала его деформация и удлинение приводят к нежелательному выступу [17]. Высота заусенцев уменьшается при увеличении подачи и снижении скорости резания.

Влияние параметров сверления при различных способах охлаждения рабочей зоны на высоту заусенца показано на рис. 3, рис. 4. При обработке без охлаждения высота заусенцев имеет тенденцию к уменьшению с увеличением скорости подачи и оптимизируется при самой высокой скорости подачи (0,2 мм/об) и самой низкой скорости резания (500 об/мин). При обработке с охлаждением сжатым воздухом минимальная высота заусенцев достигается при самой средней скорости подачи (0,15 мм/об) и самой высокой скорости резания (4500 об/мин). Минимальная высота заусенцев при

обработке с охлаждением СОЖ достигается при самой высокой скорости подачи (0,2 мм/об) и самой низкой скорости резания (500 об/мин).

Погрешность диаметра просверленных отверстий при различных параметрах сверления показана на рис. 5 и рис. 6. Оптимальные скорость резания и подача при обработке с охлаждением сжатым воздухом равны 4500 об/мин и 0,1 мм/об соответственно, для обработки без охлаждения 0,05 мм/об и 500 об/мин, для обработки с охлаждением с СОЖ 0,1 мм/об и 500 об/мин.

При скорости резания, отличной от 3000 об/мин, ошибка составляет более 0,1 мм для всех скоростей подачи и при всех способах охлаждения. Следовательно, верно, что скорость резания оказывает значительное влияние на изменение погрешности диаметра при постоянной скорости подачи, и в обоих случаях наблюдалась нелинейная картина.

4. Результаты эксперимента. Основываясь на полученных результатах, можно утверждать, что минимальная потребляемая мощность, высота заусенцев и погрешность диаметра полученных отверстий при сверлении без охлаждения соответствует режимам подачи 0,2 мм/об и скорости вращения шпинделя 500 об/мин. При обработке с охлаждением сжатым воздухом минимальные измеряемые значения полученных отверстий соответствуют подаче 0,2 мм/об и скорости вращения шпинделя 500 об/мин. При обработке с подачей СОЖ в зону резания минимальные значения мощности, высоты заусенцев и погрешности диаметра полученных от-

верстий соответствуют подаче 0,1 мм/об и скорости вращения шпинделя 500 об/мин.

Выводы. По результатам работы определены значения подачи и скорости вращения шпинделя при сверлении отверстий в блоке алюминиевого сплава АЛ4-Т6, при которых достигаются минимальные значения потребляемой мощности, высоты заусенцев и погрешность диаметра полученных отверстий.

Библиографический список

1. Vasil'ev E. V., Makashin D. S., Chernykh I. K. Influence of forms and geometric parameters of sharpening of the chisel edge on the cut chip thickness throughout the cutting edges of a twist drill // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1210 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012157.

2. Васильев Е. В., Макашин Д. С., Черных И. К. Влияние форм и геометрических параметров подточки поперечной режущей кромки на толщину среза по длине режущих кромок спирального сверла // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6, № 1. С. 154–162. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-154-162.

3. Кирсанов С. В., Гречишников В. А., Схиртладзе А. Г. [и др.]. Повышение эффективности обработки точных отверстий в машиностроении. Москва: Глобус, 2001. 181 с.

4. Кисель А. Г., Макашин Д. С., Аверков К. В., Ражковский А. А. Зависимость эффективности СОЖ от их физических показателей // *Вестник машиностроения*. 2018. № 4. С. 41–44.

5. Макашин Д. С. Влияние геометрических параметров спирального сверла на отклонение от цилиндричности при сверлении титанового сплава // *Омский научный вестник*. 2011. № 2 (100). С. 40–44.

6. Балла О. М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология. Санкт-Петербург: Лань, 2017. 368 с.

7. Лашков А. С., Макашин Д. С., Минцева Т. А., Никитина А. В., Васильев Е. В. Повышение точности изготовления отверстий в деталях из нержавеющей стали // *Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам XXXIV Междунар. науч.-практ. конф.* 2017. С. 500–508.

8. Расщупкин А. В., Макашин Д. С. Повышение точности формообразования поверхности твердосплавным осевым инструментом // *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность*. 2011. № 1. С. 115–116.

9. Назаров П. В., Васильев Е. В., Попов А. Ю. Инновационная технология обработки деталей, применяемых в авиационной промышленности // *СТИН*. 2015. № 3. С. 38–40.

10. Макашин Д. С. Влияние геометрических параметров спирального сверла на отклонение от цилиндричности при сверлении титанового сплава // *Омский научный вестник*. 2011. № 2 (100). С. 40–42

11. Santos M. C., Machado A. R., Sales W. F. [et al.]. Machining of aluminum alloys: A review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86 (9). P. 3067–3080. DOI: 10.1007/s00170-016-8431-9.

12. Гимадеев М. Р. Получение заданных параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании цилиндрических отверстий // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2016. № 1 (25). С. 66–72.

13. Mydin N. M., Dahnell A. N., Raof N. A. [et al.]. The effect of chilled air on Burr formation when drilling Aluminium alloy in manufacturing industry // *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*. 2021. Vol. 28 (1). P. 437–445.

14. Гуськов А. М., Воронов С. А., Киселев И. А. [и др.]. Обзор литературных источников по моделированию динамики процесса сверления // *Наука и образование*. 2015. № 12. С. 240–265.

15. Aamir M., Giasin K., Tolouei-Rad M. [et al.]. A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for

aerospace applications // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9 (6). P. 12484–12500. DOI: 10.1016/j.Jmrt.2020.09.003.

16. Кисель А. Г., Макашин Д. С. Влияние СОЖ и режимов обработки на шероховатость поверхности при торцевом фрезеровании заготовок из алюминиевых сплавов // *Омский научный вестник*. 2022. № 3 (183). С. 32–36. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-32-36.

17. Пятых А. С. Моделирование вибрационной устойчивости процесса сверления // *Механика XXI века: материалы XVI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием*. Братск, 2017. № 16. С. 133–137.

КИСЕЛЬ Антон Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск; доцент кафедры инжиниринга технологического оборудования Калининградского государственного технического университета, г. Калининград.

SPIN-код: 7105-3051

AuthorID (РИНЦ): 702552

ORCID: 0000-0002-8014-0550

AuthorID (SCOPUS): 57211275687

ResearcherID: B-9210-2019

Адрес для переписки: kisel1988@mail.ru

МАКАШИН Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института Омского государственного технического университета ОмГТУ, г. Омск; доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 1763-1883

AuthorID (РИНЦ): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

Адрес для переписки: dima.makashin@gmail.com

БЕЛАН Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 5665-3129

AuthorID (РИНЦ): 540187

AuthorID (SCOPUS): 57192306912

Адрес для переписки: baltazar.13@mail.ru

АВЕРКОВ Константин Васильевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 8407-0488

AuthorID (РИНЦ): 674150

AuthorID (SCOPUS): 55257667700

Адрес для переписки: averok@yandex.ru

Для цитирования

Кисель А. Г., Макашин Д. С., Белан Д. Ю., Аверков К. В. Влияние режима обработки и метода охлаждения зоны резания на потребляемую максимальную мощность, высоту образовавшихся при сверлении заусенцев и получаемое отклонение диаметра // *Омский научный вестник*. 2023. № 1 (185). С. 19–24. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-19-24.

Статья поступила в редакцию 02.09.2022 г.

А. Г. Кисель, Д. С. Макашин, Д. Ю. Белан, К. В. Аверков

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ИЗМЕНЕННОЙ ЦИКЛОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В циклографическом моделировании линии трехмерного пространства известны прямая и обратная задачи. Решению этих задач в научной литературе посвящено достаточное количество публикаций. Авторами работы, на основе исследований известной классической циклографической модели, была получена ее модификация, названная измененной циклографической моделью. Необходимость в этой модели была вызвана решением ряда практических задач геометрического моделирования, в частности в области разработки поверхностных форм автомобильных дорог, где традиционно рассматривается только прямая задача геометрического моделирования, в которой требуется по пространственной оси дороги определить поверхностную форму последней. Авторами предложено решение обратной задачи моделирования для измененной циклографической проекции, позволяющее восстанавливать кривую линию пространства по ее циклографическому образу. В работе дано обоснование и приведено решение обратной задачи циклографического моделирования, реализованное на числовом примере. Результаты работы могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования, специализирующихся на проектировании автомобильных дорог общего и специального назначения.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, циклография, измененная циклографическая проекция, обратная задача, проектирование поверхностных форм автомобильных дорог.

Введение. Благодаря появлению и развитию информационно-вычислительной техники, системам автоматизированного проектирования и компьютерной алгебры, метод циклографического моделирования геометрических объектов стал всё чаще применяться в решении совершенно разнородных задач науки и производства [1–4].

Одной из его отличительных особенностей является то обстоятельство, что образуемая при циклографическом отображении пространственной кривой триада линий на плоскости проекций имеет взаимно однозначное параметрическое соответствие. Это позволяет решать как прямую, так и обратную задачу циклографического моделирования линии пространства.

Развитие циклографической модели пространственной кривой позволило авторам работы получить измененную циклографическую проекцию кривой, когда каждая из прямолинейных образующих линейчатых поверхностей, представляющих собой элементы аппарата циклографического моделирования линии пространства, всегда находится в плоскости, перпендикулярной ортогональной проекции исходной линии [4]. В дальнейших исследованиях такая проекция была использована авторами для разработки геометрической модели формообразования поверхностных форм автомобильных дорог общего назначения [4].

Анализ исследований в области автоматизированного проектирования поверхностных форм автомобильных дорог позволяет сделать вывод, что за последние годы на передний план выходит сравнительно новый вид проектирования, основанный на трехмерном представлении моделируемых объектов дорожного строительства. Уход от традиционного двухпроекционного проектирования позволяет во многом упростить и сократить вычислительные операции при проектировании, а также визуализировать моделируемые объекты дорожного полотна на всех этапах проектирования. При этом появляются задачи, в которых требуется по различным чертежам, планам или снимкам восстанавливать положение оси дороги в пространстве. И если при проектировании поверхностных форм автомобильной дороги на основе классической циклографической проекции такая задача считается решенной [1, 5], то в случае измененной циклографической проекции, на которой основана геометрическая модель формообразования поверхностных форм автомобильных дорог общего назначения, эта задача не исследовалась.

Постановка задачи. В циклографическом отображении проекция точки $A(x,y,z)$ пространства R^3 на плоскости $z=0$ представляет собой цикл (направленную окружность), центр которого соответствует координатам (x,y) , а радиус — координате

з исходной точки А. В зависимости от положения точки относительно плоскости проекций (знака координаты z), цикл будет иметь то или иное направление [5–8]. При таком способе отображения образуется проецирующий конус с вершиной в точке А и основанием в плоскости z=0, которым служит цикл (циклографическая проекция точки). Очевидно, циклографической проекцией пространственной кривой $\bar{P}(t) = (x(t), y(t), z(t))$; $\bar{P}'(t) \neq 0; t \in R: T_0 \leq t \leq T$ будет являться огибающая однопараметрического множества циклов, состоящая в общем случае из двух действительных ветвей. Совместное рассмотрение исходной пространственной кривой и ее циклографической проекции позволяет получить линейчатую поверхность, для которой данные кривые линии являются направляющими. В классической циклографической проекции полуугол при вершине проецирующего конуса равен $\alpha = 45^\circ$, а уравнения циклографической α -проекции пространственной кривой были известны ранее [7]. Авторами в предыдущих работах были получены уравнения циклографической β - и $\beta(t)$ -проекции пространственной кривой, когда полуугол может принимать не только постоянные значения в пределах $0^\circ < \beta < 90^\circ$, но и быть некоторой функцией $\beta(t)$ от параметра исходной кривой [4]. В последнем случае получаем обобщенную циклографическую проекцию с уравнениями:

$$\begin{aligned} x_{\beta(1,2)}(t) &= x(t) + z(t) \times \\ &\times e(t) \frac{-x'(t) \cdot \mu(t) \mp y'(t) \sqrt{\lambda(t) - \mu^2(t)}}{\lambda(t)}, \\ y_{\beta(1,2)}(t) &= y(t) + z(t) \times \\ &\times e(t) \frac{-x'(t) \cdot \mu(t) \pm x'(t) \sqrt{\lambda(t) - \mu^2(t)}}{\lambda(t)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mu(t) = e(t) \cdot z'(t) + e'(t) \cdot z(t)$; $\lambda(t) = x'(t)^2 + y'(t)^2$; $e(t) = \operatorname{tg}(\beta(t))$.

Полученные обобщенные уравнения циклографической проекции пространственной кривой послужили основой для разработки геометрической модели формообразования поверхностных форм автомобильных дорог на основе циклографического отображения [4]. Однако в государственных нормах и правилах существуют определенные требования, предъявляемые к проектируемым объектам дорожного строительства [9]. Одним из них является требование, при котором все ортогональные проекции прямолинейных образующих поверхности проезжей части должны находиться в плоскостях, перпендикулярных ортогональной проекции $\bar{P}_1(t)$ оси дороги $\bar{P}(t)$. Для выполнения данного требования авторами было предложено преобразование классической циклографической проекции в измененную циклографическую проекцию, основанное на «довороте» (рис. 1) ортогональных проекций прямолинейных образующих поверхностей дорожного полотна до требуемого положения. Наиболее подробно это преобразование рассмотрено в работе [4]. Полученные уравнения измененной циклографической проекции для пространственной кривой имеют вид:

$$\begin{aligned} x_{ch}(t) &= x(t) \mp \frac{y(t)' \cdot (z(t) \cdot e(t))}{\sqrt{(x(t)')^2 + (y(t)')^2}}, \\ y_{ch}(t) &= y(t) \pm \frac{x(t)' \cdot (z(t) \cdot e(t))}{\sqrt{(x(t)')^2 + (y(t)')^2}}. \end{aligned} \quad (2)$$

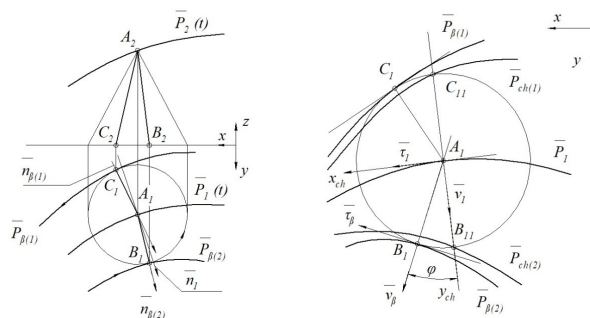


Рис. 1. Схема получения измененной циклографической проекции $\bar{P}_{ch(1,2)}(t)$ [4]

Из теории биссекторов [10] известно, что ортогональная проекция $\bar{P}_1(t)$ кривой $\bar{P}(t)$ является биссекторной линией для кривых $\bar{P}_{\beta(1)}(t)$ и $\bar{P}_{\beta(2)}(t)$. Как известно, биссекторной линией для двух геометрических объектов называется геометрическое место точек, равноудаленных от этих объектов, при этом расстояние от биссекторной линии определяется в направлении, ортогональном относительно обоих объектов [10, 11]. Очевидно, что кривая $\bar{P}_1(t)$ по отношению к кривым $\bar{P}_{ch(1)}(t)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t)$, полученным по уравнениям измененной циклографической проекции, биссекторной линией не является. В соответствии со схемой построения она является линией криволинейной симметрии, так как расстояния от любой точки на кривой $\bar{P}_1(t)$, отложенные по нормали к ней, до кривых $\bar{P}_{ch(1)}(t)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t)$, равны.

Из теоретических соображений возникает вопрос о существовании и возможности построения кривой в пространстве по заданной ее измененной циклографической проекции. Если принять рассмотренную выше задачу $\bar{P}(t) \rightarrow \bar{P}_{ch}(t)$, в качестве прямой задачи, то очевидно, что задача $\bar{P}_{ch}(t) \rightarrow \bar{P}(t)$ будет обратной. Решению этой задачи посвящена настоящая работа. Следует отметить, что кроме теоретического интереса обратная задача имеет практическую полезность в случае восстановления оси дороги по различным проектным планам и чертежам, а также по реальным замерам координат контрольных точек бровок дорожного полотна [12–14]. Последнее наиболее актуально при реконструкции дорожного полотна, при котором, как правило, сравнивают текущее положение оси дороги с проектным, таким образом оценивая объем ремонтных работ [12]. Большое значение имеет трехмерная визуализация проектного решения, при которой оцениваются пространственная видимость трассы, видимость на поворотах и примыканиях, а также ряд других специфических характеристик [15–18].

Теория. Рассмотрим решение обратной задачи $\bar{P}_{ch(1,2)}(t) \rightarrow \bar{P}(t)$, где $\bar{P}_{ch(1,2)}(t) : \bar{P}_{ch(1)} \cup \bar{P}_{ch(2)}$. Заметим, параметризации заданных кривых $\bar{P}_{ch(1)}$ и $\bar{P}_{ch(2)}$ различны: $\bar{P}_{ch(1)} = \bar{P}_{ch(1)}(t_1), T_{10} \leq t_1 \leq T_{11}$, $\bar{P}_{ch(2)} = \bar{P}_{ch(2)}(t_2), T_{20} \leq t_2 \leq T_{22}$. В этой связи возникает задача установления соответствия параметризаций заданных кривых $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$. В классическом циклографическом моделировании подобная задача называется обратной и ее решение известно [2, 9]. Суть этого решения заключается в следующем. Пусть на плоскости проекций $z=0$ даны две ветви циклографической проекции: $\bar{P}_{\beta(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{\beta(2)}(t_2)$. Необходимо восстановить в пространстве соответствующую кривую $\bar{P}(t)$. Для этого кривым $\bar{P}_{\beta(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{\beta(2)}(t_2)$ ставятся в соответствие их пространственные циклографические образы —

линейчатые поверхности $\Phi_{\beta(1)}$ и $\Phi_{\beta(2)}$, которые имеют определенный угол наклона образующих к плоскости $z=0$. Например, при α -проекции этот угол будет равен 45° , при β -проекции — $(90-\beta)^\circ$ [2]. Затем аналитически находится линия пересечения этих поверхностей, выраженная, например, через параметр t_1 . Аналитическое решение этой задачи, как показывает практика, может быть получено, если $\bar{P}_{\beta(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{\beta(2)}(t_2)$ — кривые второго порядка либо обводы из этих кривых. Таким образом, кривая $\bar{P}(t_1)$ (рис. 2), как ортогональная проекция линии $\bar{P}(t) : \Phi_{\beta(1)} \cap \Phi_{\beta(2)}$, является искомой и позволяет также привести кривую $\bar{P}_{\beta(2)}(t_2)$ к параметру t_1 . В результате на плоскости проекций при циклографическом отображении образуется триада взаимосвязанных линий $\bar{P}_1(t)$, $\bar{P}_{\beta(1)}(t)$ и $\bar{P}_{\beta(2)}(t_2 = f(t_1))$, $f'(t_1) \neq 0$.

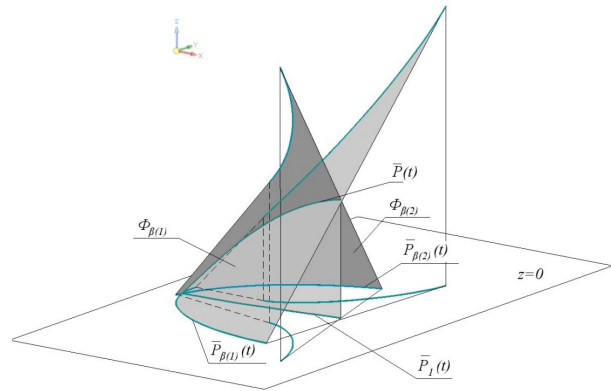


Рис. 2. Визуализация примера решения обратной задачи при циклографическом моделировании кривой линии пространства

Очевидно, что для кривых линий $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$, полученных по схеме образования измененной циклографической проекции, аналогичный способ получения кривой $\bar{P}(t)$ не годится. Также очевидно, что без расположения линии $\bar{P}(t)$ центров циклов, без значения угла поворота φ образующих (см. рис. 1(б)), невозможно однозначно определить положение линии $\bar{P}(t)$ в пространстве.

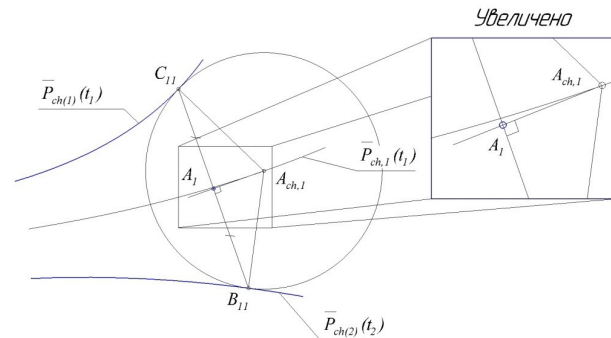


Рис. 3. Схема определения точек ортогональной проекции $\bar{P}_1(t)$ исходной кривой $\bar{P}(t)$ в случае задания кривых линий, являющихся измененной циклографической проекцией линии $\bar{P}(t)$

Построение α -поверхностей с направляющими $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$ позволяет найти пространственную кривую $\bar{P}_{ch}(t) : \Phi_{ch(1)} \cap \Phi_{ch(2)}$ и ее ортогональную проекцию $\bar{P}_{ch,1}(t_1)$ (рис. 3). Очевидно, что линия $\bar{P}_{ch,1}(t_1)$ является биссекторной для кривых $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$, но при этом не является линией криволинейной симметрии, т.е. ортогональной проекцией искомой кривой $\bar{P}(t)$. Нахождение линии $\bar{P}_{ch,1}(t_1)$ в свою очередь позволяет аналогичным образом привести исходные кривые $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$ к взаимно-однозначному соответствию параметров, т.е. к общей параметризации. Когда любой точке C_{1i} на кривой $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ будет однозначно соответствовать точка B_{1i} кривой $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$, тогда всегда можно отыскать середины отрезков $B_{1i}C_{1i}$, которые и будут точками A_i искомой кривой $\bar{P}_1(t)$ (см. рис. 3). Поскольку радиус окружности основания проецирующего конуса равен расстоянию A_iB_{1i} (или A_iC_{1i}), то всегда возможно восстановить пространственную кривую $\bar{P}(t)$ для случая циклографической α -проекции.

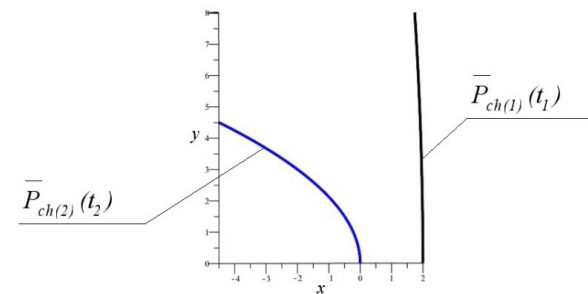


Рис. 4. Исходные данные примера

Результаты экспериментов. Рассмотрим пример. На плоскости проекций $z=0$ даны две кривые $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$ (рис. 4), имеющие следующие уравнения:

$$\begin{aligned} x_{ch(1)}(t_1) &= 2 - t_1^2 / 4; \\ y_{ch(1)}(t_1) &= 8t_1; \quad 0 \leq t_1 \leq 1. \\ x_{ch(2)}(t_2) &= -2t_2^2; \\ y_{ch(2)}(t_2) &= 3t_2; \quad 0 \leq t_2 \leq 1,5. \end{aligned}$$

Требуется определить пространственную кривую $\bar{P}(t)$, по отношению к которой эти кривые являются измененной циклографической проекцией.

По алгоритму решения обратной задачи циклографической проекции пространственной кривой поставим в соответствие заданным кривым их α -поверхности [2, 9]. Для этого построим пространственные образы эволют этих кривых. Координаты $x_{E(i)}(t_i)$ и $y_{E(i)}(t_i)$ эволют найдем по известным в дифференциальной геометрии формулам:

$$x_{E(i)}(t_i) = x_{ch(i)}(t_i) + y'_{ch(i)}(t_i) \times \frac{(x'_{ch(i)}(t_i))^2 + (y'_{ch(i)}(t_i))^2}{x''_{ch(i)}(t_i) \cdot y'_{ch(i)}(t_i) - x'_{ch(i)}(t_i) \cdot y''_{ch(i)}(t_i)};$$

$$y_{E(i)}(t_i) = y_{ch(i)}(t_i) + x'_{ch(i)}(t_i) \times \frac{(x'_{ch(i)}(t_i))^2 + (y'_{ch(i)}(t_i))^2}{x''_{ch(i)}(t_i) \cdot y'_{ch(i)}(t_i) - x'_{ch(i)}(t_i) \cdot y''_{ch(i)}(t_i)}.$$

Координата $z_{E(i)}(t_i)$ определяется так:

$$z_{E(i)}(t_i) = \pm \sqrt{(x_{ch(i)}(t_i) - x_{E(i)}(t_i))^2 + (y_{ch(i)}(t_i) - y_{E(i)}(t_i))^2},$$

где $i=1,2$. Полученные уравнения в статье приведены в сокращенном виде ввиду громоздкости их развернутых выражений.

Исходные кривые и пространственные образы их эволют при совместном рассмотрении образуют линейчатые поверхности $\Phi_{ch(1)}(t_1)$ и $\Phi_{ch(2)}(t_2)$. Уравнения этих поверхностей имеют вид:

$$\begin{aligned} X_{ch(1)}(t_1, l_1) &= x_{E(1)}(t_1) + l_1 [x_{ch(1)}(t_1) - x_{E(1)}(t_1)]; \\ Y_{ch(1)}(t_1, l_1) &= y_{E(1)}(t_1) + l_1 [y_{ch(1)}(t_1) - y_{E(1)}(t_1)]; \\ Z_{ch(1)}(t_1, l_1) &= z_{E(1)}(t_1)(1 - l_1); \\ 0 \leq t_1 \leq 1, \quad 0 \leq l_1 \leq 1. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{ch(2)}(t_2, l_2) &= x_{E(2)}(t_2) + l_2 [x_{ch(2)}(t_2) - x_{E(2)}(t_2)]; \\ Y_{ch(2)}(t_2, l_2) &= y_{E(2)}(t_2) + l_2 [y_{ch(2)}(t_2) - y_{E(2)}(t_2)]; \\ Z_{ch(2)}(t_2, l_2) &= z_{E(2)}(t_2)(1 - l_2); \\ 0 \leq t_2 \leq 1,5; \quad 0 \leq l_2 \leq 1. \end{aligned}$$

Составляя равенства: $X_{ch(1)}(t_1, l_1) = X_{ch(2)}(t_2, l_2)$, $Y_{ch(1)}(t_1, l_1) = Y_{ch(2)}(t_2, l_2)$, $Z_{ch(1)}(t_1, l_1) = Z_{ch(2)}(t_2, l_2)$, получаем систему из трех уравнений с четырьмя неизвестными. Решение такой системы осуществляется нахождением функциональных зависимостей параметров этой системы. В рассматриваемом примере вначале получим выражение параметра $l_2 = f_2(t_1, t_2, l_1)$ из выражения $Z_{ch(1)}(t_1, l_1) = Z_{ch(2)}(t_2, l_2)$. Затем, подставляя полученное выражение $l_2 = f_2(t_1, t_2, l_1)$ в уравнение $Y_{ch(1)}(t_1, l_1) = Y_{ch(2)}(t_2, l_2)$, выразим величину $l_1 = f_1(t_1, t_2)$. Далее, подставляем полученные выражения l_1 и l_2 в уравнение $X_{ch(1)}(t_1, l_1) = X_{ch(2)}(t_2, l_2)$ и выражаем параметр $t_2 = f(t_1)$. Подставив полученные зависимости $l_2 = f_2(t_1, t_2, l_1)$, $l_1 = f_1(t_1, t_2)$ и $t_2 = f(t_1)$ в уравнения поверхности $\Phi_{ch(1)}(t_1)$, получаем параметрические уравнения пространственной кривой $\bar{P}_{ch}(t_1)$:

$$\begin{aligned} x_{ch} &= f_x(t_1); \quad y_{ch} = f_y(t_1); \\ z_{ch} &= f_z(t_1), \quad 0 \leq t_1 \leq 1. \end{aligned}$$

На рис. 5 представлена визуализация полученной кривой $\bar{P}_{ch}(t_1)$. Все вычисления по определению функциональной зависимости параметров, а также визуализация, представленные на последующих рисунках, производились в системе компьютерной алгебры *Maple*.

Полученная кривая $\bar{P}_{ch}(t_1)$ позволяет выразить кривую $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$ через параметр t_1 . Полученные уравнения кривой $\bar{P}_{ch(2)}(t_2 = f(t_1))$ выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{ch(2)}(t_1) &= -2 \cdot \text{RootOf}(4096 _Z^5 - \\ &- 576t_1 _Z^4 + (1024t_1^2 + 8192) _Z^3 + \\ &+ (48t_1^3 + 23760t_1) _Z^2 + \\ &+ (-192t_1^4 - 63360t_1^2 + 13312) _Z + \\ &+ 3t_1^5 - 48t_1^3 - 24384t_1)^2, \\ y_{ch(2)}(t_1) &= 3 \cdot \text{RootOf}(4096 _Z^5 - \\ &- 576t_1 _Z^4 + (1024t_1^2 + 8192) _Z^3 + \\ &+ (48t_1^3 + 23760t_1) _Z^2 + \\ &+ (-192t_1^4 - 63360t_1^2 + 13312) _Z + \\ &+ 3t_1^5 - 48t_1^3 - 24384t_1), \end{aligned}$$

где $0 \leq t_1 \leq 1$. Функция *RootOf* — это специальный оператор системы компьютерной алгебры *Maple*, который означает, что система не может выразить решение в радикалах. Однако это не мешает ей давать верные конечные результаты символьных и численных расчетов.

Таким образом, теперь каждой точке на кривой $\bar{P}_{ch}(t_1)$ однозначно соответствует точка на кривой $\bar{P}_{ch(2)}(t_2 = f(t_1))$. Из рис. 3 следует, что искомыми точками A_{1i} являются точки, являющиеся серединами отрезков, пересекающих кривые $\bar{P}_{ch}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2 = f(t_1))$ в точках с одинаковыми значениями параметров t_i .

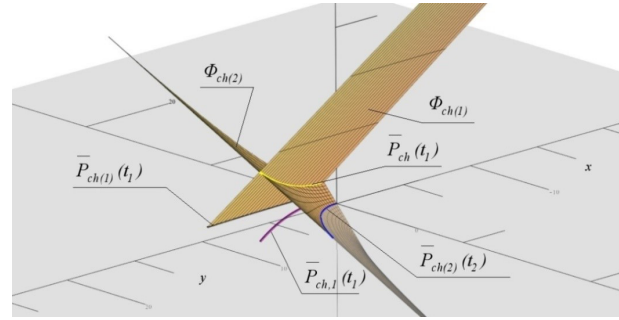


Рис. 5. Пространственная визуализация получения линии $\bar{P}_{ch}(t_1)$

В символьном виде такие точки можно определить, установив линейную зависимость между соответственными точками на кривых $\bar{P}_{ch}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2 = f(t_1))$:

$$\begin{aligned} x_1(t_1) &= x_{ch(1)}(t_1)(1 - \lambda) + x_{ch(2)}(t_1)\lambda, \\ y_1(t_1) &= y_{ch(1)}(t_1)(1 - \lambda) + y_{ch(2)}(t_1)\lambda, \end{aligned}$$

где $0 \leq t_1 \leq 1$, $\lambda = 0,5$. Таким образом, уравнения ортогональной проекции $\bar{P}_1(t)$ искомой кривой $\bar{P}(t)$, полученные в данном примере, имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1(t_1) &= 1 - 0,125t_1^2 - \text{RootOf}(4096 _Z^5 - \\ &- 576t_1 _Z^4 + (1024t_1^2 + 8192) _Z^3 + \\ &+ (48t_1^3 + 23760t_1) _Z^2 + \\ &+ (-192t_1^4 - 63360t_1^2 + 13312) _Z + \\ &+ 3t_1^5 - 48t_1^3 - 24384t_1)^2, \\ y_1(t_1) &= 4t_1 + 1,5 \text{RootOf}(4096 _Z^5 - \\ &- 576t_1 _Z^4 + (1024t_1^2 + 8192) _Z^3 + \\ &+ (48t_1^3 + 23760t_1) _Z^2 + (-192t_1^4 - \\ &- 63360t_1^2 + 13312) _Z + \\ &+ 3t_1^5 - 48t_1^3 - 24384t_1). \end{aligned}$$

Из рис. 1(б) видно, что любая точка $A_1(x_1(t_1), y_1(t_1))$ на кривой $\bar{P}_1(t)$ является ортогональной проекцией вершины проецирующего конуса. Непрерывное множество вершин, очевидно, совпадает с искомой пространственной кривой $\bar{P}(t)$. Таким образом, например, в случае α -проекции, величина координаты z точек A_1 будет равна расстоянию от точки A_1 до любой из кривых $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$ по направлению нормали, проведенной к линии $\bar{P}_1(t)$. Таким образом, координату $z_1(t_1)$ можно найти по уравнению $z_1(t_1) = \sqrt{(x_{ch(1)}(t_1) - x_1(t_1))^2 + (y_{ch(1)}(t_1) - y_1(t_1))^2}$:

$$\begin{aligned} z_1(t_1) &= (1 - 0,125t_1^2 + \text{RootOf}(4096 _Z^5 - \\ &- 576t_1 _Z^4 + (1024t_1^2 + 8192) _Z^3 + \\ &+ (48t_1^3 + 23760t_1) _Z^2 + (-192t_1^4 - \\ &- 63360t_1^2 + 13312) _Z + 3t_1^5 - 48t_1^3 - \\ &- 24384t_1)^2 + (4t_1 - 1,5 \text{RootOf}(4096 _Z^5 - \\ &- 576t_1 _Z^4 + (1024t_1^2 + 8192) _Z^3 + \\ &+ (48t_1^3 + 23760t_1) _Z^2 + \\ &+ (-192t_1^4 - 63360t_1^2 + 13312) _Z + \\ &+ 3t_1^5 - 48t_1^3 - 24384t_1))^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

Полученная пространственная кривая $\bar{P}(t) = (x_1(t), y_1(t), z_1(t))$ является искомой. Она также по-

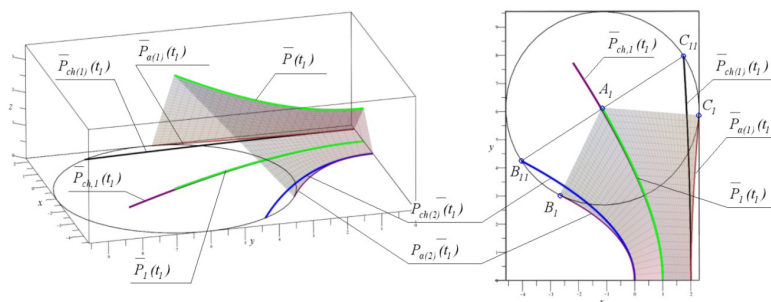


Рис. 6. Визуализация итогового результата получения кривой $\bar{P}(t)$ (на рисунке показана ее ортогональная проекция $\bar{P}_1(t)$)

звolyет получить классическую циклографическую проекцию по уравнениям (1). На рис. 6 представлен конечный результат решения рассматриваемого примера с ортогональной проекцией $\bar{P}_1(t)$ кривой $\bar{P}(t)$. Дополнительно, для большей наглядности, на рисунке показаны циклографические α -проекции $\bar{P}_{\alpha(1)}(t)$ и $\bar{P}_{\alpha(2)}(t)$, полученные для полуугла при вершине проецирующего конуса, равного 45° . Также визуализированы ортогональные проекции образующих линейчатых поверхностей, для которых кривые $\bar{P}_{\alpha(1)}(t)$ и $\bar{P}_{\alpha(2)}(t)$ и полученная кривая $\bar{P}(t)$ являются направляющими.

Обсуждение результатов. Результаты вычисленного эксперимента подтвердили теоретические выводы о том, что совершение перехода от кривых линий $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$, полученных по схеме образования измененной циклографической проекции, к исходной пространственной кривой $\bar{P}(t)$, возможно. Не исключается получение аналитического решения, если исходные кривые $\bar{P}_{ch(1)}(t_1)$ и $\bar{P}_{ch(2)}(t_2)$ будут заданы кривыми второго порядка или обводами из них. В остальных же случаях, когда исходные кривые представляют собой сплайн-кривые третьей или более высоких степеней, пространственную кривую $\bar{P}_{ch}(t_1)$ можно получить как дискретный ряд точек, каждая из которых определяется аналитически. В дальнейшем для формирования самой линии $\bar{P}_{ch}(t_1)$ может быть использована интерполяция этого ряда точек.

Заключение. Полученные результаты показывают, что измененная циклографическая проекция, так же как и классическая, является обратимой. Предложенный алгоритм определения исходной пространственной кривой по заданным кривым линиям, полученным по схеме образования измененной циклографической проекции, основан на алгоритме решения обратной задачи классической циклографической проекции пространственной кривой. Он позволяет однозначно определять линию $\bar{P}_1(t)$ (ортогональную проекцию искомой кривой), по которой восстанавливается искомая пространственная кривая $\bar{P}(t)$. Результаты работы могут быть использованы в области разработки систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог как общего, так и специального назначения.

Библиографический список

1. Lyubchinov E. V., Panchuk K. L. Geometric modeling of solutions of the direct and inverse tasks of geometric optics on a plane // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1210 (1). P. 012087. DOI:10.1088/1742-6596/1210/1/012087.

2. Мясоедова Т. М., Панчук К. Л. Формообразование семейства контурно-параллельных траекторий обрабатывающего инструмента на основе циклографического отображения // Ученые Омска — региону: материалы IV Региональной науч.-техн. конф., Омск, 04–05 июня 2019 г. / ОмГТУ. Омск, 2019. С. 142–146.

3. Панчук К. Л., Любчинов Е. В. Циклографическая интерпретация и компьютерное решение одной системы алгебраических уравнений // Геометрия и графика. 2019. Т. 7, № 3. С. 3–14. DOI: 10.12737/article_5dce5e528e4301.77886978.

4. Panchuk K. L., Niteyskiy A. S., Lyubchinov E. V. Cyclographic Modeling of Surface Forms of Highways // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 262. P. 012108. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012108.

5. Панчук К. Л., Кайгородцева Н. В. Циклографическая начертательная геометрия: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 232 с. ISBN 978-5-8149-2578-7.

6. Pottmann H., Wallner J. Computational Line Geometry. Berlin. Heidelberg: Springer Verlag, 2001. 565 p. ISBN 978-3-642-04018-4.

7. Choi H. I., Han C. Y., Moon H. P. [et al.] Medial axis transform and offset curves by Minkowski Pythagorean hodograph curves // Comput. Aided Design. 1999. Vol. 31. P. 59–72.

8. Dr. Emil Muller. Vorlesungen über Darstellende Geometrie. II. Band: Die Zyklographie. Edited from the manuscript by Dr. Josef Leopold Krames. Leipzig and Vienna: Franz Deuticke, 1929. 476 p.

9. СНиП 2.05.02–85. Автомобильные дороги: нормативно-технический материал. Введ. 1987–01–01. Москва: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 1987. 106 с.

10. Peternell M. Geometric Properties of Bisector Surfaces // Graphical Models. 2000. Vol. 62. P. 202–236. DOI: 10.1006/gmod.1999.0521.

11. Farouki R. T., Johnstone J. K. Computing point/curve and curve/curve bisectors // The Mathematics of Surfaces V (R. B. Fisher, Ed.). London: Oxford Univ. Press. P. 327–354.

12. Бойков В. Н., Петренко Д. А., Люст С. Р. [и др.]. Система автоматизированного проектирования автомобильных дорог INDORCAD/ROAD // Вестник Томского государственного университета. 2003. С. 350–353.

13. Корневский В. В., Мордик Е. А. Оценка геометрических параметров дороги с использованием передвижной дорожной лаборатории // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 4 (77). С. 48–55.

14. Бойков В. Н. САПР автодорог — перспективы развития // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2013. № 1 (1). С. 6–9.

15. Елугачёв П. А. Опытное трассирование автомобильной дороги с использованием пространственных кривых Безье // Исследовано в России. 2006. С. 915–922.

16. Абдуллин М. М., Глазычев А. О., Муфтеев В. Г. [и др.]. Особенности моделирования трассы автомобильной дороги

с использованием единой пространственной «В-сплайновой» кривой высокой степени // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон-2019». 2019. С. 169–171.

17. Сальков Н. А. Моделирование геометрических форм автомобильных дорог: моногр. Москва: ИНФРА-М, 2019. 162 с. ISBN 978-5-16-014029-2.

18. Кузьмин В. И., Левтеров А. И. Автоматизированное конструирование виражей безопасных конструкций на закруглениях автомобильных дорог // Вестник Харьковского национального автомобиледорожного университета. 2009. Вып. 47. С. 29–33.

ЛЮБЧИНОВ Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная геометрия и САПР» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8144-6370

AuthorID (РИНЦ): 917932

ORCID: 0000-0003-2499-4866

AuthorID (SCOPUS): 57199399265

ResearcherID: D-1882-2019

Адрес для переписки: Lubchinov.E.V@yandex.ru

ПАНЧУК Константин Леонидович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5623-0008

AuthorID (РИНЦ): 501163

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Адрес для переписки: Panchuk_KL@mail.ru

МЯСОЕДОВА Татьяна Михайловна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 6056-6455

AuthorID (РИНЦ): 686836

ORCID: 0000-0002-9641-9417

AuthorID (SCOPUS): 57201776004

ResearcherID: E-7505-2014

Адрес для переписки: mtm44mtm44@mail.ru

Для цитирования

Любчинов Е. В., Панчук К. Л., Мясоедова Т. М. Решение обратной задачи измененной циклографической модели // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 25–30. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-25-30.

Статья поступила в редакцию 11.01.2023 г.

© Е. В. Любчинов, К. Л. Панчук,

Т. М. Мясоедова

МОДИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ИЗ БЕЗВОЛЬФРАМОВОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА МАРКИ КНТ16 НЕПРЕРЫВНЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

Данная работа посвящена проблеме разработки технологических операций, направленных на совершенствование структуры и свойств и, как следствие, на расширение области применения металлорежущих пластин из безвольфрамовых твердых сплавов. Поиск альтернативных аналогов традиционным вольфрамокобальтовым твердым сплавам является актуальной задачей современного материаловедения, что обусловлено высокой стоимостью и дефицитом их компонентов. В данной работе проводится исследование влияния непрерывных ионных пучков различного состава на изменение морфологии, механических свойств и эксплуатационных характеристик металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 [TiCN-Ni-Mo]. Обнаружено, что воздействие непрерывных ионных пучков приводит к существенному изменению износостойкости режущих пластин при проведении операций токарной обработки среднеуглеродистой стали 40ХН. Установлен рациональный состав ионного пучка, при котором режущая пластина подвергается наименьшему износу после завершения цикла испытаний. С применением методов растровой электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии проведено исследование микрорельефа и морфологии поверхности образцов.

Ключевые слова: безвольфрамовые твердые сплавы, непрерывный ионный пучок, морфология поверхности, токарная обработка, сканирующая и атомно-силовая микроскопия.

Введение. Безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС) являются перспективным аналогом традиционных вольфрамокобальтовых твердых сплавов (ВКТС) для производства металлорежущего инструмента [1–2]. Причиной их разработки и активного внедрения в промышленность является дефицит и высокая стоимость вольфрама и кобальта [3]. Проведенные в последние годы исследования [4–6] показали, что наиболее перспективным аналогом карбида вольфрама (WC) является карбид или карбонитрид титана TiC(TiCN). Данная группа сплавов, наиболее распространенными в России из которых являются марки: ТН20 и КНТ16, обладают соизмеримым с большинством ВКТС значением твердости, кроме того, они менее склонны к адгезионно-

му взаимодействию с обрабатываемым материалом при резании. Эти преимущества способствовали активному внедрению БВТС на основе TiC/TiCN в производство металлорежущих пластин, предназначенных для чистового и получистового точения углеродистых и низколегированных сталей [7]. Вместе с тем БВТС обладают существенными недостатками, что снижают их ресурс работы и ограничивают область применения. К ним относятся: низкое значение предела прочности на изгиб, ударной вязкости и теплопроводности.

Для устранения данных недостатков и приближения свойств БВТС к традиционным ВКТС проводятся исследования, направленные на совершенствование их состава [8–9], технологии их

изготовления [10–11] и нанесение защитных покрытий [12].

Другой группой перспективных исследований, направленных на совершенствование структуры и свойств твердых сплавов, является обработка их поверхностных слоёв пучками заряженных частиц — ионов и электронов различной интенсивности и длительности. В результате данных видов воздействия тонкие поверхностные слои облучаемых материалов могут претерпевать существенные изменения фазового и химического состава, морфологии и структуры, что сопровождается изменением их физико-механических свойств [13].

Технология радиационно-пучкового модифицирования хорошо себя зарекомендовала в области модифицирования структуры и свойств традиционных ВКТС. В работе [14] показано влияние воздействия импульсных ионных пучков наносекундной длительности на износостойкость металлорежущих пластин из сплавов систем WC-Co и WC-TiC-Co при проведении токарной обработки жаропрочных хромоникелевых сплавов. Идентичные исследования [15] проводились и по модифицированию ВКТС сильноточными электронными пучками (СЭП). Помимо данных видов воздействия большой интерес представляет и низкоэнергетическая высокодозная ионная имплантация. Так, например, в работе [16] показано что ионная имплантация пучками $Ag^+ + Zr^+$ и $N^+ + Ti^+$ приводит к существенному повышению износостойкости при резании различных сплавов и коррозионной стойкости ВКТС марки ВК6.

Несмотря на большое количество работ в области модификации структуры и свойств традиционных ВКТС пучками заряженных частиц, которые открыли определенные перспективы для внедрения данных технологий в массовую промышленность идентичных исследований, объектом в которых являлись БВТС, крайне недостаточно, однако они представляют большой научно-практический интерес.

Целью данной работы является исследование морфологии, состава и износостойкости при точении углеродистых сталей безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 (TiCN-Ni-Mo) после воздействия непрерывных ионных пучков (НПИ) составов $Ag^+ + Zr^+$ и $N^+ + Ti^+$.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования были использованы трёхгранные съёмные металлорежущие пластины из БВТС марки КНТ16 (TiCN-Ni-Mo), химический состав и область применения которых нормированы в ГОСТ 26530-85.

Ионно-лучевое модифицирование образцов непрерывными газометаллическими ионными пучками проводилось на установке для ионной имплантации «КОМПОЗИТ» (ОНЦ СО РАН). Режимы облучения были следующие: энергия ионов $E \approx 20$ кэВ, доза (флюенс) облучения $D \approx 5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Состав пучков: $Ag^+ + Zr^+$ и $N^+ + Ti^+$. Выбор данных составов пучков обусловлен тем, что в настоящий момент существует две наиболее общепринятые теории изменения свойств твердосплавных инструментов после ионно-лучевой модификации. В работе [17] излагается мнение, что основным механизмом упрочнения металлов при ионной имплантации является — деформационный. С этой точки зрения, были выбраны тяжелые ионы аргона и циркония. По другому мнению, изложенному в работе [18], основной вклад в повышение механических характеристик в результате ионного облучения вносит образование твердых и устойчивых химических со-

единений. Поэтому в качестве второго состава пучка были выбраны более химически активные ионы азота и титана.

Стойкостные испытания исходных и облученных пластин проводились на токарно-винторезном станке 1К62. Токарной обработке подвергались прутки из стали 40ХН (твёрдость материала в состоянии поставки составляла 19 HRC) диаметром $d = 55$ мм и длиной $l = 0,8$ м. Режимы точения были следующие: $V = 70$ м/мин; глубина резания $t = 1$ мм; подача $S = 0,3$ мм/об.

Микротвёрдость образцов определялась с использованием микротвердомера Shimadzu HNV-2 (Shimadzu, Япония). Нагрузка на индентор составляла 0,98 Н. Число испытаний для определения среднего значения микротвёрдости каждого из образцов составляло 9.

Оценка характера разрушения пластин после проведения токарных испытаний проводилась с применением оптического микроскопа ZEISS Axio Observer.

Для исследования морфологии поверхности образцов до и после ионно-лучевой обработки был использован метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе JEOL JCM-5700 (Омский государственный технический университет). Химический состав поверхностных слоёв БВТС был определён с использованием метода энергодисперсионного анализа (ЭДА) при использовании приставки JED-2300, входящей в состав электронного микроскопа.

Исследование топографии поверхности проводилось с использованием метода сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) на микроскопе NTEGRA Prima (Омский государственный технический университет, г. Омск) в контактном режиме с применением зондовых датчиков CSG10 с жесткостью 0,5 Н/м.

Результаты экспериментов. После проведения токарной обработки были получены микрофотографии передних поверхностей металлорежущих пластин. Передняя поверхность исходной пластины (рис. 1) характеризуется наличием развитой лунки износа, длина которой составляет $\sim 0,3$ мм. Причина её образования, по всей видимости, связана с процессом адгезионного взаимодействия образующейся в процессе резания стружки и инструмента с последующим сходом стружки вместе с частицами инструмента. В данном случае износ передней поверхности пластины можно охарактеризовать как критический.

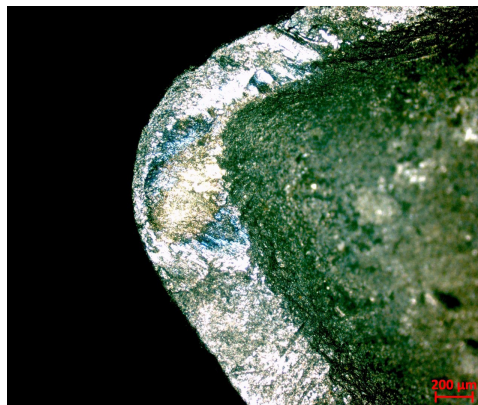


Рис. 1. Износ передней поверхности исходной пластины из сплава КНТ16 после точения стали 40ХН

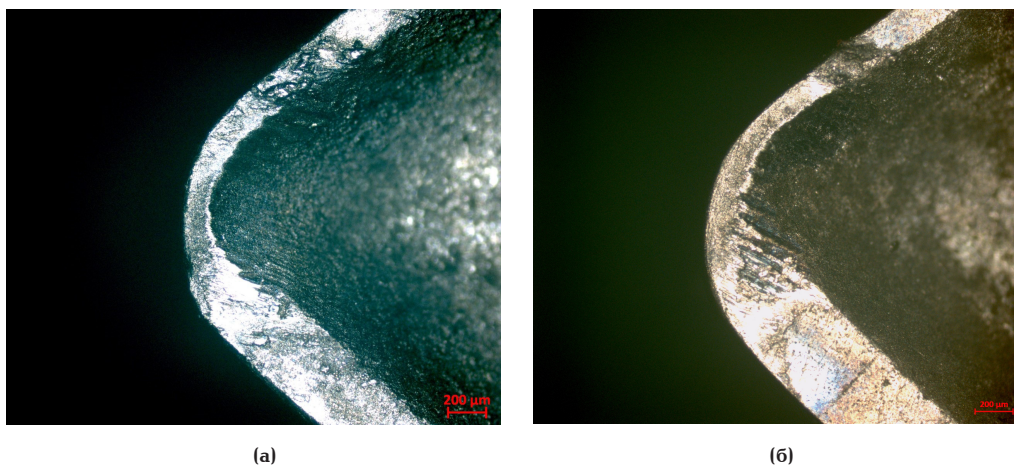


Рис. 2. Износ передних поверхностей пластин из сплава КНТ16 после точения стали 40ХН: (а) — после имплантации $Ag^+ + Zr^+$, (б) — после имплантации $N^+ + Ti^+$

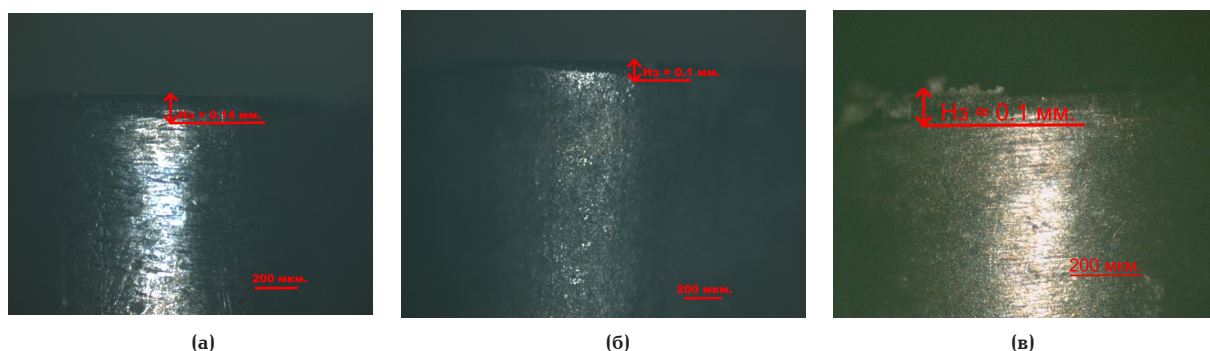


Рис. 3. Износ задних поверхностей пластин из сплава КНТ16 после точения стали 40ХН: (а) — исходная, (б) — после имплантации $Ag^+ + Zr^+$, (в) — после имплантации $N^+ + Ti^+$

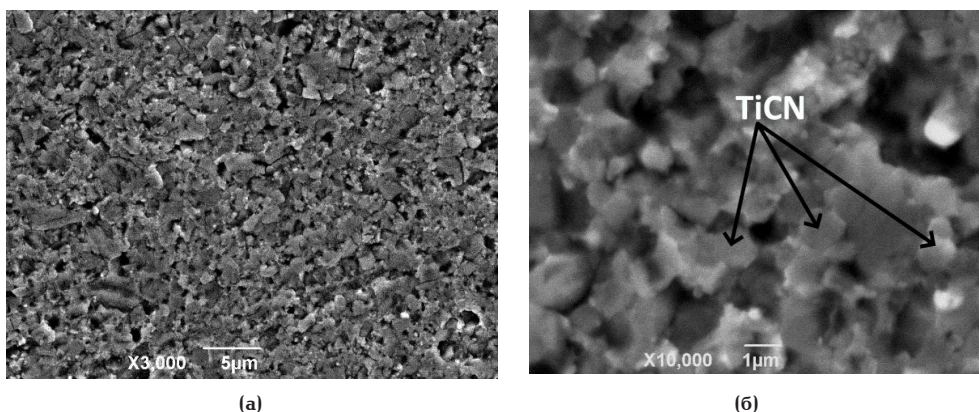


Рис. 4. РЭМ изображение поверхности исходного сплава КНТ16: (а) — $\times 3000$, (б) — $\times 10000$

На рис. 2 приведены идентичные микроизображения пластин, предварительно облученных НПИ $Ag^+ + Zr^+$ (рис. 2а) и $N^+ + Ti^+$ (рис. 2б). По изображениям видно, что ионно-лучевое модифицирование приводит к значительному снижению интенсивности изнашивания пластин. На передней поверхности пластины, облученной пучком $Ag^+ + Zr^+$, отсутствует лунка, а общее её состояние характеризуется лишь прохождением периода приработки. На передней поверхности пластины, облученной пучком $N^+ + Ti^+$, образуется лунка, однако её протяженность существенно меньше, чем у исходной.

При этом примечательным является тот факт, что задние поверхности пластин после проведения

испытаний были подвержены незначительному износу порядка 0,1–0,15 мм. Так, например, величина фаски износа по задней поверхности у не облученной пластины (рис. 3а) составила лишь ~ 0,14 мм, в то время как на передней поверхности длина лунки составляла критическое значение. Облучение НПИ (рис. 3б, в) приводит к незначительному уменьшению фаски износа на задней поверхности пластин.

При исследовании микротвердости исходного и облученных образцов было обнаружено, что воздействие газометаллического пучка $Ag^+ + Zr^+$ приводит к повышению среднего значения микротвердости ~ на 20 % (с 1420 до 1750 ед. HV). В результате

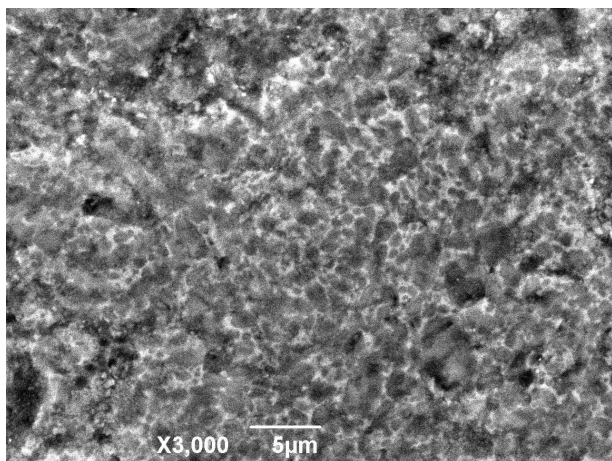


Рис. 5. РЭМ изображение поверхности сплава КНТ16 после имплантации ионов $N^+ + Ti^+$

воздействие пучка $N^+ + Ti^+$ значение микротвердости повышается незначительно (\sim до 1540 ед. HV). Предположительно, более существенное повышение микротвердости в результате выбора сравнительно тяжелых ионов $Ag^+ + Zr^+$ может быть связано с процессом деформационного упрочнения компонентов БВТС при ионной имплантации (образованием дефектной структуры).

Изображения поверхностей БВТС, полученные методом растровой электронной микроскопии, свидетельствуют о существенном изменении морфоло-

гии поверхности твердого сплава после ионно-лучевой обработки. Поверхность исходного образца (рис. 4а, б) представляет собой гетерогенную систему карбонитридных зёрен $TiCN$ и никель-молибденовой связки. Ввиду мелкого размера карбонитридных зёрен $TiCN$ (характерный размер составляет ~ 1 мкм.) их идентификация возможна лишь при весьма больших увеличениях (~ 10000 крат.). Помимо этого, по всей поверхности образца присутствуют поры размером $\sim 1-2$ мкм.

Воздействие непрерывного ионного пучка приводит к возможности наблюдения фазовых составляющих на поверхности БВТС при увеличении $\times 3000$ крат (рис. 5). В этом случае карбонитридная составляющая твердого сплава представляет собой тёмные зёрна округлой формы, а связка — светлые участки с достаточно равномерным распределением по поверхности образца. Помимо этого, в результате воздействия НИП уменьшается количество микропор, а их характерный размер остаётся без изменений. Такое изменение микрорельефа поверхности обусловлено процессом ионного распыления тонких поверхностных слоёв БВТС в процессе облучения.

Для получения количественных характеристик изменения топографии поверхности БВТС проводились СЗМ-исследования образцов. На рис. 6 представлены СЗМ — изображения поверхности исходного образца. Среднее значение шероховатости поверхности Sa , измеренное по полю 10×10 мкм. составило 234,9 нм. Номинальная площадь поверхности 129,8 мкм². На всей поверхности наблюдается

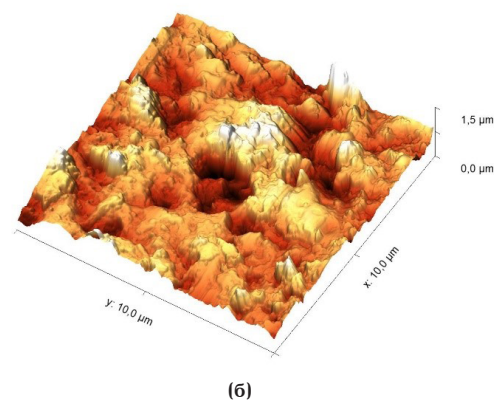
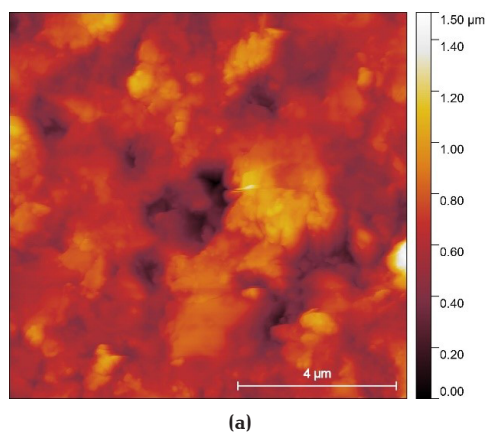


Рис. 6. АСМ-изображение поверхности исходного БВТС КНТ16: (а) — 2D, (б) — 3D

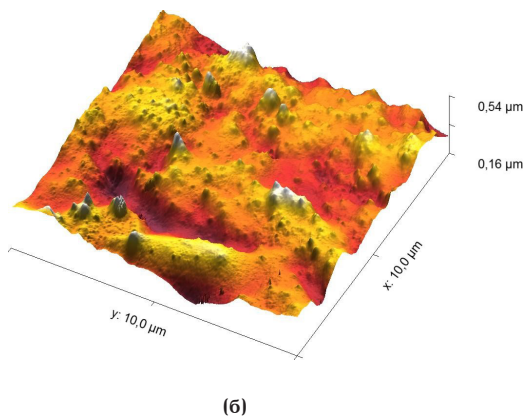
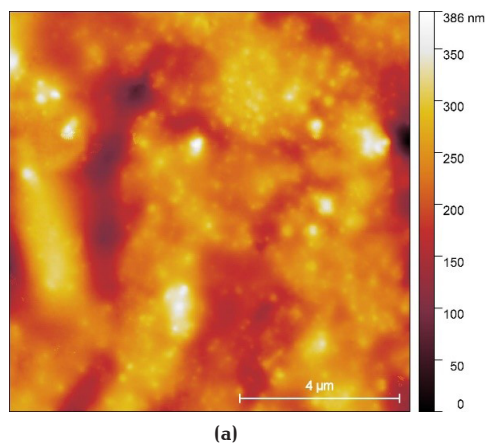


Рис. 7. АСМ-изображение поверхности БВТС КНТ16, облученного НИП $N^+ + Ti^+$: (а) — 2D, (б) — 3D

наличие большого количества равномерно распределенных макрозёрен, диаметр которых составляет $\sim 0,5-1$ мкм, а усредненная высота выступа относительно поверхности $\sim 0,2-0,4$ мкм. Очевидно, данные макрозёрна являются карбонитридным компонентом БВТС.

Воздействие непрерывного ионного пучка (рис. 7) приводит к существенному повышению количества зёрен TiCN на поверхности БВТС. При этом средние значения их диаметра и выступа относительно поверхности ниже, чем у зёрен исходного образца, и составляют $\sim 0,3$ и $0,2$ мкм соответственно. «Оголение» зёрненной фазы связано с процессом ионного травления никель-молибденовой связи в результате ионно-лучевого модифицирования.

Заключение. Таким образом, в данной работе с применением методов растровой электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии проведено исследование влияния облучения непрерывными газометаллическими ионными пучками составов: $Ag^+ + Zr^+$ и $N^+ + Ti^+$ на топографию и морфологию поверхностных слоёв БВТС марки КНТ16. Выявлено, что воздействие непрерывных ионных пучков приводит к формированию более развитого микрорельефа поверхности твердого сплава, что выражается в «оголении» карбонитридных зёрен TiCN в результате селективного распыления связующей никель-молибденовой связи. Установлено, что данный вид воздействия существенно повышает стойкостные характеристики металлорежущих пластин из БВТС при токарной обработке углеродистых сталей. При этом более предпочтительной, с точки зрения повышения ресурса работы пластин, является ионная имплантация тяжелыми ионами $Ag^+ + Zr^+$, причиной чего может служить процесс дефектообразования компонентов твердого сплава при внедрении ионов в их поверхностные слои. Данная теория также подтверждается повышением микротвердости БВТС.

Данное исследование позволяет утверждать, что модификация поверхностных слоёв безвольфрамовых твердых сплавов непрерывными ионными пучками является перспективным методом повышения их характеристик, что может позволить перейти к их более широкому применению в качестве материалов для изготовления металлорежущего инструмента.

Библиографический список

1. Панов В. С. Безвольфрамовые твердые сплавы: аналитический обзор // *Материаловедение*. 2019. № 10. С. 33–39.
2. Бурков П. В. Рентгенографические исследования структурных изменений твердых сплавов TiC–TiNi на разных стадиях технологического процесса // *Известия Томского политехнического университета*. 2004. Т. 307. С. 113–118.
3. Акимов В. В., Бадамшин А. М., Несов С. Н. [и др.]. Изменение структурно-фазового состояния и физико-химических свойств безвольфрамовых твердых сплавов TiC–TiNi после различных видов ионно-лучевой обработки // *Омский научный вестник*. 2021. № 2 (176). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-5-9.
4. Сивоха В. П., Миронов Ю. П., Рудай В. В. [и др.]. Структура и свойства композиционных материалов TiC–NiTi, легированных железом // *Журнал технической физики*. 2004. № 1 (74). С. 53–57.
5. Акимов В. В. Механизм жидкофазного спекания твердых композитов TiC–TiNi // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2006. № 6. С. 33–35.
6. Бурков П. В., Кульков С. Н. Оптимизация режимов горячего прессования сплавов TiC–NiTi // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2004. № 6 (43). С. 71–75.
7. Верещака А. А., Хожаев О. Повышение эксплуатационных характеристик инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с помощью наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2014. № 3 (43). С. 20–25.
8. Крутский Ю. Л., Максимовский Е. А., Петров Р. В. [и др.]. Синтез карбида и диборида титана для металлообработки и получения керамики // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2021. № 4(23). С. 155–166. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-155-166.
9. Акимов В. В. Исследование микротвердости безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбида титана // *Вестник ИГТУ*. 2005. № 3 (23). С. 121–124.
10. Агеева Е. В., Сабельников Б. Н., Колмыков В. И. [и др.]. Оптимизация процесса спекания диспергированных электроэрозией частиц сплава КНТ16 // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Техника и технологии. 2022. №1 (12). С. 8–24.
11. Янюшкин А. С., Якимов Н. П., Петров Н. П. [и др.]. Исследование поверхности безвольфрамового твердого сплава, шлифованного комбинированным методом // *Системы. Методы. Технологии*. 2009. № 2 (2). С. 70–77.
12. Хижняк В. Г., Карпец М. В., Долгих В. Ю. Нанесение защитных покрытий на безвольфрамовые твердые сплавы // *Порошковая металлургия*. 2003. № 9. С. 118–123.
13. Бадамшин А. М., Лептюк А. О. Исследование морфологии, химического состава и коррозионной стойкости твердого сплава TiC–NiTi, модифицированного мощным ионным пучком // *Омский научный вестник*. 2022. № 2 (182). С. 33–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-33-37.
14. Калистратова Н. П., Полеценко К. Н., Геринг Г. И. [и др.]. Модификация твердых сплавов мощными ионными пучками и послерадиационной термической обработкой // *Физика и химия обработки материалов*. 1999. № 1. С. 10–14.
15. Полеценко К. Н., Вершинин Г. А., Геринг Г. И. [и др.]. Модифицирование структуры и свойств твердых сплавов системы WC–Co сильноточными пучками заряженных частиц // *Вестник Омского университета*. 1996. № 2. С. 39–43.
16. Полеценко К. Н., Вершинин Г. А., Поворознюк С. Н. [и др.]. Износостойкость твердых сплавов системы WC–Co, модифицированных ионными пучками различной интенсивности // *Трение и износ*. 1998. № 4(19). С. 475–479.
17. Vershinin G. A., Poletshenko K. N., Povoroznjuk S. N. [et al.]. Mass transfer in heterogeneous materials under irradiation with high-intensity beams of charged particles // *Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2001. No. 5 (16). P. 761–767.
18. Кулешов А. К., Углов В. В., Брюхов В. В. Упрочнение инструментальных материалов имплантацией ионов (Zr, b, n) и (Zr, b, Kr) // *Вакуумная техника и технология*. 2011. № 4(21). С. 231–236.

БАДАМШИН Артем Маратович, ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 3531-5945

ORCID: 0000-0002-6695-4945

Адрес для переписки: Artembadamschin@mail.ru

ПОВОРОЗНЮК Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 2805-9830

AuthorID (SCOPUS): 57192694672
ResearcherID: htt-3208-2013

АКИМОВ Валерий Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск.

SPIN-код: 8808-0899

AuthorID (SCOPUS): 7101604913

РОГАЧЁВ Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 1373-4622

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ORCID: 0000-0003-2622-7492

ResearcherID: AAS-1459-2020

КРУТЬКО Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение

и материаловедение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 6202-2690

AuthorID (SCOPUS): 57211277289

ORCID: 0000-0002-7121-5004

Для цитирования

Бадамшин А. М., Поворознюк С. Н., Акимов В. В., Рогачёв Е. А., Крутько А. А. Модификация металлорежущих пластин из безвольфрамового твердого сплава марки КНТ16 непрерывными ионными пучками // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 31 – 36. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-31-36.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022 г.

© А. М. Бадамшин, С. Н. Поворознюк, В. В. Акимов,
Е. А. Рогачёв, А. А. Крутько

МЕТОДИКА НАХОЖДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДОВ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ В APQP ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НОВЫХ АВТОКОМПОНЕНТОВ

В статье рассмотрено содержание методики оценки технологического состояния станочной системы на основе метода планирования экспериментов обработки резанием заранее спроектированных и изготовленных под специальные характеристики точности автокомпонентов образцов изделий. На примере внутреннего посадочного отверстия рассмотрено нахождение диагностических составляющих специальной характеристики, являющихся результатом действия заранее известных технологических факторов. Их нахождение рассчитано на использование как цеховых, так и координатно-измерительных средств измерений. Полученные регрессионные модели диагностических составляющих позволяют на различных этапах APQP процесса определить интервалы параметров процесса резания, обеспечивающих заранее заданный запас точности специальной характеристики либо сделать заключение о несоответствующей точности станочной системы. Применение методики совместно со статистическими методами управления качеством позволяет обеспечить максимально достижимый уровень стабильности специальных характеристик в операциях обработки резанием, начиная с выпуска первых серийных образцов изделий. Методика может применяться при выборе и оценке технологической точности вновь приобретаемого оборудования в APQP процессе подготовки производства нового автокомпонента, приемке действующего оборудования после модернизации или ремонта, а также в аудите технологического процесса аудиторами поставщика.

Ключевые слова: APQP процесс подготовки производства, планирование эксперимента, диагностика, техническое состояние, станочная система, режимы резания.

Введение. Для автомобильной промышленности России актуальной задачей является выпуск автокомпонентов мирового уровня качества. Постоянно ужесточаются требования к экологичности [1], повышению надежности [2, 3] и эксплуатационных характеристик [4] автомобильных компонентов. Высокий уровень качества выпуска продукции зависит от своевременно и безошибочно выполненных процедур подготовки производства, включающих конструкторские и технологические мероприятия, требования к которым задаются в единой системе технологической подготовки производства (ЕС ТПП), и современные процедуры перспективного планирования качества (APQP процессы).

APQP процесс перспективного планирования качества продукции в автомобилестроении является основной методологией обеспечения конкурен-

тоспособности новых изделий [5, 6]. Перспективное планирование качества выполняется на этапах подготовки производства их серийного изготовления. Процесс состоит из следующих этапов — планирование и разработка концепции, проектирование и разработка продукции, проектирование и разработка процессов, окончательная подготовка производства, а также производство автокомпонента. На этих этапах применяются различные специальные инструменты, обеспечивающие высокий уровень качества изготавливаемой продукции. К ним относятся анализ последствий потенциальных дефектов конструкции D FMEA, карты потока процессов, планы управления (Control Plan), инструменты структурирования качества (QFD), технологических процессов PFMEA, статистические методы SPC, анализ измерительных процессов MSA. Все эти ме-

тоды направлены на уменьшение рисков возникновения дефектов и обеспечение качества основного продукта. Методология широко применяется мировыми автомобильными корпорациями [7], а также отечественными производителями легковых [8] и грузовых автомобилей [9].

Основным инструментом APQP процесса, направленным на планирование устранения причин потенциальных дефектов, является FMEA анализ. В результате его применения устанавливается значимость возникновения того или иного дефекта для потребителя, а также потенциальные причины и риски их возникновения. Метод экспертный и его эффективное применение во многом зависит от результативной командной работы [10]. В результате его применения формируется перечень специальных характеристик автокомпонента, а также планы управления, необходимые для поддержания управляемых условий их формирования в технологическом процессе изготовления автокомпонента. Основным инструментом регулирования специальных характеристик качества являются статистические методы, результатом из применения являются индексы стабильности и настроенности процессов действующих процессов [1, 6]. Статистические методы не ставят задачи выявления математических моделей показателей точности автокомпонента с параметрами переходов.

Успешное проведение подготовки производства нового автокомпонента во многом зависит от своевременности и правильно выполненных конструкторско-технологических процедур, предусмотренных единой системой технологической подготовки производства. К ним можно отнести процедуры проектирования заготовки, размерного анализа, выбора режущего и вспомогательного инструмента, специальных контрольных и зажимных приспособлений, разработки технологического процесса, оформлению маршрутно-операционной технологической документации, разработке 3D моделей и программ управления станков с ЧПУ [11] и т.д. Основой расчетных моделей являются идеализированные геометрические модели оснастки и полуфабриката. Параметры процессов резания при проектировании процессов принимаются по справочным данным.

Отметим, что в стандарте [5] отсутствуют требования к обязательному применению тех или иных технологических методов проектирования. В ряде работ рассмотрены информационные требования к инженерным процедурам конструкторско-технологической подготовки [11, 12], интегрированные в APQP процессы подготовки производства новых автокомпонентов.

Методом, позволяющим получить информацию о точности автокомпонентов, является способ оценки технологической точности станочного оборудования по данным обработки специально изготовленных образцов изделий с последующим измерением полученных размеров образца [13]. Измеряются диаметральные размеры не менее чем в четырех продольных сечениях в поперечном сечении, расположенном как можно ближе к шпинделю станка. По их значениям дается заключение о соответствии геометрической точности станка требования ГОСТ. Метод оценки не предусматривает нахождения зависимостей параметров процесса и комплекса характеристики точности обрабатываемого изделия. Для исследования различных факторов и оптимизации параметров производственных процессов при-

меняются методы планирования экспериментов [14, 15]. Они позволяют обеспечить нахождение регрессионных моделей показателей качества изделий и параметров процесса в ходе выполнения производственных экспериментов. Например, в [16] найдены регрессионные зависимости между параметрами процесса резания и отклонением профиля продольного сечения отверстия. Исследование проведено только для одного единичного показателя точности. Авторы публикации не обращают внимание на функциональное назначение растачиваемого отверстия, не рассматривают вопросы обеспечения других, формируемых в переходах растачивания отверстий показателей точности.

Другой характерной особенностью применения метода планирования экспериментов является абсолютизация полученных регрессионных моделей. Например, в [17, 18] рассмотрены результаты нахождения взаимосвязей между параметрами зубофрезерования и геометрическими показателями и показателями поверхностного слоя зубчатых колес. Отметим, что приведенные математические модели справедливы только для условий проведения экспериментальной обработки — техническому состоянию зубофрезерного станка и заготовительной оснастки, геометрической точности червячной фрезы, марки материала и твердости обрабатываемых заготовок зубчатых колес. В условиях другого аналогичного производства, например оснащенного современным зубообрабатывающим оборудованием с ЧПУ, приведенные в статье регрессионные модели необходимо повторно актуализировать.

Таким образом, для применения методов планирования экспериментов характерно исследование различных зависимостей между показателями качества и параметрами процесса, но дифференциации составляющих специальных характеристик исследуемых изделий и улучшения их точности не ставится.

Теоретическая часть. Рассмотрим метод, позволяющий на стадии технологической подготовки производства еще до выпуска установочной партии принять решение о значениях параметров переходов обработки резанием в технологических операциях формообразования автокомпонентов, обеспечивающие заданный запас точности специальных характеристик точности.

Как известно, одна и та же станочная система при различных параметрах переходов резания обеспечивает различную степень точности обрабатываемых поверхностей деталей машин [19, 20], она индивидуальна для различных видов показателей точности. В случае, если технологическая система обеспечивает точность, а заданы завышенные режимы, наладчик корректирует режимы по данным фактических измерений до достижения стабильности показателей, в худшем случае стабильность показателей не может быть обеспечена.

В настоящее время на этапе подготовки производства параметры переходов обработки резанием назначаются в зависимости от заданной производительности, стойкости инструментов и обеспечения параметров шероховатости обрабатываемой поверхности. Применяемые проектные подходы назначения режимов переходов обработки резанием не учитывают влияния фактического технического состояния станочного оборудования и параметров обработки резанием на значения показателей точности автокомпонентов. Выбором оптимальной степени точности станочной системы и оснастки,

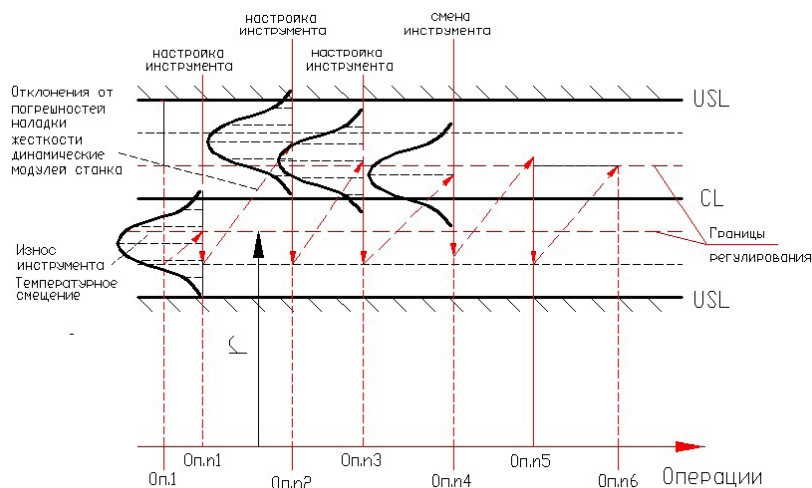


Рис. 1. Пример изменения границ регулирования радиальных размеров внутренней цилиндрической поверхности за счет SPC

подбором инструментов, и проектирования технологического процесса обработки резанием с применением размерного анализа стремятся к обеспечению коэффициента стабильности $Cp=1,5...1,7$ (рис. 1).

При этом зона регулирования в процессе изготовления производственной партии может изменяться в пределах $1...2 \sigma_0$, где σ_0 — заранее заданное значение изменчивости процесса, назначаемое исходя из величины поля допуска $\sigma_0 = Td/8$. На рис. 2 приведен фрагмент последовательности процедур процесса подготовки производства нового компонента в действующем производстве, позволяющий задать оптимальные значения показателей процессов обработки резанием.

Выполнение процесса состоит из собственно APQP процессов, диагностических процессов получения данных о состоянии производственного процесса, конструкторско-технологических процессов. Обязательной процедурой APQP процесса является DFMEA анализ, в результате которого с учетом требований к функции назначения автокомпонента формируется протокол значимых потенциальных дефектов. На основе этих данных формируются реестр специальных характеристик и карта потока процессов. Дальнейшие процессы необходимы для нахождения параметров переходов, обеспечивающих заданный запас точности специальных характеристик точности автокомпонента.

На примере внутреннего посадочного отверстия рассмотрим более подробно их содержание. Поскольку поверхность обеспечивает гладкую посадку, то специальной характеристикой является внутренний диаметральный размер [2] (рис. 3а), он обеспечивает допуск посадки. Как правило, этот параметр измеряется, вносится в планы управления, по нему ведется построение контрольных карт. Отметим, что управлять точностью напрямую диаметральный размер неэффективно, поскольку на его величину одновременно влияют несколько технологических факторов — жесткость обрабатываемой заготовки, динамика шпиндельного узла, свойств обрабатываемого материала и т.д. Рассмотрим, из каких составляющих состоит диаметральный размер — положения оси, двух радиальных размеров, отклонений радиального размера от строечного, отклонений профиля поперечного сечения, шероховатости поверхности (рис. 3б). Величи-



Рис. 2. Фрагмент последовательности процедур APQP процесса нового компонента на действующем производстве, обеспечивающий назначение оптимальных показателей процессов обработки резанием

на этих составляющих является следствием строго определенных факторов процесса резания, поэтому их можно считать диагностическими.

Отклонение радиального размера от его настроенного значения в основном зависит от жесткости станочной системы, отклонение профиля поперечного сечения от динамического фактора — неуравновешенности и биений шпинделя и зажимной оправки, шероховатость от обеспечения благоприятных условий срезания припуска — скорости резания (табл. 1) и уровня износа режущей кромки инструмента.

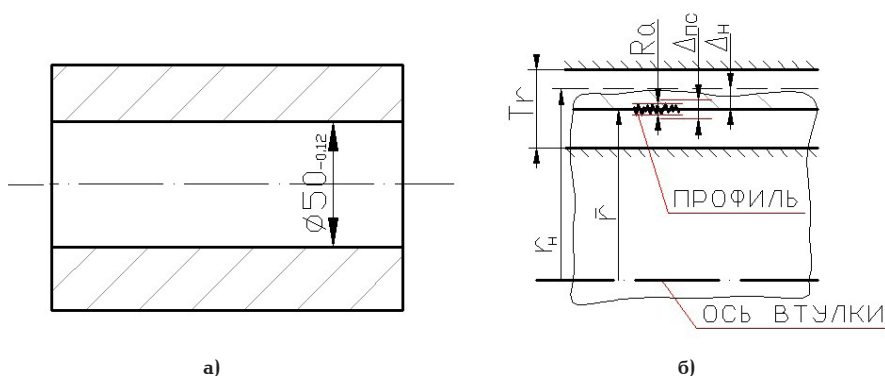


Рис. 3. Пример детали: а) «втулка», б) составляющие специальной характеристики, где T_r — допуск на радиальный размер, r_H — радиальный настроечный размер, Δ_H — отклонение среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, $\Delta_{пс}$ — отклонение профиля поперечного сечения, R_a — параметр шероховатости

Таблица 1

Составляющие и факторы процесса обработки резанием внутренней цилиндрической поверхности

№	Диагностические составляющие внутреннего диаметрального размера	Основные влияющие факторы процесса резания
1	Отклонение радиального размера от настроечного размера	Жесткость станочной системы у шпинделя
2	Отклонение формы поперечного сечения	Неуравновешенность и биение шпинделя и зажимной оснастки
3	Шероховатость профиля продольного сечения	Условия срезания припуска

В идеально выполненном переходе растачивания настроечное значение радиального размера должно находиться в середине поля допуска внутреннего размера, при этом отклонение поперечного сечения принимает нулевое значение, а значение шероховатости находится в собственном поле допуска. Благодаря тому, что причиной составляющих отклонений интегрального показателя точности — диаметрального размера, является строго определенный фактор процесса, появляется возможность более эффективного управления точностью, а также выявления причины его отклонений.

Расчетные формулы нахождения составляющих диаметральных размеров зависят от принятой схемы измерений. Наиболее распространенной цеховой схемой измерений является двухточечная схема измерений.

Для этой схемы измерений отклонение настроечного размера в поперечном сечении внутреннего отверстия находится как отклонение среднеарифметического значения радиального размера Δ_H от настроечной его величины по формуле:

$$\Delta_H = \frac{d_{\max} + d_{\min} + d_n}{2},$$

где d_n — настроечный диаметральный размер растачивания внутренней цилиндрической поверхности, мм; d_{\max} — максимальное измеренное значение диаметральных размеров, мм; d_{\min} — минимальное измеренное значение диаметральных размеров, мм.

Отклонение поперечного сечения может быть найдено по следующей известной формуле:

$$\Delta_{пс} = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2},$$

где d_{\max} — максимальный диаметральный размер внутренней цилиндрической поверхности, мм; d_{\min} — минимальный диаметральный размер внутренней цилиндрической поверхности, мм.

Величина шероховатости R_a определяется только профилографом.

Планирование эксперимента позволяет изучить влияние на величину специальных показателей качества различных факторов процесса для инструмента (радиус скругления режущей кромки, геометрические параметры), зажимной оснастке (усилие закрепления, угол базовых призм и т.д.), обрабатываемого материала (марки, твердости), различных схем движений инструмента в процессе срезания припуска и т.д. Рассмотрение любого дополнительного фактора значительно усложняет план проведения и, соответственно, трудоемкость проведения диагностического эксперимента. Для условий основной новой продукции в действующем производстве с наличием на рабочих местах основного оборудования, оснастки и режущего инструмента достаточно выполнить варьирование по трем независимым факторам — глубине резания, подаче, скорости резания.

Для переходов, формирующих специальные характеристики точности, выполняется планирование производственных экспериментов. Окончательная величина внутреннего диаметрального размера формируется в переходе растачивания. Для планирования эксперимента необходимо определить значения основного, нижнего и верхних уровней варьирования параметров процесса. Пример уровней варьирования показателей расточных переходов приведен в табл. 2. Основной уровень определяется исходя из режимов полустойковой обработки поверхности, нижний уровень — исходя из пара-

Пример уровней варьирования показателей переходов резанием

Параметры процесса резания	Уровни варьирования			Интервал варьирования $\delta_t, \delta_s, \delta_v$
	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	
	-1	0	+1	
t , мм	0,5	1,25	2,0	2
S , мм/об	0,1	0,15	0,2	0,2
V , м/мин	150	200	250	50

Таблица 3

Пример плана полнофакторного эксперимента для глубины резания, подачи и скорости резания

№	Уровни варьирования параметров процесса				Параметры процесса резания			Δ_H	Δ_H , расч.	ε
	0	Δt	ΔS	ΔV	δ_t	δ_s	δ_v			
					мм	мм/об.	м/мин			
1	1	1	1	1	2,0	0,2	250	0,015	0,0150	0
2	1	-1	1	1	0,5	0,2	250	0,01	0,0095	-5
3	1	1	-1	1	2,0	0,1	250	0,011	0,0115	4,55
4	1	-1	-1	1	0,5	0,1	250	0,006	0,0060	0
5	1	1	1	-1	2,0	0,2	150	0,013	0,0130	0
6	1	-1	1	-1	0,5	0,2	150	0,007	0,0075	7,14
7	1	1	-1	-1	2,0	0,1	150	0,01	0,0095	-5
8	1	-1	-1	-1	0,5	0,1	150	0,004	0,0040	0

метров чистовой обработки, верхний — исходя из параметров черновой обработки.

На основе данных табл. 2 выполняется планирование полнофакторного эксперимента. Пример плана приведен в табл. 3. Для его выполнения необходимо спроектировать и изготовить операционные образцы-изделия автокомпонентов, в конструкции которых предусматриваются обрабатываемые элементы со ступенчатым перепадом глубины резания. Значения геометрических параметров образца автокомпонента должны соответствовать специальным характеристикам изготавливаемого автокомпонента. Основная трудоемкость методики заключается в изготовлении на этапе подготовки производства образцов изделий автокомпонентов. Наладка и обработка внутренней цилиндрической поверхности занимает 5–10 мин. Точность измерений обработанного элемента зависит от качества точности специальной характеристики и для большинства измерений цена делений прибора находится в пределах 1...5 мкм. Такую точность обеспечивают современные универсальные средства измерений — трехточечные электронные нутромеры, микрометры, высотометры и координатно-измерительные машины.

Для устранения случайных ошибок измерение каждого параметра выполняется не менее 3-х раз и выполняется оценка наличия значительных отклонений данных измерений. В протоколе измерений регистрируются среднеарифметические значения. Высотный параметр шероховатости Ra измеряется профилографом.

На основе данных измерений рассчитываются значения диагностических составляющих специаль-

ного показателя и находятся регрессионные модели [11, 12]:

$$\Delta_H = (C_{0H} + C_{1H} \cdot \Delta t + C_{2H} \cdot \Delta S + C_{3H} \cdot \Delta V) \cdot K_{H'} \quad (1)$$

$$\Delta_{\text{ПС}} = (C_{0\text{ПС}} + C_{1\text{ПС}} \cdot \Delta t + C_{2\text{ПС}} \cdot \Delta S + C_{3\text{ПС}} \cdot \Delta V) \cdot K_{\text{ПС}'} \quad (2)$$

$$Ra = (C_{0Ra} + C_{1Ra} \cdot \Delta t + C_{2Ra} \cdot \Delta S + C_{3Ra} \cdot \Delta V) \cdot K_{Ra'} \quad (3)$$

где Δ_H , $\Delta_{\text{ПС}'}$, Ra — значения отклонений среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, отклонения профиля поперечного сечения, параметр шероховатости Ra;

Δt , ΔS , ΔV — значения уровней варьирования глубины резания, подачи, скорости резания (принимают предельные значения в интервале от -1 до 1);

$C_{0H'}$, $C_{0\text{ПС}'}$, C_{0Ra} — коэффициенты основного уровня, найденные по значениям измерений отклонений среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, отклонений профиля поперечного сечения, параметра шероховатости Ra базовой комбинации параметров перепада.

Например, коэффициент основного уровня отклонений наладочного размера находится по следующей формуле:

$$C_{0H} = \sum_{i=1}^n \Delta_{Hi}$$

где Δ_{Hi} — отклонения среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, мм; n — число экспериментов; C_{1H} , C_{1PC} , C_{1Ra} — коэффициенты при глубине резания, найденные по значениям отклонений среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, отклонений профиля поперечного сечения, высотного параметра шероховатости Ra.

Например, коэффициент при глубине резания при отклонении от настроечного размера находится по следующей формуле:

$$C_{1H} = \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot \Delta_{Hi},$$

где Δt — значение уровней глубины резания при соответствующих значениях отклонений среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения (принимает значение в интервале от -1 или 1); C_{2H} , C_{2PC} , C_{2Ra} — коэффициенты при подаче, найденные по значениям отклонений среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, отклонений профиля поперечного сечения, высотного параметра шероховатости Ra.

$$C_{2H} = \sum_{i=1}^n \Delta s \cdot \Delta_{Hi},$$

где Δs — значения уровней величины подачи при соответствующих значениях отклонений среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения (принимает значение -1 или 1); C_{3H} , C_{3PC} , C_{3Ra} — коэффициенты при скорости резания, найденные по значениям отклонений среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, отклонение профиля поперечного сечения, высотного параметра шероховатости Ra.

$$C_{3H} = \sum_{i=1}^n \Delta V \cdot \Delta_{Hi},$$

где ΔV — значения уровней величины скорости резания при соответствующих значениях среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения (принимает значение -1 или 1); K_H , K_{PC} , K_{Ra} — коэффициенты, учитывающие индивидуальные условия обработки (твердость заготовки, марка инструментального материала, геометрических параметров режущей части инструмента и т.д.) по отклонению наладочного размера, отклонений профиля поперечного сечения, высотного параметра шероховатости Ra.

Например, поправочный коэффициент на отклонение среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения рассчитывается по следующей формуле:

$$K_H = K_{HB} \cdot K_{\phi} \cdot K_r \cdot K_{\alpha} \cdot K_{\gamma} \cdot K_{MI} \cdot K_{MO} \cdot K_{COЖ}$$

где K_{HB} , K_{ϕ} , K_r , K_{α} , K_{γ} , K_{MI} , K_{MO} , $K_{COЖ}$ — поправочные коэффициенты на твердость обрабатываемого материала, на угол в плане, на радиус при вершине, задний угол, передний угол материал режущей части инструмента, на обрабатываемый материал, условия обработки с подачей смазочно-охлаждаю-

щей жидкости. Значения коэффициентов K_{PC} и K_{Ra} рассчитываются аналогично.

Значения уровней варьирования глубины резания, подачи и скорости резания с их значениями находятся по следующим зависимостям:

$$t = t_0 + \Delta t \cdot \delta_t,$$

где t_0 — основной уровень величины глубины резания, мм; Δt — значение уровня; δ_t — величина изменения глубины резания, мм.

$$s = s_0 + \Delta s \cdot \delta_s,$$

где s_0 — основной уровень величины подачи, мм/об; Δs — значение уровня; δ_s — величина изменения глубины резания, мм/об.

$$V = V_0 + \Delta V \cdot \delta_v,$$

где V_0 — основной уровень величины глубины резания, мм; ΔV — значение уровня; δ_v — величина изменения глубины резания, мм.

Найденные регрессионные модели используются для расчета значений в каждом опыте значений специальных характеристик точности.

Например, для отклонений настроечного размера рассчитывается погрешность регрессионной модели:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{HРАСЧ} - \Delta_H}{\Delta_H} \cdot 100\%,$$

где $\Delta_{HРАСЧ}$ — отклонение среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, рассчитанное по регрессионной модели, мм; Δ_H — экспериментальное значение среднеарифметического значения радиального размера от его настроечного значения, мм.

В случае превышения расчетной величины показателя от найденной в результате измерений более, чем на 10 % можно сделать заключение о неадекватности линейной модели для описания закономерности изменения диагностических составляющих. В этом случае линейные зависимости изменяются на полиномы второй степени.

Для нахождения значений параметров процесса резания, обеспечивающих заданный запас точности, необходимо решить систему уравнений (1), (2), (3); при этом найденные значения решения системы уравнений должны удовлетворять следующим неравенствам:

$$\Delta_H + \Delta_{PC} + Ra \leq Tr \cdot K_{3.T.H} \quad (4)$$

$$\Delta_H \leq [\Delta]_H \cdot K_{3.T.H} \quad (5)$$

$$\Delta_{PC} \leq [\Delta]_{PC} \cdot K_{3.T.PC} \quad (6)$$

$$Ra \leq [\Delta]Ra \cdot K_{3.T.Ra} \quad (7)$$

где Δ_H , Δ_{PC} , Ra — расчетные значения отклонений настроечного размера, отклонений поперечного сечения и параметра шероховатости Ra, найденные по формулам (1), (2), (3); $[\Delta]_H$, $[\Delta]_{PC}$, $[\Delta]_{Ra}$ — предельные значения отклонений настроечного размера, отклонений поперечного сечения, параметра шероховатости, мм;

Tr — допуск на радиальный размер, мм;

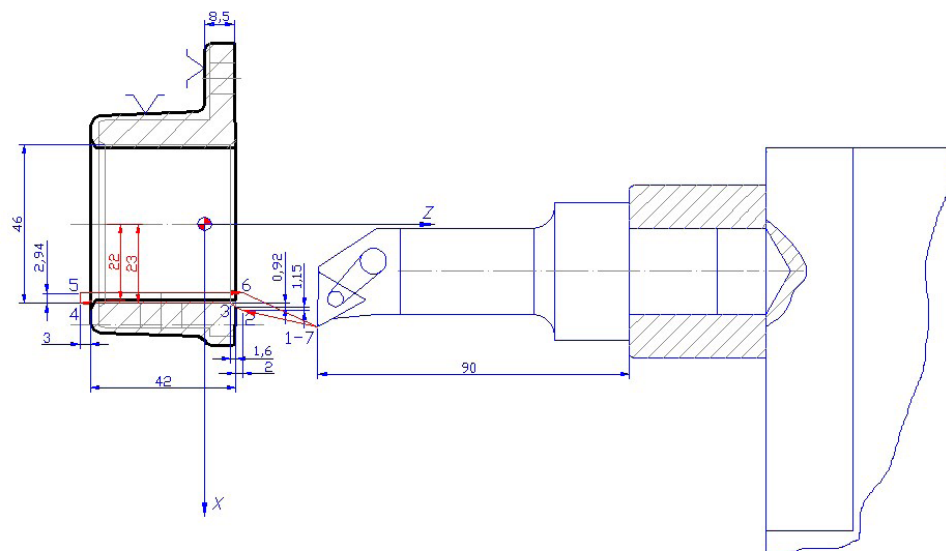


Рис. 4. Схема рабочих перемещений инструмента в переходе чистового растачивания внутреннего посадочного отверстия корпуса подшипника распределительного вала

$K_{3.T.r}$ — коэффициент запаса точности на радиальный размер, мм;

$K_{3.T.H'}$, $K_{3.T.Пс'}$, $K_{3.T.Ra}$ — коэффициенты запаса точности по отклонениям настроечного размера, отклонениям поперечного сечения, высотному параметру шероховатости.

Значения показателей процесса проверяются на соответствие необходимой производительности и являются исходными для их включения в операционные карты технологической документации и составления программы ЧПУ изготовления автокомпонента.

Регрессионные модели диагностических составляющих специальных показателей точности в процессах выпуска продукции постоянно изменяются, поэтому они должны актуализироваться инженерным персоналом по заранее принятому графику, совмещенному с процессами технического обслуживания оборудования.

Практическая реализация. Рассмотрим результаты применения методики для оценки запаса технологической точности токарного станка с ЧПУ, выполняющего растачивание внутренней поверхности автокомпонента корпус подшипника распределителя (рис. 4).

Деталь выполняет опорную функцию и влияет на точность вращения распределительного вала в процессе регулирования фаз открытия и закрытия клапанов газораспределительного механизма двигателя большегрузного автомобиля. В процессе растачивания необходимо обеспечить стабильность специальной характеристики — диаметрального размера внутреннего отверстия $46^{0}_{+0,12}$. Стабильность размера обеспечивает допуск посадки с натягом внутреннего отверстия со сталебронзовой втулкой.

Для реализации методики изготовлены экспериментальные образцы изделия в количестве четырех шт. и выполнена их обработка. Образцы в местах срезанных ступеней измерены на высотномере ф. Mahr Digimar 817 CLM. Шероховатость определялась при помощи профилографа ф. Mahr M 400.

Значения поправочных коэффициентов приняты за единицу для следующих условий процесса: средняя твердость образцов 170 HB, сменная многогранная пластина — TNMG 160404-KR, радиус при

вершине СМП $r=2$ мм, угол в плане 90° , передний угол $\gamma=5^\circ$, задний угол $\alpha=6^\circ$, марка обрабатываемого материала СЧ 30, условия обработки — с подачей СОЖ. Обработка выполнена в начале периода стойкости инструмента.

Пример полученных данных по отклонению среднеарифметического значения радиального размера приведен в табл. 3. В результате выполненных расчетов получены начальные регрессионные зависимости вида (1), (2), (3) диагностических составляющих внутреннего диаметрального размера:

$$\Delta_H = -0,0043 + 0,003667t + 0,03500S + 0,00002V,$$

$$Ra = 0,00052375 + 0,000005t + \\ + 0,01388S - 0,00000028V,$$

$$\Delta_{Пс} = -0,008875 + 0,0035t + 0,0575S + 0,0000575V,$$

где Δ_H , $\Delta_{Пс}$, Ra — расчетные значения отклонений среднеарифметического значения радиального размера от настроечного значения, отклонений профиля поперечного сечения и параметра шероховатости Ra .

Коэффициенты регрессионной формулы при параметрах процесса содержат информацию о величине и степени влияния фактора на величину соответствующей составляющей специальной характеристики.

Полученная система уравнений решена методом Ньютона, в результате найдены диапазоны значений параметров процесса чистового растачивания $t=0,5...0,76$ мм, $S=0,1...0,12$ мм/об, $S=150...190,5$ м/мин., удовлетворяющие неравенствам (4), (5), (6), (7) и обеспечивающие заданный запас точности в соответствии с обеспечиваемым качеством точности внутреннего диаметрального размера.

Систематическое обновление коэффициентов регрессионных моделей в процессе серийного выпуска корпуса подшипника позволяет оценить динамику обеспечения точности специальной характеристики точности. Обновление моделей совмещается с процессами выполнения регламентных работ обслуживания станка с ЧПУ. Эксперименты

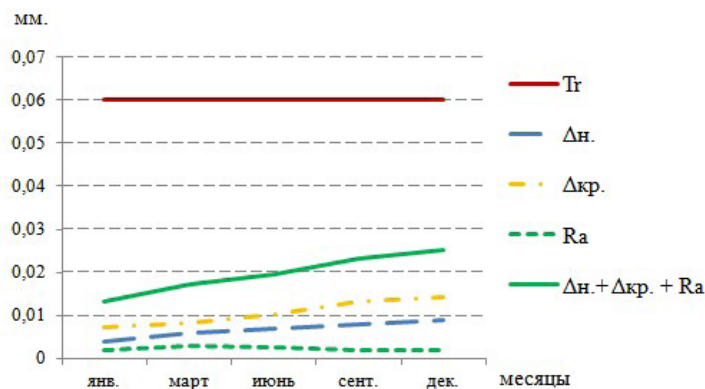


Рис. 5. Графики изменений вклада составляющих в значение допуска внутреннего диаметра

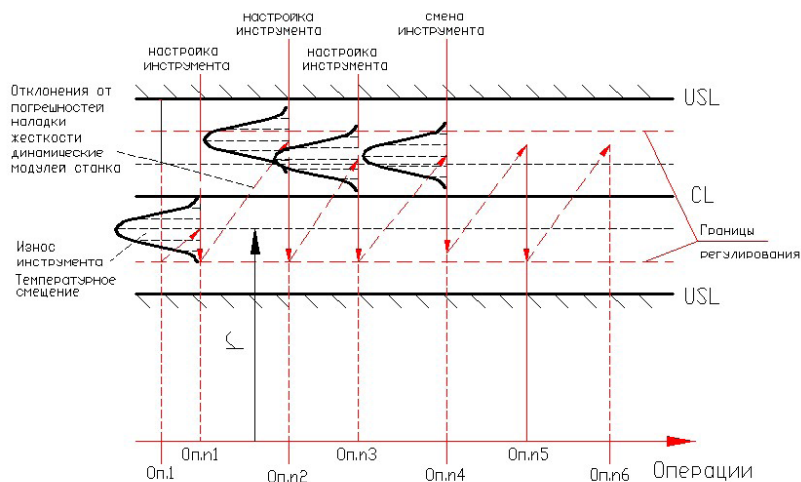


Рис. 6. Изменение границ регулирования радиальных размеров внутренней цилиндрической поверхности за счет методики нахождения оптимальных по запасу точности параметров процесса резания

проводились с сохранением условий первоначальной обработки образцов.

На рис. 5 приведены полученные графики изменений вклада диагностических составляющих в значение допуска внутреннего диаметра на режимах, обеспечивающих максимальную производительность чистового растачивания отверстия при $t=0,76$ мм, $S=0,12$ мм/об, $S=190,5$ м/мин. Выпуск серийной продукции сопровождается нарастанием отклонений настроечного размера и отклонений от круглости, при постоянстве величины шероховатости. В течение года их суммарный вклад в поле допуска внутреннего диаметра достигает 45 %, что снижает зону поля допуска, необходимую для настройки уровня процесса.

Превышение суммарного вклада всех составляющих более чем на 50 % от величины поля допуска свидетельствует о необходимости предупредительного вмешательства в процесс с целью уменьшения вклада наиболее значимых составляющих. В приведенном на графике примере необходимо уменьшение вклада отклонения настроечного размера и отклонений от круглости в допуск на внутренний размер. Уменьшение возможно за счет выполнения регулировочных работ по увеличению жесткости суппорта и подшипников шпиндельного узла,

либо уменьшения величины подачи, что приводит к уменьшению производительности выпуска продукции.

Выводы. Таким образом, нахождение регрессионных моделей изменения показателей и их решение под заданный запас точности на ключевых технологических операциях позволяет на имеющемся технологическом оборудовании подобрать режимы обработки резанием и повысить степень точности специальных характеристик автокомпонента. Все расчеты могут быть автоматизированы в офисных программных продуктах типа Microsoft Excel, что не требует привлечения к процессу выполнения экспериментов высококвалифицированного инженерного персонала.

В случае использования изношенного станочного оборудования подбор показателей позволяет значительно расширить зону регулирования до $3...4\sigma$ (рис. 6). Расширение зоны регулирования позволяет обеспечить более редкие настройки инструмента или же при сохранении исходной частоты настроек обеспечить более высокую степень точности партии автокомпонентов начиная с установочных партий.

Методика апробирована в процессах подготовки производства и серийного изготовления следующих видов деталей: корпус подшипника распределительного вала, корпус воздушного тормоза, шкивов ко-

ленчатого вала, валов раздаточной коробки и пока- зала свою результативность.

Включение регрессионных моделей диагности- ческих составляющих специальных характеристик в документацию РРАР создают дополнительные условия, позволяющие обеспечить уверенность по- требителя в качестве изготавливаемого автокомпо- нента.

Библиографический список

1. Гумеров И. Ф., Хафизов Р. Х., Борисенков Е. Р. [и др.]. Повышение экологических показателей качества автомобильных дизелей КамАЗ — основное направление их развития // Двигателестроение. 2013. № 1 (251). С. 31–37.
2. Галиев Р. М., Нуретдинов Д. И., Назаров Ф. Л. Иссле- дование надежности дизельных двигателей внутреннего сго- рания грузового автомобиля // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, опти- мизация. 2022. № 1 (90). С. 14–22.
3. Кулаков А. Т., Барыльникова Е. П., Фахруллин И. Р. Влияние износов в коренных и шатунных подшипниках на режимы смазки шатунных подшипников КамАЗ-740 // Соци- ально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 1 (87). С. 31–36.
4. Гумеров И. Ф., Валиев Д. Х., Куликов А. С. Развитие конструкции и технологии производства нового поколения дизельных двигателей КамАЗ Р6 // Двигателестроение. 2020. № 1 (279). С. 30–39.
5. ГОСТ Р 51814.6-2005 Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Менеджмент качества при планиро- вании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов. Введ. 01–07–2005. Москва: Стандартинформ, 43 с.
6. Перспективное планирование качества продукции и план управления. APQP. Ссылочное руководство: пер. с англ. Нижний Новгород: ООО СМЦ Приоритет, 2012. 221 с.
7. Кудряшов А. В. [и др.]. «Круглый стол» APQP. Пробле- мы и опыт внедрения // Методы менеджмента качества. 2012. № 6. С. 8–14.
8. Васильчук А. В., Юнак Г. Л. Принятие решений на ос- нове фактов в системе менеджмента качества ОАО «Авто ВА3» // Вестник Самарского государственного техниче- ского университета. Серия: Технические науки. 2005. № 33. С. 108–114.
9. Егоршин Н. В. Взаимодействие ОАО «КамАЗ» с постав- щиками и требовательность к себе // Сертификация. 2008. № 4. С. 32–34.
10. Козловский В. Н., Антипов Д. В., Панюков Д. И. [и др.]. Аспекты создания профессиональной группы экспертов при решении проблем качества продукции автопрома // Автомо- бильная промышленность. 2018. № 5. С. 1–6.
11. Васильев В. А., Биктимирова Г. Ф. Процесс одобрения поставщиков автомобильных компонентов как элемент корпо- ративной системы менеджмента отечественного автопроизво- дителя // Качество. Инновации. Образование. 2017. № 8 (147). С. 17–22.
12. Валиева Е. Г., Касьянов С. В. Анализ информативности документации для управления качеством сложных поковок по требованиям IATF 16949 // Автомобильная промышленность. 2020. № 5. С. 4–6.
13. ГОСТ 18097-93 Станки токарно-винторезные и токар- ные. Основные размеры. Нормы точности. Введ. 01–07–1996. Москва: Изд-во стандартов, 2005. 25 с.
14. Ящерицын П. И., Махаринский Е. И. Планирование эксперимента в машиностроении. Минск: Высш. школа, 1985. 286 с.
15. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 268 с.
16. Гусев В. Г., Наумов Г. М., Харитонов Т. А. Много- факторное исследование профиля продольного сечения отвер- стий, обработанных на станке с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 5 (307). С. 79–83.
17. Кане М. М., Шелег В. К., Кравчук М. А. Моделиро- вание и оптимизация процесса зубофрезерования цилиндри- ческих шестерен червячными фрезами // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. № 4 (53). С. 19–27.
18. Кане М. М., Шелег В. К., Кравчук М. А. [и др.]. Анализ взаимосвязей некоторых параметров качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен с режимами зубофре- зерования // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Т. 8. С. 251–255.
19. Новоселов Ю. К., Богущий В. Б. Оценка влияния от- дельных режимов резания на показатели процесса шлифова- ния // Вестник науки и образования северо-запада России. 2019. Т. 5, № 3. С. 1–8.
20. Ингемансон А. Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивно- го управления токарной и фрезерной обработкой в цифро- вых производственных системах // Обработка металлов-2020. Т. 22, № 1. С. 27–40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-27-40.

САФАРОВА Лейля Ринатовна, аспирант кафедры «Материалы, технологии и качество» Набережно- челнинского института (филиал) Казанского (При- волжского) федерального университета, г. Набе- режные Челны.

AuthorID (SCOPUS): 57196279310

Адрес для переписки: leila-r.85@mail.ru

КАСЬЯНОВ Станислав Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Материалы, технологии и качество» Набережно- челнинского института (филиал) Казанского (При- волжского) федерального университета, г. Набе- режные Челны.

SPIN-код: 8174-2600

AuthorID (РИНЦ): 538828

AuthorID (SCOPUS): 57197793774

САФАРОВ Дамир Тамасович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Матери- алы, технологии и качество» Набережночелнинско- го института (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны.

SPIN-код: 4346-4997

AuthorID (РИНЦ): 741369

ORCID: 0000-0002-8297-4524

AuthorID (SCOPUS): 6603409746

ResearcherID: 6834-2018

Адрес для переписки: Safarov-dt@mail.ru

Для цитирования

Сафарова Л. Р., Касьянов С. В., Сафаров Д. Т. Методи- ка нахождения параметров переходов обработки резанием в APQP процессе подготовки производства новых автокомпо- нентов // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 37–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-37-45.

Статья поступила в редакцию 22.08.2022 г.

© Л. Р. Сафарова, С. В. Касьянов, Д. Т. Сафаров

¹АО «Научно-производственная корпорация
«Космические системы мониторинга,
информационно-управляющие
и электромеханические комплексы
имени А. Г. Иосифьяна»,
г. Москва

²Московский государственный
технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный
исследовательский университет),
г. Москва

³АО «Московский
машиностроительный завод «Авангард»,
г. Москва

ДИНАМИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СБОРКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Работа посвящена созданию агентной модели, предназначенной для расчета времени, затраченного сотрудниками на сборочный этап техпроцесса изготовления оборудования для АЭС. В статье акцент делается на потребность в данной разработке, констатируется оправданность исследования и развития области атомной энергетики, приводятся подтверждающие факты. В работе показываются различные подходы к определению производительности работников. За базовую берется концепция постепенного наращивания усталости работника на каждом этапе техпроцесса. В модели агентами являются работники и технологический процесс. Показываются составные части программы, реализованной на языке C#, даются описания классов, их функционирование для имитации поведения агентов производственной системы. Диаграмма классов показывает выделенные классы и связи между ними с точки зрения наследования. Проводится исследование функционирования модели на примере типового сборочного процесса — сборки каркаса шкафа, состоящего из семи основных операций. В работе отображены структурированные, эмпирически проанализированные значения категорий усталости и времени техпроцесса для 85 работников в графической форме по операциям. Показывается пример нарастания усталости для одного из работников и график Ганта, по которому можно оценить, как проходили операции во времени. В качестве выходных данных агентной модели приводится расчетное значение затраченного времени за весь этап техпроцесса сборки оборудования для АЭС. Аргументируется точность расчетов сходимостью данных, полученных в средах Matlab Mathworks и Microsoft Excel при ручном моделировании. В заключение констатируется небольшое отклонение выходных данных разработанной агентной модели от практического эксперимента, выполненного в рамках реализации контракта на создание оборудования для нового энергоблока, проводится причинно-следственный анализ. Также в заключение разобраны экстремальные значения некоторых данных работников и акцентируется внимание на неоправданность применения классических усредненных подходов при анализе общей производительности, приводятся соответствующие примеры. Дается справка о возможности применения агентной модели в смежных областях.

Ключевые слова: атомная электростанция, динамическое нормирование, агентное моделирование, сборка, технологический процесс.

Введение. Мир в XXI веке постоянно развивается и ускоряется. Современные гаджеты, компьютерные устройства, мощные промышленные роботы, системы автоматизации так или иначе базируются на электронике. При этом необходимо уменьшать энергетические затраты оборудования. С учетом вышесказанного отмечается тенденция роста потребности в энергоресурсах. Именно поэтому необходим мониторинг энергетических затрат с применением современных технологий. Хорошим примером является концепция автоматизированного комплекса, созданного в работе [1], состоящего из измерительных, передающих и вычислительных устройств. Нельзя также пропустить и теоретические подходы к анализу ситуаций на рынке энергоресурсов. Применение агентного моделирования для анализа и прогнозирования потребности в энергоресурсах, предложенного в работе [2], очень актуально.

Несмотря на противоречивую точку зрения и общественную дискуссию об атомных технологиях, строительство и использование АЭС является оптимальным решением проблемы увеличения потребности в энергоресурсах по мнению авторов работ [3–5]. Безопасность подобных объектов при соблюдении всех стандартов будет также на очень высоком уровне [6].

Кроме того, при использовании незадействованного потенциала комплексов возможно обогревать как близлежащие города и села водяными ресурсами [7], так и сельхоз области [8]. В случае строительства АЭС в засушливых зонах, которых крайне мало в Российской Федерации [9], это приведет также к улучшению микроклимата данной территории вследствие появления дополнительных водохранилищ.

Однако атомные комплексы возводят достаточно продолжительное время [10], из-за чего ввод в эксплуатацию нового блока или станции происходит не ранее чем через 5 лет, о чем также свидетельствует информация документа [11].

В результате появляется необходимость решить многоэтапную задачу, состоящую из увеличения количества блоков и ускорения строительства АЭС. Если первую часть реализует государство в части политики развития энергетического комплекса, то ускорение технологического процесса зависит от предприятий-поставщиков оборудования.

К сожалению, на данный момент в компаниях зачастую применяются устаревшие подходы к управлению предприятиями и внутренними организационными структурами. Составление план-графиков на них ведется на основании опыта, с учетом неоправданно огромного задела. Также часто встречаются расчеты времени по среднестатистическому значению для человека [12]. Все перечисленное приводит к замедлению сроков изготовления конечного продукта. Поэтому возникает потребность в создании эффективной модели для нормирования технологического процесса.

Как известно, технологический процесс изготовления высокотехнологичной продукции, к которой в полной мере относится оборудование для АЭС, состоит из множества этапов. Оптимизация времени создания изделий должна происходить на каждом из них.

1. Метод. В разрабатываемой имитационной модели взаимодействие осуществляется между двумя типами агентов: технологический процесс и сотрудник.

Технологический процесс характеризуется последовательностью операций и значением штучного времени для каждой операции, изменяющейся со временем, вследствие влияния накопления усталости, и находится по формуле, разработанной в работе [13], основанной на принципах теории управления [14–16]:

$$i_j = \sum_{\alpha=1}^{17} x_{\alpha} + 2J_{1\alpha}$$

$$\bar{X} = \sum_{j=1}^{17} \sum_{\alpha=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_{\mu}^{i_{\mu}-v} + \sum_{j=18}^{23} \sum_{\delta=c_{j-1}}^{c_j} t_j \prod_{\xi=18}^j L_{\xi}^{c_{\xi}-\delta} \prod_{\psi=1}^{17} L_{\psi}^{x_{\psi}-v} \quad (1)$$

Как уже было заявлено, уравнение учитывает динамику работоспособности по показателю производительности труда. Причем ее изменение может как характеризоваться возрастанием производительности до перерыва, достигая своего максимума через некоторое время, так и рассчитываться методом усредненного значения, полученного путем продолжительного анализа конкретного сотрудника за некоторый интервал исследуемого времени.

Также важно отметить, что данный подход несколько отличается от классического расчета технологического процесса, находящегося по формуле:

$$T_{\text{шт}} = T_O + T_B + T_{TO} + T_{OO} + T_{\Pi}, \quad (2)$$

где T_O — основное время, затраченное на выполнение технологических переходов;

T_B — вспомогательное время, которое затрачивается на перемещение, изменение позиции, замену инструмента, измерение и подгонку;

T_{TO} — время на техническое обслуживание рабочего места, затрачиваемое на регулировку, правку, смену инструмента, уборку;

T_{OO} — время на организационное обслуживание для подготовки рабочего времени;

T_{Π} — время на регламентированные перерывы.

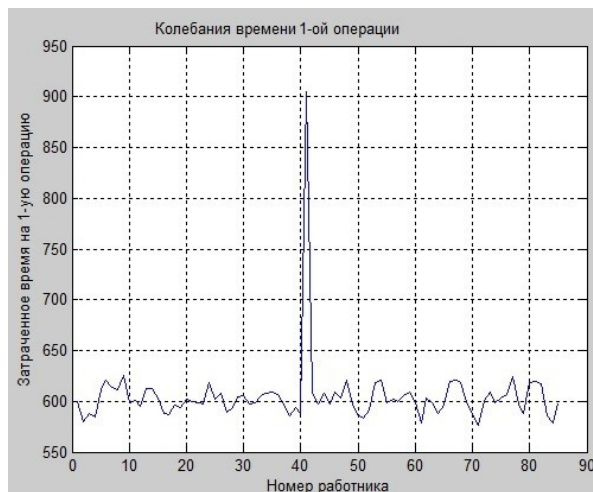
Для моделирования поведения агентов необходимо задать законы распределения, по которым выполняются операции технологического процесса каждым отдельным работником.

Сотрудники в модели будут выполнять работу в соответствии с технологическим процессом, но с учетом индивидуальных характеристик производительности и утомляемости. Параметры агента (installer) определяются статистическими характеристиками: производительность (productivity) каждого агента определяется по нормальному закону распределения; утомляемость (tiredness) может соответствовать рис. 1 в случае применения первого подхода.

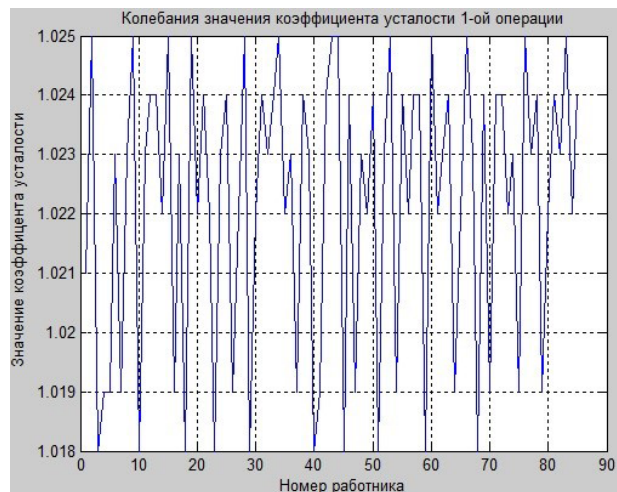
2. Описание модели. Разработана агентная модель сборки оборудования для атомных комплексов, которая осуществляется в режиме единичного непрерывно функционирующего производства.

Разработана программа на языке C#, которая позволяет имитировать поведение агентов производственной системы. Диаграмма классов показывает выделенные классы и связи между ними с точки зрения наследования.

Класс **Program** — класс, с которого начинается работа приложения. Статистический класс **RandomGenerators** содержит набор методов для генерации случайных чисел в соответствии с различными законами распределения (равномерный закон распределения, закон Гаусса, закон Вейбулла и пр.). Класс **Statistic** — содержит свойства и методы для

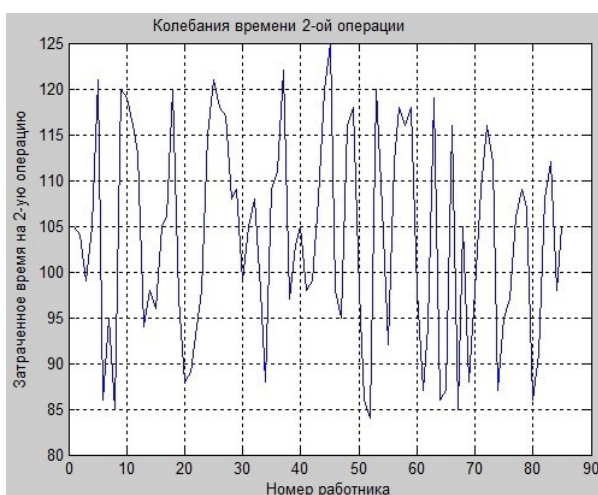


а)

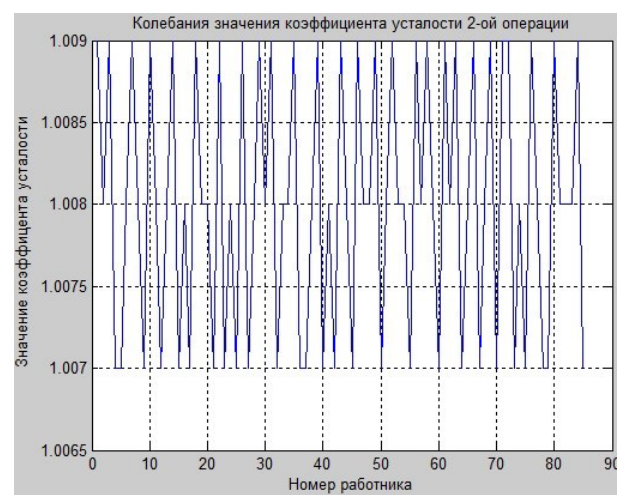


б)

Рис. 1. Время и усталость 1-й операции



а)



б)

Рис. 2. Время и усталость 2-й операции

сбора и обработки статистической информации в процессе имитационного моделирования. Класс **CommonDenial** описывает общую логику обработки организационно-технического отказа. Данный класс наследует следующие классы: **ProductionLine**, **Store**, **WorkPlace**. Класс **ProductionLine** — модель, которая содержит массив продуктов (собираемых изделий) и массив рабочих мест (объектов класса **WorkPlace**). Класс **WorkPlace** — модель рабочего. Каждый рабочий имеет порядковый номер, параметр усталости, модель отказов. Класс **ProductionSet** — класс, имитирующий технологический процесс с разным набором операций, соответствующих спецификации, и временем их выполнения. Класс **ExcelUtilities** содержит утилиты для построения графиков в MS Excel.

Имитационное моделирование работы агентов сборочного цеха выполняется итерационно. У каждого из классов (**AssemblyDepartment**, **Store**, **ProductionLine**, **WorkPlace**), описывающих основные элементы сборочного цеха, есть метод **RunIteration**, который задает логику выполнения одной итерации.

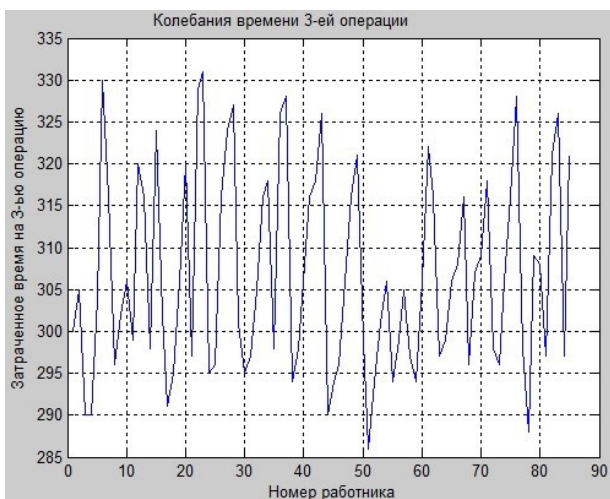
Время итерации для основного класса сборочного цеха **AssemblyDepartment** продолжается в течение времени, заданном в секундах в параметре **timeTotal**, а шаг изменения времени указан в секун-

дах в параметре **timeDelta**. По умолчанию выбраны значения $timeTotal = 8 \cdot 60 \cdot 60 = 28800$ с (одна рабочая смена) и $timeDelta = 1$ с.

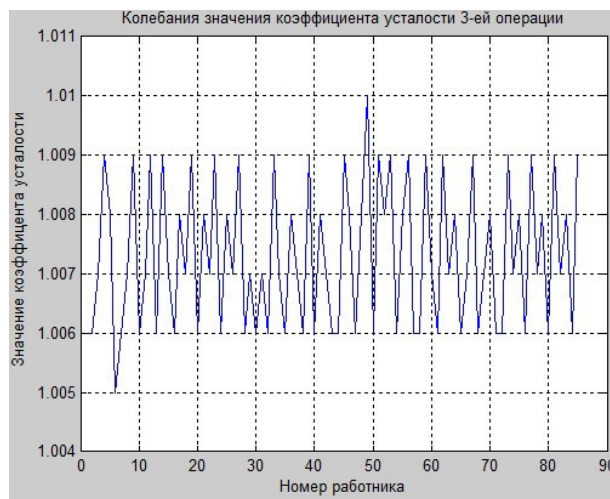
Работа программы начинается с создания экземпляра класса **AssemblyDepartment** и экземпляра класса **Statistic**. Во время создания экземпляра класса **AssemblyDepartment** обнуляются счетчики времени и количества собранных изделий, генерируется новая производственная партия. Во время инициализации создается заданное количество рабочих мест.

После инициализации запускается цикл итераций для экземпляра класса **AssemblyDepartment** посредством вызова метода **RunIteration**. В рассматриваемом примере моделируется 250 итераций, т.е. один год работы сборочного цеха (при условии работы в одну 8-часовую смену — что задается в переменной **timeTotal**). После каждой итерации в экземпляр класса **Statistic** записываются измеряемые параметры остальных объектов модели.

Метод **RunIteration** класса **AssemblyDepartment** представляет собой цикл от нуля до времени, указанного в **timeTotal** с шагом **timeDelta**. Внутри цикла происходит последовательный вызов метода **RunIteration** для объектов **initialStore**, **finalStore** и **productionLine**.

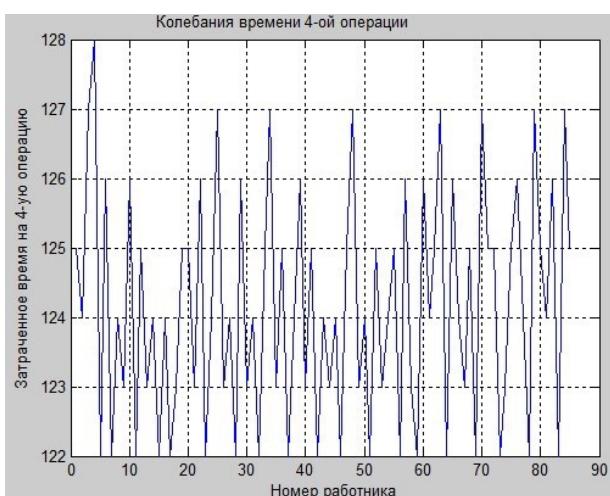


а)

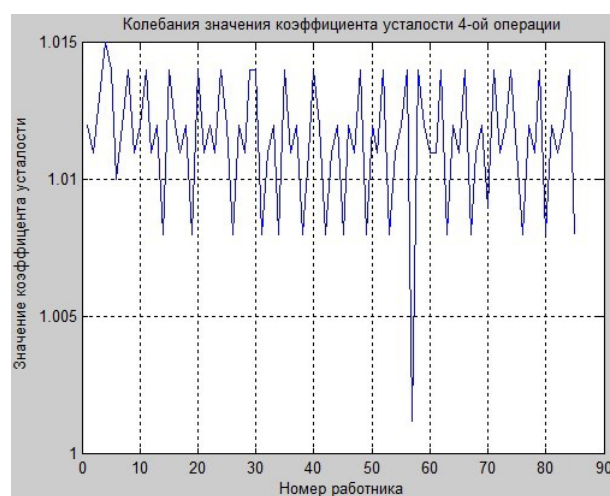


б)

Рис. 3. Время и усталость 3-й операции

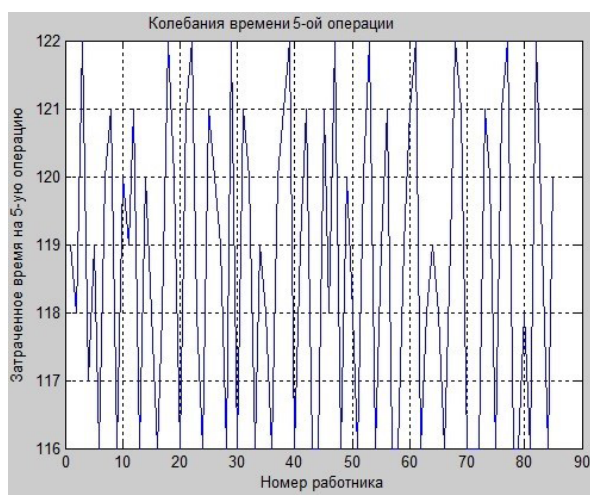


а)

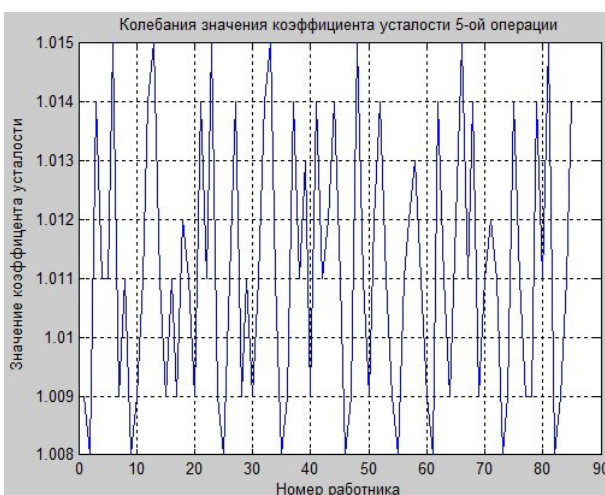


б)

Рис. 4. Время и усталость 4-й операции



а)

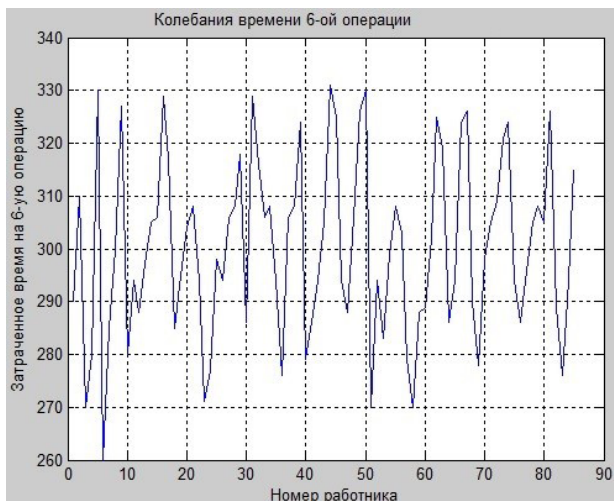


б)

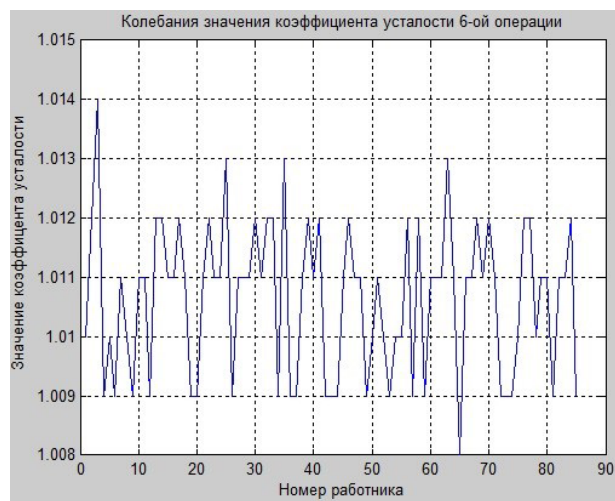
Рис. 5. Время и усталость 5-й операции

3. Исследованные параметры. Проверку работоспособности модели проводили по примеру одного из типовых сборочных процессов — сборки каркаса. Техпроцесс состоял из следующих операций:

1. С каркаса снимаются все стенки и двери;
2. С каркаса снимаются четыре усилительных уголка;
3. В двери сверлится одно отверстие;

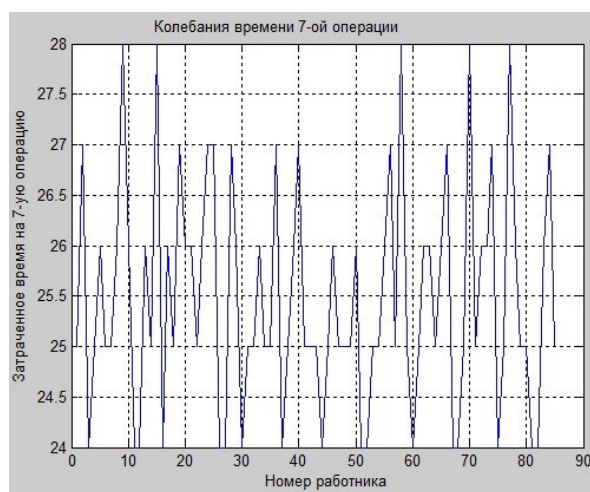


а)

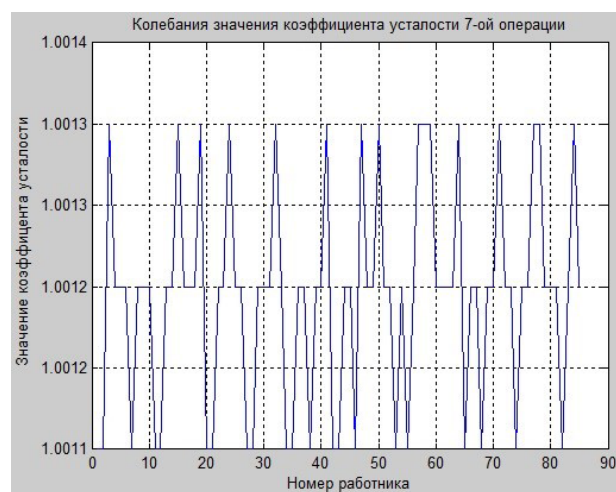


б)

Рис. 6. Время и усталость 6-й операции



а)



б)

Рис. 7. Время и усталость 7-й операции

4. Внутри шкафа устанавливаются 30 деталей / сборок, купленных у предприятия-изготовителя;

5. Устанавливаются три простые детали, изготовленные в цеху корпорации;

6. Устанавливается одна среднесложная сборка, изготовленная в цеху корпорации;

7. Крепление элементов 100 самонарезающих винтов.

Поскольку для уравнения предварительно необходимо было найти параметры затраченного времени и коэффициента усталости, проведено исследование 85 сотрудников и получены графики распределения, показанные на рис. 1–7. Где «а» — время, затраченное на операцию, «б» — коэффициент усталости.

В результате были получены данные, по которым можно провести сравнение об оптимальности применения, при выполнении этапа техпроцесса, конкретного сотрудника. Расчетные значения относительно данных указанного примера показаны на рис. 8.

Данные, полученные в агентной модели и реализованные на C#, совпали с расчетами в средах Matlab Mathworks и Microsoft Excel (расчетом методом подстановки значений напрямую в командную строку в первом случае и с применением встро-

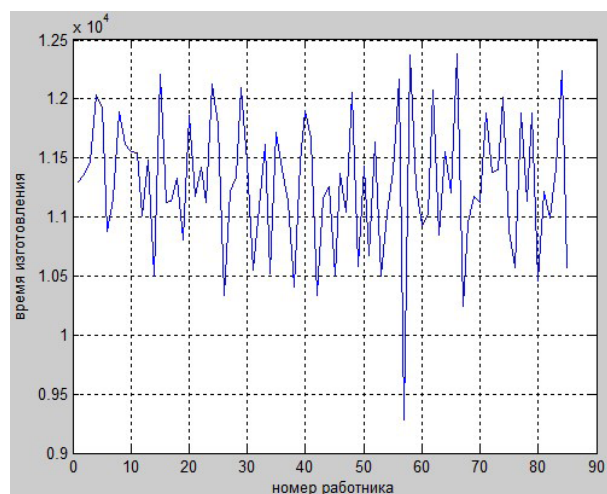


Рис. 8. Время сборочного техпроцесса

енного математического аппарата, работающего со столбцами во втором случае).

Заключение. При моделировании техпроцесса сборки оборудования для АЭС были получены данные, которые совпали с реально затраченным вре-

менем. Сотрудники 12 и 37, в рамках реализации контракта по созданию нового блока для Нововоронежской АЭС, имели отклонения от расчетного значения, не превышающие 8,4 %, причем замедление было вызвано различными нештатными ситуациями, которые изначально не закладывались при моделировании, хотя данный функционал имеется в агентной модели.

Рассматривая результаты, особое внимание стоит уделить «выбросам» входных переменных и их значениям при применении разработанной имитационной модели. Для этого рассмотрим данные по 41-му сотруднику, который справлялся с первой работой наиболее продолжительное время — 905 сек, (на данной операции работник более чем на треть превысил среднее значение времени работы или более чем на 250 сек второго по низкой производительности сотрудника). Причина столь долгого исполнения кроется в возрастном параметре работника — более 80 лет.

Как видно из описания операций, данному работнику было необходимо снять со шкафа достаточно тяжелые панели. В результате анализа по стандартным методикам отмеченного сотрудника следовало бы вывести из технологического процесса и заменить на более производительного, однако это было бы неверным решением. Если рассмотреть рис. 8, который показывает общее время выполнения техпроцесса, можно заметить, что по общей производительности работник превысил даже средние значения времени и показал более чем хороший результат. Стоит также отметить хорошее распределение полученных данных, которое несложно математически посчитать.

С другой стороны, обратимся к 57 сотруднику, который на четвертой операции имел наименьшее значение параметра накопления усталости. В данном случае, рис. 8 показал схождение указанных «всплесков». Объясняется это накопительным эффектом усталости. Кроме того, работник обладал идеальными данными — возраст порядка 30 лет, образование профильное, хорошие показатели чтения конструкторской документации. В результате можно сделать вывод о немалой важности именно параметра усталости и его, зачастую, решающем значении при оценке времени изготовления изделия, которое «усредняющие» подходы опускает.

Тем самым можно сделать вывод, что агентная модель может использоваться не только как средство вычисления общего затраченного времени с целью использования наиболее оптимальных человеческих ресурсов на различных этапах техпроцесса, но и как средство оценки эффективности параметра усталости при решении обратной задачи.

Разработанная модель также может применяться при моделировании техпроцессов на других машиностроительных предприятиях, тем самым авторы подчеркивают ее не узкоспециализированность, хотя и отмечают возможную потребность в дополнительных корректировках входных и возмущающих данных.

Исследования по тематике будут продолжены.

Библиографический список

1. Семенов А. С. Мониторинг и оценка потребления энергетических ресурсов // Экономические и управленческие технологии XXI века: теория и практика, подготовка специалистов: материалы методической и науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 20 ноября 2020 года. Санкт-Петербург:

Санкт-Петербургский гос. ун-т промышленных технологий и дизайна. 2020. С. 98 — 102. ISBN 978-5-91646-192-3.

2. Суслев С. А., Кондратьев М. А., Сергеев К. В. Агентное моделирование как средство анализа и прогноза спроса на энергоресурсы // Проблемы управления. 2010. № 2. С. 46 — 52.

3. Loskutov I. A. Causes for protracted production of equipment for nuclear power plants // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific — practical conference. Prague. 2018. P. 392 — 396.

4. Ansolabehere S. [et al.]. The future of nuclear power. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003. 170 p.

5. Schneider M. [et al.]. World Nuclear Industry Status Report 2014. Paris, London, Washington, 2014. 158 p.

6. Johnston G., Duchag A. The Development of the New Idea Safety Guide for Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants // Reliability: Theory & Applications. 2017. № 1 (44), Vol. 12. P. 57 — 65.

7. Библинская АЭС // АО «Концерн Росэнергоатом». URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-bilibinskoy-aes/ (дата обращения: 07.07.2021).

8. Циглевкина К. Н., Черных Д. О., Ташлыков О. Л. Возможность применения сбросной теплоты АЭС в тепличном хозяйстве // Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров-2016: материалы науч.-практ. конф., Екатеринбург, 11 октября 2016 года. Екатеринбург: Изд-во Уральского федер. ун-та им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2016. С. 176 — 177

9. «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2017 году»: гос. докл. Москва: НИИ-Природа, 2018. 298 с.

10. Пергаменщик Б. К. Проблемы и перспективы строительства АЭС // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 140 — 153.

11. Managing the First Nuclear Power Plant Project // IAEA-TECDOC-1555. Austria, 2007. 108 p.

12. Сулейманова К. Р. Обзор стилей управления, применяемых на предприятии // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. 2015. № 4. С. 143 — 147.

13. Лоскутов И. А. Нормирование сборочно-монтажных работ на предприятиях, разрабатывающих радиоэлектронное оборудование для АЭС // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46, № 2. С. 89 — 97. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-89-97.

14. Trentelman H. L., Stoorvogel A. A., Malo H. Control theory for linear systems. Berlin: Springer, 2001. 389 p.

15. Sontag E. D. Mathematical Control Theory. Deterministic Finite Dimensional Systems. Second Edition. New York: Springer, 1998. 530 p.

16. Leigh J. R. Control theory. Second edition. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 303 p.

ЛОСКУТОВ Иван Андреевич, инженер-конструктор АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А. Г. Иосифьяна», г. Москва; преподаватель политехнического колледжа им. Н. Н. Годовикова, г. Москва; магистрант гр. М21-506 10.04.01 Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва.

AuthorID (РИНЦ): 1648-9871

Адрес для переписки: faxvex@ya.ru

СКВОРЦОВА Дарья Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная логистика» Московского государственного технического

университета имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва.

AuthorID (РИНЦ): 897545

Адрес для переписки: darya_skv@mail.ru

ИСКАНДАРОВА Венера Геннадьевна, инженер по организации и нормированию труда АО «Московский машиностроительный завод "Авангард"», г. Москва; аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», г. Москва.

Адрес для переписки: veneramilachka@gmail.com

Для цитирования

Лоскутов И. А., Скворцова Д. А., Искандарова В. Г. Динамическое нормирование с использованием метода агентного моделирования процесса сборки оборудования для атомных электростанций // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 46–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-46-52.

Статья поступила в редакцию 25.05.2022 г.

© И. А. Лоскутов, Д. А. Скворцова,

В. Г. Искандарова

¹АО «Научно-производственная корпорация
«Космические системы мониторинга,
информационно-управляющие
и электромеханические комплексы
имени А. Г. Иосифьяна»,
г. Москва

³АО «Московский
машиностроительный завод «Авангард»,
г. Москва

ЭКОСИСТЕМНЫЙ КОНТРОЛЛИНГ КАК РЕШЕНИЕ СЛОЖНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Статья посвящена исследованию экосистемного контроллинга и содержит три структурных раздела. Исследование носит обзорный характер, направлено на популяризацию экосистемных подходов в отечественной промышленности. Основные методы научного исследования — систематизация и анализ. Во введении приводятся доказательства потребности в поисках новых решений по оптимизации и усовершенствованию современной отечественной промышленности. В первом разделе проводится анализ определений, связанных с экосистемой. Она рассматривается с классической (биологической) точки зрения и с точки зрения применения в промышленности. Приводится доказательная база оправданности такого подхода. Второй раздел посвящен проблемам, присутствующим в промышленных экосистемах. Производится перечисление наиболее значимых особенностей, вызванных непониманием персоналом новых подходов, и аргументируется неоправданность устаревших способов организации производства, применяемых повсеместно. Одновременно в разделе акцентируется внимание на значении управленца, который отвечает за функционирование подразделений, и указываются потребные для него характеристики. В третьем разделе показывается значимость экосистемного контроллинга как способа решения описанных проблем. В качестве доказательств приводится его разбиение на две явные составляющие — техническую и человеческую. Отмечается направление интернета вещей как составной части промышленной экосистемы. В качестве решения человеческой составляющей приводится пример реализации для мало меняющихся систем и даются рекомендации для систем иного характера. В заключение приводятся подтверждающие факты правильности сделанных выводов.

Ключевые слова: экосистема, предприятие, промышленность, контроллинг, проблемы, организация производства.

Введение. Современные промышленные предприятия вслед за обществом становятся частью цифрового сообщества, применяются концепции интернета вещей [1]. Все более значимой становится тенденция мировой технологической индустрии, связанная с необходимостью в обеспечении бесперебойного функционирования заводов, выполнения заказов в кратчайшие сроки с высоким качеством и использованием современных технологий. Однако в данный момент времени замечено повсеместное технологическое отставание отечественных производств, особенно машиностроительных предприятий [2].

Именно поэтому необходимо искать новые управленческие решения, создавать методики по модернизации отраслей, учитывающих все особенности внутренних взаимоотношений.

Экосистема в промышленности. Внутренние взаимоотношения и проблемы, связанные с ними, поднимаются в научной среде уже достаточно давно.

Несложно проследить, как с момента создания менеджмента, теории управления и других родственных контроллинговых наук предлагались всевозможные способы совершенствования рабочих процессов, однако многие из ныне применяющихся

уже или устарели, или же не учитывают всю многофакторную картину.

Однако в XXI веке, по мнению автора, все-таки было найдено решение, и его называют экосистемным контроллингом [3]. И неудивительно, что на данное научное ответвление сразу обратили внимание многие молодые ученые.

В целом, если рассмотреть определение экосистемы, то необходимо вспомнить английского ботаника А. Г. Тенсли. Он определил экосистему как «совокупность живых организмов и среды их обитания, в рамках которой осуществляется круговорот веществ и преобразование потока энергии» [4]. Безусловно, данное определение направлено на описание биологических процессов, однако почему нельзя его использовать при описании современного предприятия? Неужели процессы автоматизации и постепенной замены человеческого труда будут противоречить данному положению? Эти и подобные вопросы постоянно возникают при первом рассмотрении определения, однако все не так просто.

Вспомним такого великого ученого, как Н. А. Бердяев. Он еще в начале XX века в своей работе [5] сказал: «Совершенно ошибочно было бы отнести машину к неорганическому миру на том основании, что для ее организации пользуются элементами неорганических тел, взятых из механико-физико-химической действительности».

Действительно, в настоящее время биологический аналог должен постепенно переходить от случайных наборов систем к всеобъемлющей системе, включая основной вид жизнедеятельности человеческой цивилизации — основы производственных отношений.

Но не стоит ограничиваться только одним определением. Следует показать, что происходит на современном промышленном предприятии. А процессы там следующие. Явный переход на экономические рельсы, направление на принятие и модернизацию имеющихся оборудований, проектирование, изготовление и внедрение в производство машин, использующих минимальные виды энергии привода: механические, электрические, пневматические, гидравлические, пневмогидравлические, импульсные и т.п.

То есть происходит повышение комфортности рабочей среды, в том числе экологической. И не даром в данном контексте акцентировалось внимание на экологии, ведь именно этот параметр олицетворяет производство в классическом понимании, а точнее, его пагубное воздействие. И если убрать данную характеристику или максимально минимизировать, — не будет ли это подобие той самой экосистемы, описанной А. Г. Тенсли? Авторы отвечают положительно.

В качестве доказательства проанализируем одно из наиболее точно подмеченных определений, описывающих промышленную экосистему. Так, в соответствии с работой [6], — это системы, созданные с целью минимизации финансовых затрат на функционирование всевозможных элементов производства, образования наиболее благоприятных условий для внутреннего взаимодействия между непосредственными участниками и затрагивающими ее бизнес-процессами. Причем последние не только находятся внутри промышленной экосистемы, но и извне. Данное описание полностью соответствует сформированному ранее воззрению и никак не противоречит ей.

В целом не стоит далее углубляться в основы промышленной экосистемы, поскольку они уже хорошо описаны [7], однако на проблемах, связанных с их реализацией на предприятиях, стоит остановиться подробнее.

Проблемы контроллинга промышленных экосистем. Создание новых экосистем в подразделениях промышленных предприятий весьма проблематично. Безусловно, можно заметить, что само по себе начало работы в некотором направлении задаст ее базис, однако будет ли он правильным и оптимальным? Скорее всего, нет. Причина кроется в потенциальных технологических процессах, а именно в их огромном разнообразии [8]. Действительно, изготовление даже простейших изделий может варьироваться в зависимости от оборудования. Стоит ли говорить о компоновке помещений, личностных качествах сотрудников?..

Все это требует от управленцев наличия как минимум теоретического опыта по наладке систем взаимодействия и зачастую просто опускается вследствие своей проблематичности.

Куда сложнее обстоят дела на предприятиях, существующих более 20 лет. В целом, применение механизации, автоматизации и цифровизации участков предусматривает огромный пласт работ, а в случае наличия старого коллектива к ним прибавляется реформирование устоявшихся норм.

В качестве примера можно привести реальные процессы модернизации кузнечно-прессовых цехов. Так, в работе [9] была показана схема его перевооружения. За счет покупки нового оборудования на производстве решались сразу несколько задач:

- экологичность;
- уменьшение уровня шума;
- уменьшение вибраций;
- и т.д.

Концепция подразумевала отказ от использования в производстве старого оборудования, не обеспечивающего современные требования как по экологии, так и по скоростным/затратным характеристикам, что казалось хорошей идеей. Однако предприятие уже при проектировании столкнулось с проблемой непонимания персонала и выявления кадровой безграмотности. Т.е. перед производством встали новые сложные вопросы, решение которых «нужно уже сегодня».

Тем самым может сложиться неверное впечатление о рациональности применения уже проверенных годами решений как минимум по причине известности скорости решения указанной проблемы, однако это будет неверный подход.

Показанный пример, к сожалению, не является уникальным. Подобного рода вопросы встают в большинстве существующих компаний. Причина отмеченных проблем кроется не в наличии слишком сложной задачи, а в присутствии низкоквалифицированных руководителей. Небезызвестный факт, что на отечественных производствах большинство руководителей — «люди с места», специалисты, прошедшие долгий путь от инженера до руководителя группы и далее. Они знают, как функционирует производство на опыте, имеют «соответствующие компетенции» и не стремятся вносить в него изменения. Однако что такое компетенция? Почему именно на данную черту обращают внимание в отечественном машиностроении?

Стоит сравнить данный термин с другим близким родственным — компетентностью. Безусловно, на первый взгляд, кажется, что это однокоренные

слова, а следовательно, они несут в себе одинаковый смысл. Но это совсем не так. Авторы полностью согласны с мнением профессора Лукашенко М. А. [10] о разнородности их значений.

В работе знания играют, несомненно, важную роль, но они имеют свойство устаревать. Уже много издано научных работ, которые из года в год повторяют всем известную истину — знания, полученные индивидуумом на стадии образования, несовершенны и зачастую теряют свою актуальность к моменту выхода студента-выпускника из вуза [11]. Что говорить про специалиста, который работает много лет на одном месте, пользуется оборудованием конкретного типа и практически не имеет возможности развиваться. Другое дело компетентность, т.е. умение, вот оно уже играет совсем иную роль. Человек с данной чертой способен усовершенствовать и производить новое, он творец. Именно эти черты нужны руководителю, и это именно то, чего отечественным предприятиям не хватает.

Но описать проблему — это одно, другое дело — показать, как ее решить. Докажем же, почему именно применение экосистемного контроллинга способно оказать влияние на управленческие подходы и повысить качество менеджмента на производствах.

Экосистемный контроллинг как решение имеющихся производственных проблем. Описание критических моментов машиностроения выявляет ряд проблем, решение которых, как уже было отмечено, требует большого комплекса работ. Экосистемный контроллинг с момента своего появления изначально предназначался для этого. Но вот способен ли он на современном этапе выполнить свои первоначальные функции? Авторы отвечают утвердительно.

Причинами такой уверенности кроется в самой организации работ по направлению. В данном случае практически всегда проводится автоматизация процессов. Т.е. происходит сокращение персонала, который, в свою очередь, уменьшает количество сложно моделируемых систем [12].

Стоит обратить внимание, что автоматизация по принципам САУ носит достаточно глубокий характер, учитывающий огромное количество внешних переменных, влияющих на саму систему, с целью получения конечного значения. В данном случае это будет как тривиальное время изготовления, так и сами процессы, в том числе экологического характера.

Экосистемный контроллинг по своей сути пытается на базе замкнутых контуров реализовать новый подход к управлению, расширяя и дополняя его, т.е. он использует как процесс сокращения, принятый в САУ, так и расширения, дополняя систему новыми внешними контурами. Т.е. происходит своего рода критериальная балансировка.

Особенно интересно рассмотреть немаловажную часть промышленной экосистемы — интернет вещей. Данное направление хоть и развивается параллельно рассматриваемому, но последствия его научных изысканий для промышленной экосистемы нельзя переоценить. Небезызвестный факт, что интернет вещей подразумевает наличие комплекса взаимосвязанных датчиков, которые считывают показания происходящих процессов и в центре управления проводится анализ поведенческих подходов. Данная система по своей сути работает с техническими средствами, участвующими в функционировании промышленной экосистемы.

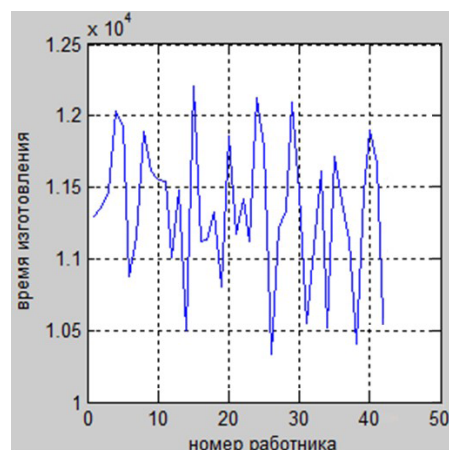


Рис. 1. Время, затраченное сотрудниками на сборку

Однако, как известно, именно люди являются самой ее проблемной частью. Интернет вещей частично пересекается и с ней. Для этого используются технические средства, имеющиеся в наличии у персонала, тем самым проводится анализ поведенческих запросов и строится модель поведения.

Существует и иной путь описания человека, более точный, — исследование поведенческих характеристик на основании расчетной аналитики и построения имитационной модели. Такой подход применим к производствам с малым изменением персонала и к известной номенклатуре изготавливаемых изделий.

У одного из авторов данной работы, Лоскутова И. А., уже сделаны попытки по реализации указанного подхода применительно к сборочно-монтажным и упаковочным технологическим процессам изготовления оборудования для системы защиты и управления АЭС. Т.к. производство штучное и мелкосерийное, а количество изделий варьируется в районе 100 единиц [13], оно полностью соответствует описанным выше закономерностям.

В качестве примера рассмотрим работу [14], поскольку она интуитивно понятная, что является залогом успеха. В ней разработана модель на уже упомянутых правилах САУ, т.е. используется система «вход-выход» [15], однако применяется она не к механистическому миру, а к живым существам. В ее базис закладываются параметрические особенности характеристик персонала, немаловажную роль среди которых занимает усталость. Данные, вводимые по каждому работнику, анализируются за достаточно продолжительное время (минимально месяц, оптимально год). Расчет, соответственно, ведется на основании математической комбинации базиса задания и базиса характеристик работников. Конечный итог выглядит аналогично показанному на рис. 1.

По полученным зависимостям руководитель выбирает оптимального по временным затратам подчиненного для выполнения рассмотренной работы.

Соответственно, суммарное объединение указанного подхода и интернета вещей позволяет сформировать должного уровня промышленную экосистему.

Однако как же быть в остальных случаях? Ответ на это достаточно сложен. Безусловно, можно применять классические методы усреднения, как, например, показанные в [16], однако они давно

уже показали низкую эффективность. Куда рациональнее использовать передовые схемы, показанные, например, в [17] и иных научных изысканиях или уже ставшие классическими экспертные методы [18], применять рационализационные подходы, как показанные в работе [19], внедрять передовые технологии бережливого производства [20] и т.п. То есть задача создания хорошей промышленной экосистемы будет сводиться к поиску оптимального пути решения человеческой составляющей.

Совокупное объединение технического и людского функционала, построение и связывание их воедино, — именно этим занимается область экосистемного контроллинга и именно это самое сложное при создании промышленной экосистемы, функционирующей на должном уровне.

Заключение. Таким образом, подытожив, можно сказать, что внедрение экосистемного контроллинга и наем специалистов, которые знают и понимают, как должно видоизменяться производство, применение подходов, рассматривающих элементную базу заводских комплексов не как чисто организационно-техническое объединение, а как живой организм, позволит выйти на новый уровень развития.

Экосистемный контроллинг зарекомендовал себя как хороший инструмент регулирования производственных отношений. Верная комбинация внутренних элементов производственной экосистемы позволяет добиться отличных результатов. А с учетом наличия доказательной базы преимуществ, показанных в работах [21, 22], отмеченные доводы не вызывают сомнений.

Постепенный переход отечественных производств на экосистемный контроллинг позволит в дальнейшем обеспечить благополучие промышленной отрасли в целом.

Библиографический список

- Shroff F., Ordieres-Meré J. and Miragliotta G. Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm // IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Bandar Sunway, 2014. P. 697–701.
- Водомеров Н. К. Преодоление технологического отставания России и цифровая экономика // Теоретическая экономика. 2019. № 3 (51). С. 70–73.
- Шкарупета Е. В., Гамидуллаева Л. А., Тарасов А. В. Концептуальные положения цифровой трансформации промышленных экосистем // Цифровизация экономических систем: теория и практика. Санкт-Петербург: Политех-Пресс. 2020. С. 136–154.
- Коробкин В. И., Передельский Л. В. Экология. Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. 576 с.
- Бердяев Н. А. Человек и машина. (Проблемы социологии и метафизики техники) // Путь. 1933. № 38. С. 3–38.
- Клейнер Г. Б. Промышленные экосистемы: взгляд в будущее // Экономическое возрождение России. 2018. № 2 (56). С. 53–62.
- Шкарупета Е. В., Дударева О. В., Филатова М. В., Беккиев А. Ю. Методология устойчивого развития промышленных экосистем // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82, № 4 (86). С. 377–382.
- Базров Б. М. Модульная технология — перспективное направление повышения эффективности машиностроительного производства // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 5. С. 48–61.
- Искандарова В. Г. Комплексный подход к процессам роботизации-механизации производственных участков // Журнал естественнонаучных исследований. 2020. Т. 5, № 1. С. 66–69.
- Лукашенко М. А. Профессиональные компетенции руководителя как фактор конкурентоспособности компании // Современная конкуренция. 2009. № 6. С. 96–105.
- Петрова Е. В. Информационная компетентность в образовании как залог успешной адаптации человека в информационном обществе // Информационное общество. 2012. № 2. С. 37–43.
- Козлова Е. П., Кузнецова С. Н., Назаркина Е. С., Уткин В. Е. Аспекты эффективного управления системой промышленного производства на основе процесса автоматизации // Московский экономический журнал. 2020. № 11. С. 476–484. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10762
- Геча В. Я., Лаврухин О. Н., Мещихин И. А. Исследование методов контроля качества обжимных соединений при производстве аппаратуры комплекса электрооборудования системы управления и защиты атомных электростанций // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 135, № 4. С. 31–38.
- Лоскутов И. А. Нормирование сборочного техпроцесса каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС методом моделирования // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. Т. 48, № 3. С. 73–82. DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-73-82.
- Trentelman H. L., Stoorvogel A. A., Malo H. Control theory for linear systems. Berlin, Springer, 2001. 389 p.
- Мамуров Э. Т., Косимова З. М., Гильванов Р. Р. Использование программ для расчетов основного технологического времени // Scientific Progress. 2021. № 1. С. 918–923.
- Беляева Т. П., Затворницкий А. П. Модель оптимального планирования проектов создания изделий микроэлектроники проектов // Программные продукты и системы. 2011. № 2. С. 61–64.
- Ирзаев Г. Х. Экспертные методы управления технологичностью промышленных изделий. Москва: Инфра-Инженерия, 2010. 192 с.
- Лукин А. А., Лукина С. В. Повышение эффективности управления процессами технического перевооружения на машиностроительных предприятиях на основе мобилизации кадрового потенциала // За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества: сб. науч. ст. 2-й Всерос. молодеж. науч. конф. В 4-х т. / Отв. редактор А. А. Горохов. Курск: Изд-во Юго-Западного гос. ун-та, 2021. С. 247–251.
- Батюкова Л. Е., Лукина С. В. Прогрессивные технологии в машиностроении // Молодежь и наука: шаг к успеху: сб. науч. ст. 4-й Всерос. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых, Курск, 19–20 марта 2020 года. Курск: Изд-во Юго-Западного гос. ун-та, 2020. С. 38–41.
- Толстых Т. О., Шкарупета Е. В., Гамидуллаева Л. А. Подходы к проектированию инновационной экосистемы в условиях цифровизации социально-экономических систем // Формирование цифровой экономики и промышленности: новые вызовы. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского политехнического ун-та Петра Великого, 2018. С. 117–135.
- Евсеева М. В., Стариков Е. Н., Воронов М. П. Уровень технологического развития индустриальных регионов: экосистемный подход // Управленец. 2021. Т. 12, № 3. С. 13–30. DOI: 10.29141/2218-5003-2021-12-3-2.

ЛОСКУТОВ Иван Андреевич, инженер-конструктор АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А. Г. Иосифьяна», г. Москва; преподаватель политехнического колледжа им. Н. Н. Годовикова, г. Москва; магистрант гр. М21-506 10.04.01 Нацио-

нального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва.

AuthorID (РИНЦ): 1648-9871

Адрес для переписки: faxvex@ya.ru

ИСКАНДАРОВА Венера Геннадьевна, инженер по организации и нормированию труда АО «Московский машиностроительный завод «Авангард», г. Москва; аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», г. Москва.

Адрес для переписки: veneramilachka@gmail.com

Для цитирования

Лоскутов И. А., Искандарова В. Г. Экосистемный контроль как решение сложной задачи оптимизации технологического процесса промышленного производства // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 53–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-53-57.

Статья поступила в редакцию 04.05.2022 г.

© И. А. Лоскутов, В. Г. Искандарова



ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.548
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-58-64

А. А. БЕЛЬСКИЙ
А. И. ЗАМЯТИН

Санкт-Петербургский
горный университет,
г. Санкт-Петербург

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Использование ветроэлектрических установок стремительно растет, несмотря на продолжающийся рост добычи традиционных ископаемых ресурсов. В данной работе проведен анализ энергетических характеристик реальных моделей ветроэлектрических установок и распространенных среди научного сообщества полиномов, описывающих зависимость выходной мощности ветроэлектрических установок от ветра. В статье рассматриваются 82 модели ветроэлектрических установок с горизонтальной осью вращения, номинальной мощностью до 100 кВт и способом ограничения частоты вращения в рабочем режиме *pitch control*. Был проведен расчет потенциальной генерации каждой ветроэлектрической установки на нефтегазовом месторождении за период двадцать лет с интервалом в один час, рассчитан коэффициент использования установленной мощности, после чего значения сравнивались с результатами расчетов по полиномам других авторов. Полученные результаты могут быть широко применены при моделировании режимов работы ветроэлектрических электростанций и позволят повысить точность технико-экономических обоснований реализации автономных систем электроснабжения.

Ключевые слова: энергетическая характеристика, ветроэлектрическая установка, автономный электротехнический комплекс, ВЭУ.

Введение. На сегодняшний момент наблюдается ежегодное увеличение установленной мощности всех видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и количества вырабатываемой ими электроэнергии [1]. Ветроэнергетика имеет значительные темпы развития — установленная мощность ветряных электростанций за 10-летний период увеличилась в 3 раза. При этом возобновляемые источники энергии получили широкое распространение в Арктическом регионе, так как данное решение существенно сокращает расходы на ископаемое топливо и отличается отсутствием выбросов вредных веществ в атмосферу [2–4].

Более 60 % территории России имеет децентрализованное электроснабжение или не электрифици-

ровано (рис. 1). Объекты в таких регионах имеют проблемы с качеством электроэнергии и с системами резервирования [6–8].

Нефтегазовый сектор является одним из ключевых для нашей страны [9], при этом необходимо отметить, что основные запасы нефти и газа расположены на Крайнем Севере нашей страны, разработка таких месторождений по большей части осложнена неблагоприятными климатическими условиями и большой удалённостью объектов нефтепромысла от существующей инфраструктуры, такой как транспортные магистрали и электрические сети. При этом на данной территории имеется ветропотенциал для развития ветроэнергетики и использования её в качестве основного энергетического

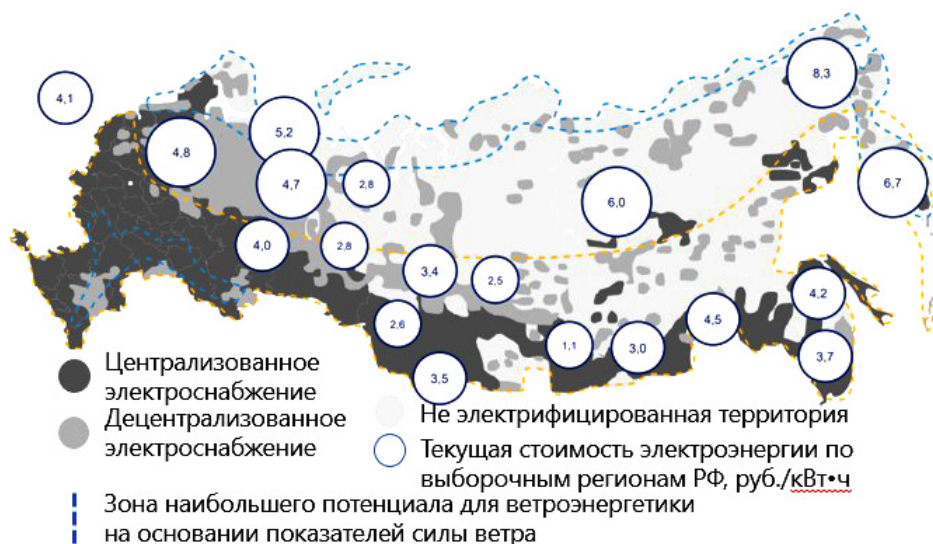


Рис. 1. Карта России с тремя видами территории электроснабжения и стоимостью электроэнергии по выборочным регионам [5]

ресурса для снабжения объектов нефтегазового сектора.

Поддержание объемов добычи нефти в России становится все более сложной задачей главным образом в связи с ростом трудноизвлекаемых запасов, а также ухудшением качественных характеристик нефти, в первую очередь на зрелых месторождениях. Увеличение коэффициента извлечения нефти, который по основным месторождениям России за последние три года не превышает 28–30 % [10], возможно различными способами, в том числе и за счет вовлечения в работу ранее остановленных эксплуатационных скважин. В России существует объективный тренд ухудшения условий добычи нефти. За 2007–2017 годы рост добычи нефти на 13 % сопровождался увеличением числа вводимых скважин на 37 %, а объемов эксплуатационного бурения — на 79 % [11], что является крайне затратным способом эксплуатации. При этом все большее значение будет иметь ввод в эксплуатацию новых месторождений, включая малые месторождения с запасами менее 1 млн тонн, доля которых составляет до 12 % от общего запаса нефти [12].

Темой организации и оптимизации электротехнического комплекса на основе возобновляемой энергии занимались как зарубежные исследователи, так и отечественные [13–15].

Для определения оптимального состава электротехнического комплекса (ЭТК) используются различные критерии. Показатели этих критериев можно разделить на четыре категории, а именно: экономические, надежность, экологические и социальные. Экономическая оценка является основным фактором при определении желательных минимальных начальных, эксплуатационных и любых других будущих затрат на ЭТК [16]. Категория надежности оценивает способность гибридной системы обеспечивать совместную работу генерирующих установок для удовлетворения спроса на нагрузку [17]. Экологический критерий оценивает количество CO_2 и других вредных выбросов, производимых системой в течение заданного периода времени. Социальный критерий оценивает способность ЭТК производить энергию для увеличения индекса человеческого развития (HDI). Кроме того, он оценивает социальное признание установки ги-

бридной системы и создания рабочих мест [18]. Однако одним из ключевых критериев является выработанная электроэнергия. Разные авторы по-своему описывают возможную генерацию электроэнергии от ветроэлектрической установки. Распространенный в научном сообществе вариант, представленный в виде полинома (далее формула № 1):

$$P_w(t) = \begin{cases} 0 & v(t) \leq v_{ci} \text{ или } v(t) \geq v_{co} \\ P_r \left(\frac{v^3(t) - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} \right) & v_{ci} < v(t) < v_r \\ P_r & v_r < v(t) < v_{co} \end{cases}, \quad (1)$$

где P_r — номинальная мощность ветроэлектрической установки (ВЭУ); $v(t)$ — фактическая скорость ветра на высоте мачты, м/с; v_{ci} — начальная скорость ветра (включение ВЭУ), м/с; v_{co} — предельная скорость ветра (отключение ВЭУ), м/с; v_r — номинальная скорость ветра, м/с.

Впервые данный полином был представлен авторами Borowy B. S. и Salameh Z. M. в 1996 году [19], после чего он начал активно применяться в других научных работах [20–22].

Альтернативный метод расчёта был предложен Бельским А. А. [23]. В своих работах для расчета выработываемой электрической энергии ВЭУ автором был выведен полином для описания энергетической характеристики при базовой номинальной скорости ветра, равной 10,65 м/с, и минимальной скорости 3 м/с для ВЭУ способом ограничения частоты вращения ветроколеса — поворот лопасти (Pitch control), и имеет вид:

$$P^*(V) = \begin{cases} P^{**}(V) = -0,001V^3 + 0,027V^2 - \\ -0,095V + 0,078, & \text{при } V_{\min}^6 \leq V \leq V_{\text{расч}}^6 \\ P^{**}(V) = 1, & \text{при } V_{\text{расч}}^6 < V \leq V_{\max}^6 \end{cases},$$

где $P^*(V)$ — энергетическая характеристика ВЭУ в о.е. при скоростях ветра, не превышающих расчетного (номинального) значения; $P^{**}(V)$ — энергетическая характеристика ВЭУ в о.е. при скоростях ветра свыше расчетного (номинального) значения; V — текущая скорость ветра, м/с; V_{\min}^6 , $V_{\text{расч}}^6$, V_{\max}^6 — минимальная, расчетная и максимальная

Распределение моделей ветроэлектрических установок
из базы данных по номинальной скорости ветра

	Номинальная скорость ветра, м/с				
	8	9	10	11	12
Кол-во моделей	18	20	20	16	8
Кол-во производителей	8	10	14	12	7
Кол-во стран производителей	6	8	9	7	6

базовые скорости, полученные в результате построения среднестатистической энергетической характеристики.

После чего в полином (далее формула № 2) вводится коэффициент для расчета с другими номинальными скоростями ветра:

$$P^*(V) = \begin{cases} P^{**}(V) \cdot (V_{\text{расч}}^6 / V_{\text{расч}}^6)^{3/2}, & \text{при } V_{\text{мин}} \leq V \leq V_{\text{расч}} \\ 1, & \text{при } V_{\text{расч}} < V \leq V_{\text{макс}} \end{cases} \quad (2)$$

Для того чтобы проверить, какое будет расхождение представленных выражений, необходимо провести расчеты на потенциальных к установке ВЭС местах для электроснабжения промышленного потребителя. В работе для сравнения результатов расчетов по формуле № 1 и формуле № 2 были взяты энергетические характеристики реальных моделей, которые зарегистрированы в базе данных ветроэлектрических установок с горизонтальной осью вращения мощностью от 1 до 100 кВт [24].

База данных содержит в себе данные по 417 моделям более чем 20 характеристик: модель, производитель, страна, мощность, номинальная скорость ветра, начальная скорость ветра, радиус лопастей, кол-во лопастей, способ ограничения частоты вращения в рабочем и аварийном режиме, наличие мультипликатора, энергетическая характеристика и др.

Большинство моделей ВЭУ, использующих технологию ограничения частоты вращения в рабочем режиме pitch control, имеют стабильную выдаваемую мощность, равную номинальной, при скоростях ветра более номинального, поэтому для наглядности результатов в данной работе будут рассматриваться модели только с технологией поворота лопасти и взят полином Бельского А. А. для ВЭУ с pitch control.

Целью работы является сравнение энергетических характеристик реальных моделей ВЭУ с формулами № 1 и № 2, описывающих выходную мощность ВЭУ от скорости ветра, произвести расчет возможной генерации на конкретном объекте в России и оценить расхождение результатов формулы № 1 и формулы № 2 с результатами реальных моделей.

Методология и материалы. Для анализа энергетических характеристик был выбран объект — Сихорейское нефтяное месторождение (Ненецкий автономный округ, Заполярный район, координаты 67.750556 58.000556, 80 км до ЕЭС, разведано, неэлектрифицировано).

Данный объект выбран из-за своего удаленного местонахождения от ближайших высоковольтных подстанций единой энергетической системы.

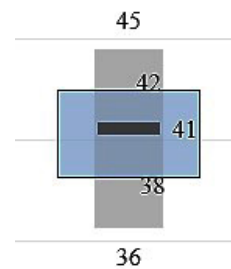


Рис. 2. Пример прямоугольника графика выходной мощности ВЭУ при определенной скорости ветра

Взяты данные по скорости ветра с месторождения с интервалом 1 час за 20 лет на высоте 50 м от уровня земли по данным NASA [25].

Результаты. Для сравнения выработанной энергии различными методологиями и анализа энергетических характеристик расчет велся для ВЭУ с номинальными скоростями ветра 8, 9, 10, 11 и 12 м/с. Для всех расчетов начальная скорость ветра была принята 3 м/с, максимально рабочая скорость — 25 м/с.

База данных содержит в себе 247 моделей ВЭУ мощностью до 100 кВт с горизонтальной осью вращения с энергетической характеристикой. Из них 82 модели, которые используют как основную технологию способа ограничения частоты вращения в рабочем режиме pitch control (табл. 1).

Результаты исследования представлены в виде коробчатых графиков, используемых в описательной статистике [26, 27]. Графики показывают сводку из пяти чисел набора данных: включая минимальное значение, первый (нижний) квартиль, медиану, третий (верхний) квартиль и максимальное значение. Если число элементов в выборке нечетное, то медианой будет число в середине вариационного ряда; если число элементов в выборке четное, то медианой будет среднее арифметическое двух центральных элементов вариационного ряда. Межквартильный диапазон (IQR) — это график, показывающий средние 50 % значений (т. е. диапазон между 25-м и 75-м процентилями). Пример показан на рис. 2.

В результате сравнения энергетических характеристик 82 моделей были построены пять графиков, отражающих выходную мощность ВЭУ в относительных единицах при определенном значении скорости ветра с шагом 1 м/с, для номинальных скоростей 8–12 м/с, на которых отмечены энерге-

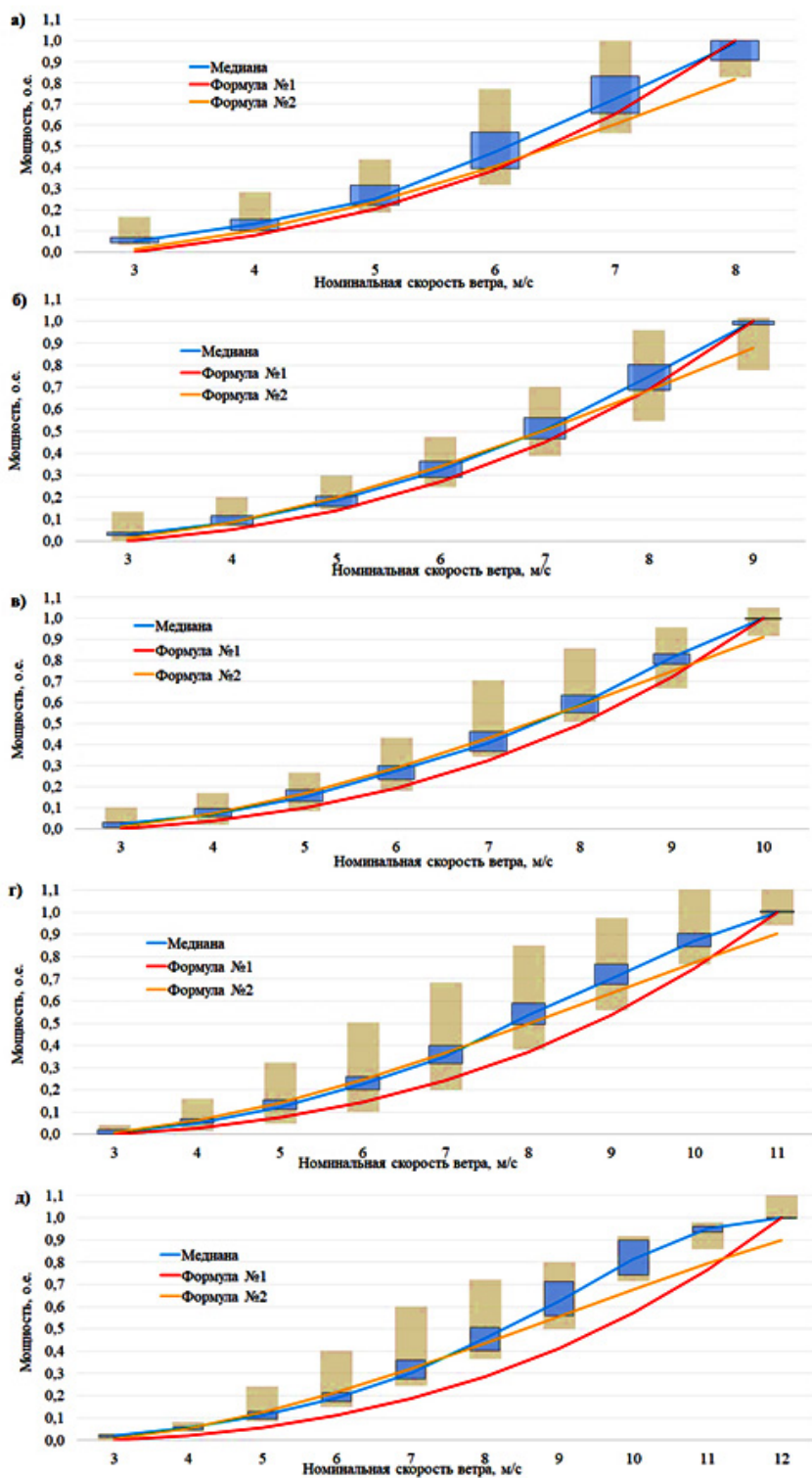


Рис. 3. Графики энергетических характеристик при различных номинальных скоростях ветра: а) 8 м/с; б) 9 м/с; в) 10 м/с; г) 11 м/с; д) 12 м/с

тические характеристики формулы № 1 и формулы № 2 (рис. 3).

Из представленных графиков видно довольно серьезное расхождение энергетических характеристик реальных моделей с формулой № 1 и формулой № 2. Выходная мощность ВЭУ по формуле № 1 в основном находится на уровне минимальных значений реальных ВЭУ, в то же время при номинальной скорости 12 м/с характеристика полностью выходит за диапазон выходной мощности всех ВЭУ. У формулы № 2 выход за пределы межквартиль-

ного диапазона выходной мощности реальных ВЭУ наблюдается только при скоростях ветра, близких к номинальному значению, при этом в точке, где ВЭУ должна выходить на номинальную мощность, значение меньше на 10–20 %.

Для расчета генерации электроэнергии на объекте были построены универсальные энергетические характеристики по медианному значению для номинальных скоростей от 8 до 12 м/с (рис. 4). Полиномиальная функция представлена в виде (табл. 2):

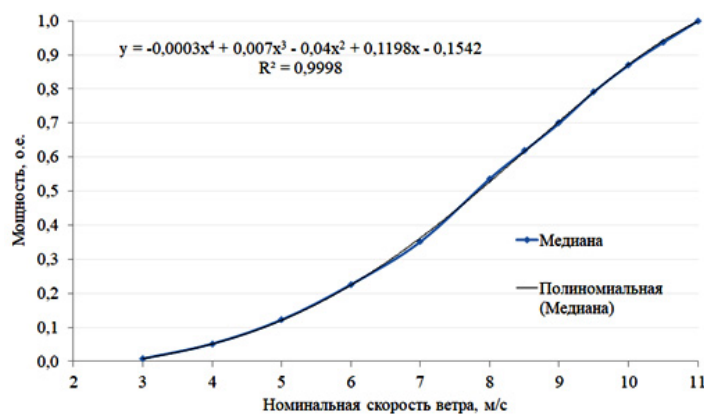


Рис. 4. Пример графика универсальной энергетической характеристики для номинальной скорости ветра 11 м/с

Таблица 2

Значения коэффициентов полиномиальных функций для разных номинальных скоростей ветра

Номинальная скорость ветра	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	R^2
8 м/с	-0,0017	0,0347	-0,2213	0,6447	-0,6883	0,999
9 м/с	0	-0,0005	0,031	-0,1469	0,2082	0,999
10 м/с	0	-0,001	0,0339	-0,1605	0,2281	0,999
11 м/с	-0,0003	0,007	-0,04	0,1198	-0,1542	0,999
12 м/с	-0,0005	0,0129	-0,1023	0,37	-0,479	0,997

$$y = A_1x^4 + A_2x^3 + A_3x^2 + A_4x + A_5.$$

Далее была рассчитана возможная генерация электроэнергии каждой ВЭУ на объекте в течение 20 лет с 2001 года. Расчетный интервал изменения скорости ветра составлял 1 час, что в конечном итоге был проведен расчет для 175,2 тыс. часов для каждой из 82 ВЭУ. Стоит отметить, что если скорость ветра была меньше 3 м/с, то возможная генерация приравнивалась к нулю, а если скорость ветра была больше номинальной скорости ветра у ВЭУ, то возможная генерация приравнивалась к $P_{\text{ном}} \cdot \text{час}$, где $P_{\text{ном}}$ — это номинальная мощность ВЭУ. Полученные результаты пересчитывались в коэффициент использования установленной мощности. Подобный расчет был проведен для формулы № 1 и формулы № 2, а также всех унифицированных характеристик с различными номинальными скоростями ветра.

Анализируя графики (рис. 5) можно сделать несколько ключевых выводов:

- разброс между максимальным и минимальным значением коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) у всех ветроэлектрических установок за период в 20 лет находится на уровне около 30 %, вне зависимости от номинальной скорости ветра. Данный показатель подчеркивает, насколько важна энергетическая характеристика, а именно её диапазон разгона. При этом 50 % моделей различаются не более чем в 9% по показателю использования установленной мощности;

- формула № 1 имеет самое наибольшее отклонение от результатов реальных ветроэлектрических установок. С увеличением номинальной скорости ветра увеличивается отклонение, что в один

момент максимальная выработка по формуле № 1 не достигает межквартильный диапазон, из-за чего в дальнейшем может быть некорректно составлен электротехнический комплекс или рассчитано технико-экономическое обоснование;

- формула № 2 имеет обратный результат: с увеличением номинальной скорости ветра уменьшается отклонение от межквартильного диапазона всех ВЭУ. Данный эффект можно объяснить тем, что энергетическая характеристика в диапазоне разгона при меньших значениях ветра имеет большее значение крутизны ($\text{tg } \lambda$), чем при значениях ветра у номинальной точки;

- универсальная характеристика показала наилучший результат, практически всегда попадая в межквартильный диапазон всех ВЭУ;

- необходимо отметить высокие значения КИУМ у графиков для номинальных скоростей ветра 8 и 9 м/с. Данный показатель можно объяснить тем, что на объекте среднее значение ветра на высоте 50 метров колеблется в диапазоне 8–10 м/с и большую часть времени ВЭУ в таком режиме работает при номинальной мощности.

Обсуждение и критика. Таким образом, ученые, использующие формулу № 1, при расчете электротехнического комплекса на основе возобновляемых источников, в частности ветроэнергетики, значительно занижают показатели ВЭУ, что существенно сказывается на последующем обосновании структуры электротехнического комплекса.

Бельский А. А. вывел наиболее приближенную зависимость мощности от скорости ветра к выходным характеристикам реальных ВЭУ, однако при номинальных скоростях ветра менее 10 м/с расхождения становятся все больше.

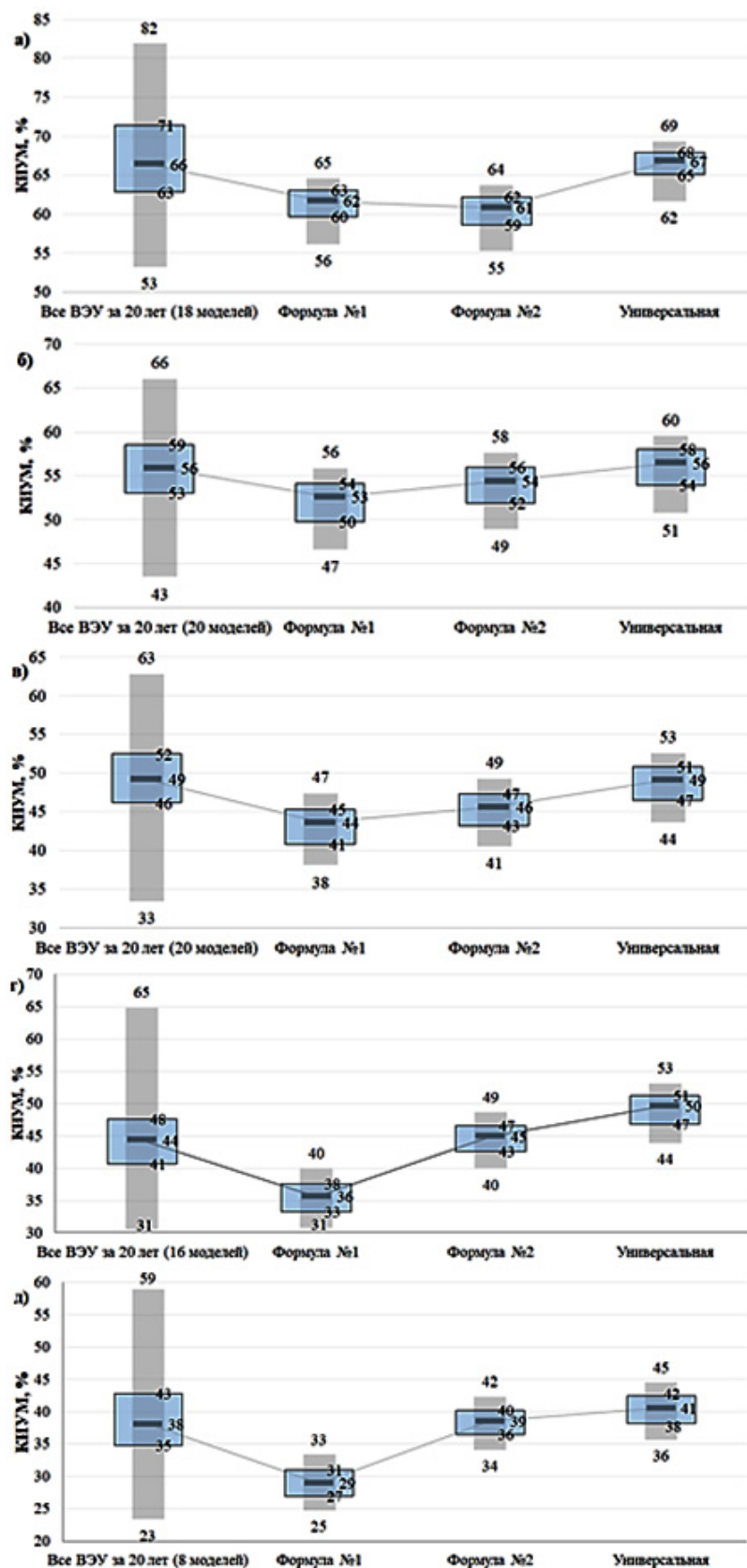


Рис. 5. Сравнение КИУМ при различных номинальных скоростях ветра: а) 8 м/с; б) 9 м/с; в) 10 м/с; г) 11 м/с; д) 12 м/с

Стоит также учитывать, что данное исследование проводилось на основе ветроэлектрических установок мощностью до 100 кВт, то есть в классе «малых мощностей», и вполне возможно, что для ВЭУ с мощностями от 100 до 500 кВт и от 500 кВт и более формула № 1 будет иметь другой результат

при расчетах. Ключевым моментом в данном исследовании может являться и тот факт, что расчет проводился для высоты 50 метров над уровнем земли, в то время как наиболее распространенная высота башни для подобного класса ВЭУ находится в диапазоне 25–35 метров.

1. Renewable capacity statistics 2020 // International renewable energy agency (IRENA). 2020. 66 p. ISBN 978-92-9260-239-0.
2. Cherepovitsyn A. E., Tsvetkov P. S., Evseeva O. O. Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 249. P. 463–478. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
3. Zhukovskiy Y. [et al.]. Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic // Resources. 2021. Vol. 10 (12). 124. 25 p. DOI: 10.3390/resources10120124.
4. Stroykov G., Cherepovitsyn A. Y., Iamshchikova E. A. Powering multiple gas condensate wells in Russia's arctic: Power supply systems based on renewable energy sources // Resources. 2020. Vol. 9 (11). 130. 15 p. DOI: 10.3390/resources9110130.
5. Возобновляемые источники энергии как новый шаг развития для нефтегазовых компаний // KPMG. 2019. 25 с.
6. Sychev Y. A., Zimin R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 247. P. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
7. Abramovich B. N., Bogdanov I. A. Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 249. P. 408–416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.
8. Шклярский Я. Э., Васильков О. С. Разработка алгоритма определения мест подключения систем накопления электроэнергии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 4. С. 165–173. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-165-173.
9. Батуева Д. Е. [и др.]. Традиционная углеводородная энергетика в рамках устойчивого развития // О продвижении принципов «зеленой» экономики в целях ускорения научно-технологического прогресса: конф. 2020. С. 12–13. DOI: 10.38006/907345-65-2.2020.12.13.
10. Игошева А. А. Обзор динамики и структуры фонда нефтяных скважин в России // Инновационная наука. 2018. № 11. С. 71–74.
11. Рыженко В. Ю. Нефтяная промышленность России: состояние и проблемы // Перспективы науки и образования. 2014. № 1 (7). С. 300–314.
12. Шайхисламов Р. М., Рябов С. Ю., Репчук С. В. Методика анализа и оценка перспектив освоения нефтяных месторождений по геолого-физической характеристике. URL: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C11/V2/047.pdf> (дата обращения: 10.06.2022).
13. Upadhyay S., Sharma M. P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 38. P. 47–63. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.057.
14. Sawle Y., Gupta S. C., Bohre A. K. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 2217–2235. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.033.
15. Батуева Д. Е., Шклярский Я. Э., Ревин И. Е. Анализ данных генерации электроэнергии в ветродизельном комплексе с использованием алгоритма SSA // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 6. С. 69–77.
16. Жуковский Ю. Л. [и др.]. Классификация инструментов инвестиционной поддержки технологий интегрированных энергетических систем // Российский экономический интернет-журнал. 2019. № 3. С. 29.
17. Zhukovskiy Y. L. [et al.]. Analysis of technological changes in integrated intelligent power supply systems // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects-11th Conference of the Russian-German Raw Materials. St. Petersburg: Saint-Petersburg mining university, 2018. Vol. 1. P. 249–258.
18. Al-Falahi M. D. A., Jayasinghe S. D. G., Enshaei H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system // Energy conversion and management. 2017. Vol. 143. P. 252–274. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.019.
19. Borowy B. S., Salameh Z. M. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system // IEEE Transactions on energy conversion. 1996. Vol. 11 (2). P. 367–375. DOI: 10.1109/60.507648.
20. Rajanna S., Saini R. P. Development of optimal integrated renewable energy model with battery storage for a remote Indian area // Energy. 2016. Vol. 111. P. 803–817. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.005.
21. Лаврик А. Ю. [и др.]. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С. 10–17. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.
22. Askarzadeh A., dos Santos Coelho L. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran // Solar Energy. 2015. Vol. 112. P. 383–396. DOI: 10.1016/j.solener.2014.12.013.
23. Бельский А. А. Ветроэлектрическая установка с регулированием мощности за счет вывода ветроколеса из под ветра // Естественные и технические науки. 2013. № 1. С. 185–188.
24. Пат. 2021621667 Российская Федерация. База данных ветроэлектрических установок с горизонтальной осью вращения мощностью от 1 до 100 кВт / Бельский А. А., Замятин А. И., Васильева Н. В. № 2021621537; заявл. 27.07.21; опубл. 05.08.21, Бюл. № 8.
25. Data Access Viewer // NASA Power. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения: 10.06.2022).
26. Tayyib M., Odden J. O., Saetre T. O. Irradiance dependent temperature coefficients for MC solar cells from Elkem solar grade silicon in comparison with reference polysilicon // Energy Procedia. 2014. Vol. 55. P. 602–607. DOI: 10.1016/j.egyp.2014.08.032.
27. Moeini B., Haack H., Fairley N. [et al.]. Box plots: A simple graphical tool for visualizing overfitting in peak fitting as demonstrated with X-ray photoelectron spectroscopy data // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2021. Vol. 250. 147094. DOI: 10.1016/j.jelspec.2021.147094ff. fihal-03298446.

БЕЛЬСКИЙ Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 5210-4195

AuthorID (РИНЦ): 743832

ORCID: 0000-0002-2619-1496

AuthorID (SCOPUS): 56367311300

Адрес для переписки: Belskij_AA@pers.spmi.ru

ЗАМЯТИН Алексей Игоревич, аспирант кафедры электроэнергетики и электромеханики Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург.

ORCID: 0000-0002-1108-6001

AuthorID (SCOPUS): 57220047983

Адрес для переписки: a1le2x@yandex.ru

Для цитирования

Бельский А. А., Замятин А. И. Анализ энергетических характеристик ветроэлектрических установок // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 58–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-58-64.

Статья поступила в редакцию 15.06.2022 г.

© А. А. Бельский, А. И. Замятин

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В УПРАВЛЯЕМЫХ АСИНХРОННЫХ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ

В статье проведено исследование изменения электромагнитных параметров управляемых асинхронных специальных электрических приводов. Специальными асинхронными электрическими приводами являются управляемые каскадные электрические приводы цилиндрической и аксиальной конструкций. Исследование динамики изменения параметров было выполнено на основе метода электромагнитного преобразования энергии и теории электромагнитных цепей. В итоге для новых математических моделей электромагнитной системы исследуемых асинхронных электрических приводов определены параметры электромагнитного поля замкнутого витка одной катушки электрической обмотки с электрическим током в однородной среде. Решенная задача является пространственной, так как определено распределение электромагнитной индукции в витке заданной формы электромагнитной катушки. Полученные выводы определения электромагнитных параметров цилиндрических и аксиальных двигателей специальных электрических приводов позволяют правильно решать задачи моделирования, проектирования и улучшения эффективности исследуемых электрических приводов и электромеханических преобразователей энергии цилиндрической и аксиальной конструкций. Результаты исследования применимы для создания системы автоматизированного проектирования исследуемых асинхронных электрических приводов и решения задач моделирования и проектирования. Проведенное исследование позволяет создавать электрические приводы оптимальными, массогабаритными и энергетическими показателями.

Ключевые слова: специальный электрический привод, управляемый асинхронный каскадный электрический привод, преобразование энергии, математическое моделирование, электромагнитное поле, электромагнитная система.

Введение. Исследование изменения электромагнитных параметров [1–2] управляемых асинхронных специальных электрических приводов [3–4] является довольно трудной задачей [5–6]. Для решения поставленной задачи необходимо правильно определять параметры электромагнитных процессов [7–8], таких как электромагнитный поток, напряженность электромагнитного поля, магнитная индукция [9–10]. От точности определения этих параметров зависит правильность определения мощности и электромагнитного момента [11–12] на валу специальных электрических приводов [13–14]. Результат исследования зависит от типа электрического привода, точности математических моделей, правильности проектирования, системы управления [15–16]. Полученный результат позволит повышать эффективность исследуемых электроприводов [17–18], оптимизировать их соз-

дание [19–20] и автоматизированные системы управления [21–22]. Проводимое исследование необходимо для проектирования и создания новых типов электроприводов [23–24]. Специальные электрические приводы находят применение в таких отраслях промышленности, в машиностроении, электротранспорте, нефтегазовой, сталелитейной, горной, целлюлозно-бумажной, легкой, текстильной и других отраслях промышленности [25–26]. Требования к модернизации технологических и технических процессов, механизмов и оборудования заставляет электротехническую промышленность создавать новые типы электроприводов, к которым относятся асинхронные управляемые специальные электрические приводы [27–28].

Разработана математическая модель электромагнитной системы статора и ротора цилиндрических и аксиальных компонентов специальных асин-

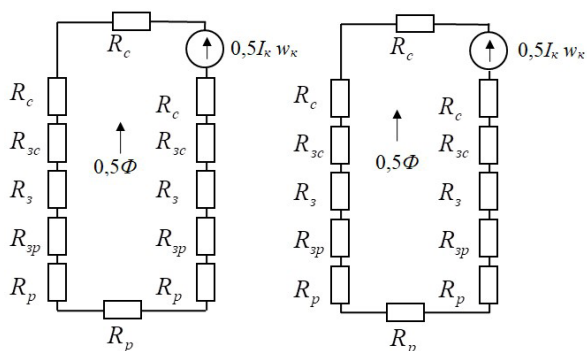


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи

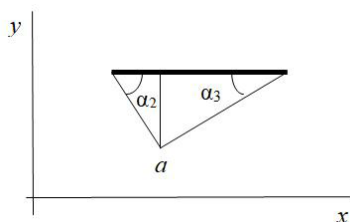


Рис. 2. Рассматриваемый участок

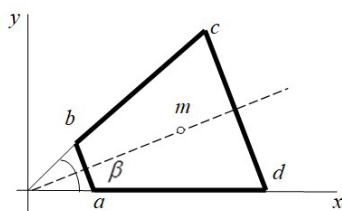


Рис. 3. Круглая катушка

хронных электрических приводов, отличающиеся тем, что электромагнитная система представлена в виде совокупности электромагнитов переменного тока. Схема замещения показана на рис. 1, где R_c — сопротивление участков яра статора; R_{3c} — сопротивление участков зубцовой части статора; R_3 — сопротивление воздушного зазора; R_{3p} — сопротивление участков зубцовой части ротора; R_p — сопротивление участков яра ротора; I_k — электрический ток катушки; w_k — число витков катушки.

В результате использования математической модели электромагнитной системы в виде совокупности электромагнитов переменного тока задача определения электромагнитных параметров в управляемых асинхронных специальных электрических приводах сводится к определению электромагнитных параметров отдельных катушек или катушечных групп, а конечный результат получен в виде суммирования результатов со своим сдвигом в пространстве и времени.

Определяем электромагнитные параметры компонентов специальных электрических приводов. Магнитная индукция, создаваемая электрическим током, протекающим в заданной точке по рассматриваемому участку, равна

$$B = \frac{\mu_a I}{4\pi a} (\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3), \quad (1)$$

где μ_a — магнитная проницаемость среды, в которой расположен виток; I — величина тока в участке; a — перпендикуляр, восстановленный из точки пространства к заданному участку; α_2 — угол между участком и прямой, соединяющей точку пространства и конец этого участка; α_3 — угол между участком и прямой, соединяющей точку пространства и начало этого участка.

Рассматриваемый участок показан на рис. 2.

Произведём рассечение плоскости витка прямой. На плоскости найдем распределение магнитной индукции. Закругленные части секции витка были заменены на прямые, параллельные пересекающей прямой. Виток расположим так, чтобы одна сторона витка была на оси ox . Вершина сектора данного витка должна располагаться в центре координат. Точка m может свободно перемещаться по заданной прямой (рис. 3).

Координаты пересечения заданной прямой и двух сторон секций равны $(a;0)$ и $(a \cos \beta/2; a \sin \beta/2)$, β — угол между сторонами витка.

Представим виток в виде отдельных участков: ab , bc , cd и da . Магнитная индукция в точке m от действия четырех участков будет равна

$$B = B_{ab} + B_{bc} + B_{cd} + B_{da}. \quad (2)$$

Определяем электромагнитные параметры компонентов асинхронных управляемых специальных электрических приводов. Ранее была определена магнитная индукция, создаваемая электрическим током, протекающим в заданной точке по рассматриваемому участку [29].

Выражение для магнитной индукции имеет вид:

$$B = \frac{\mu_a I}{4\pi} \left(\frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}} - \frac{C_6}{A_7 y \sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}} + \frac{C_7}{A_6 y \sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}} - \frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}} + \frac{C_8}{(A_4 - B_4 y) \sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}} + \frac{C_4}{\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}} + \frac{C_9}{(A_5 - B_5 y) \sqrt{y^2 - C y + D}} - \frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C y + D}} + \frac{A_2 - B_2 y}{\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}} + \frac{A_3 y}{\sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}} + \frac{A_1 y}{\sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}} + \frac{A - B y}{\sqrt{y^2 - C y + D}} \right), \quad (3)$$

где B — магнитная индукция; μ_a — магнитная проницаемость среды, в которой расположен виток; I — величина тока в участке; a — перпендикуляр, восстановленный из точки пространства к заданному участку; A_i, B_i, C_i — произвольно принятые коэффициенты; y — координата.

Для построения зависимости магнитной индукции B от y необходимо рассмотреть каждое слагаемое выражения (3) в отдельности для нахождения экстремума каждой функции и каждого слагаемого $U_{экстр}$ и определить, максимум это или минимум. Необходимо заметить, что U изменяется от 0 до $x \sin \beta$.

Определение максимума каждой отдельной функции, которая является одним из слагаемых вы-

ражения (3), зависит от её производной по y . Полученную производную приравняем к нулю и решим полученное уравнение относительно y . Подставляя значения y : 0, $x \sin \beta$ и $y_{\text{экстр}}$, получаем значения магнитной индукции по краям рассматриваемого участка (0; $x \sin \beta$) B , B_{κ} и в точке экстремума $B_{\text{экстр}}$ каждой отдельной функции.

При анализе функции $\frac{A_1 y}{\sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}}$ (функция

1) были получены следующие выражения:

$$y_{\max 1} = x - r_{\text{вн}}', \quad (4)$$

$$B_{\text{н}1} = 0; \quad B_{\max 1} = \frac{2r_{\text{вн}}}{x(x - r_{\text{вн}})};$$

$$B_{\kappa 1} = \frac{2r_{\text{вн}}}{(x - r_{\text{вн}})\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}, \quad (5)$$

где $B_{\text{н}1}$, $B_{\max 1}$, $B_{\kappa 1}$ — начальное, максимальное и конечное значения магнитной индукции для функции 1;

$y_{\max 1}$ — значение y , при котором магнитная индукция функции 1 максимальна.

При анализе функции $\frac{A_3 y}{\sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}}$ (функция

2) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}2} = 0; \quad B_{\kappa 2} = \frac{2r_{\text{внеш}}}{(r_{\text{внеш}} - x)\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}, \quad (6)$$

где $B_{\text{н}2}$, $B_{\kappa 2}$ — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 2; $r_{\text{внеш}}$, $r_{\text{вн}}$ — внешний и внутренний радиусы компонента электропривода.

При анализе функции $\frac{C_4}{\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}}$ (функция

3) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}3} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}, \quad B_{\kappa 3} = \frac{1}{r_{\text{внеш}} - x}, \quad (7)$$

где $B_{\text{н}3}$, $B_{\kappa 3}$ — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 3.

При анализе функции $-\frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C y + D}}$ (функция 4) были получены следующие выражения:

$$y_{\min 4} = \frac{x + r_{\text{вн}}}{2}, \quad (8)$$

$$B_{\text{н}4} = -\frac{1}{\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}; \quad B_{\min 4} = -\frac{\sqrt{2}}{x - r_{\text{вн}}};$$

$$B_{\kappa 4} = -\frac{1}{x - r_{\text{вн}}}, \quad (9)$$

где $B_{\text{н}4}$, $B_{\min 4}$, $B_{\kappa 4}$ — начальное, минимальное и конечное значения магнитной индукции для функции 4; $y_{\min 4}$ — значение y , при котором магнитная индукция функции 4 минимальна.

При анализе функции $\frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}}$ (функция

5) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}5} = \frac{1}{r_{\text{внеш}} - x}; \quad B_{\kappa 5} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}, \quad (10)$$

где $B_{\text{н}5}$, $B_{\kappa 5}$ — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 5.

При анализе функции $-\frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}}$ (функция 6) были получены следующие выражения:

$$y_{\min 6} = \frac{x - r_{\text{вн}}}{2}, \quad (11)$$

$$B_{\text{н}6} = -\frac{1}{x - r_{\text{вн}}}; \quad B_{\min 6} = -\frac{\sqrt{2}}{x - r_{\text{вн}}};$$

$$B_{\kappa 6} = -\frac{1}{\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}, \quad (12)$$

где $B_{\text{н}6}$, $B_{\min 6}$, $B_{\kappa 6}$ — начальное, минимальное и конечное значения магнитной индукции для функции 6; $y_{\min 6}$ — значение y , при котором функция 6 минимальна.

При анализе функции $\frac{C_8}{(A_4 - B_4 y)\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}}$ (функция 7) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}7} = \frac{r_{\text{внеш}} - x}{x\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}; \quad B_{\kappa 7} = \infty, \quad (13)$$

где $B_{\text{н}7}$, $B_{\kappa 7}$ — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 7.

При анализе функции $\frac{C_9}{(A_5 - B_5 y)\sqrt{y^2 - C y + D}}$ (функция 8) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}8} = \frac{x - r_{\text{вн}}}{x\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}; \quad B_{\kappa 8} = \infty, \quad (14)$$

где $B_{\text{н}8}$, $B_{\kappa 8}$ — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 8.

При анализе функции $\frac{C_6}{A_7 y \sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}}$ (функция 9) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}9} = \infty; \quad B_{\kappa 9} = \frac{r_{\text{внеш}} - x}{x\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}, \quad (15)$$

где $B_{\text{н}9}$, $B_{\kappa 9}$ — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 9.

При анализе функции $\frac{C_7}{A_6 y \sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}}$ (функция 10) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}10} = \infty; \quad B_{\kappa 10} = \frac{x - r_{\text{вн}}}{x\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}, \quad (16)$$

где $B_{\text{н}10}$, $B_{\kappa 10}$ — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 10.

При анализе функции $\frac{A - B y}{\sqrt{y^2 - C y + D}}$ (функция 11) были получены следующие выражения:

$$y_{\max 11} = r_{\text{вн}}, \quad (17)$$

$$B_{\text{н}11} = \frac{2r_{\text{вн}}}{(x - r_{\text{вн}})\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}; \quad B_{\max 11} = \frac{2r_{\text{вн}}}{x(x - r_{\text{вн}})};$$

$$B_{\text{к}11} = 0, \quad (18)$$

где $B_{\text{н}11}$, $B_{\max 11}$, $B_{\text{к}11}$ — начальное, максимальное и конечное значения магнитной индукции для функции 11; $y_{\max 11}$ — значение y , при котором функция 11 максимальна.

При анализе функции $\frac{A_2 - B_2 y}{\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}}$ (функция

12) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}12} = \frac{2r_{\text{внешн}}}{(r_{\text{внешн}} - x)\sqrt{x^2 + r_{\text{внешн}}^2}}; \quad B_{\text{к}12} = 0, \quad (19)$$

где $B_{\text{н}12}$, $B_{\text{к}12}$ — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 12.

По формулам (4) – (19) строим функции 1, 2, 3, ..., 12. Выражения (4) – (19) зависят от угла β ; например, угол β равен 90° , исходя из формы витка обмотки четырёхполюсного аксиального асинхронного электродвигателя. Для получения изменения магнитной индукции (1) во внутренней области витка сложим полученные функции 1, 2, 3, ..., 12, учитывая, что $r_{\text{вн}} = 1$, $r_{\text{внешн}} = 3$, а x будет равно 1,5 для первой зависимости, для второй зависимости — 2, а для третьей — 2,5.

Величина x указывает местонахождение пересекающей прямой. Для данного рассматриваемого случая величина x , равная 2, соответствует центру витка. Тогда соответственно 1,5 — одной четвёртой витка, а 2,5 — трём четвёртым.

Предложенная математическая модель электромагнитной системы статора и ротора цилиндрических и аксиальных компонентов специальных асинхронных электрических приводов отличается от существующих моделей и численных методов расчета, например, метода конечных элементов, реализованных в программных продуктах, таких как Elcut, Ansys, Comsol, тем, что позволяет определять электромагнитные параметры исследуемых объектов на основе полученных аналитических выражений. Расчет электромагнитной системы производится по отдельным катушкам или катушечным группам, а конечный результат получен в виде суммирования результатов со своим сдвигом в пространстве и времени.

Для расчета электромагнитных параметров исследуемых устройств необходимо определить максимальную индукцию на каждом из участков схемы замещения (рис. 1) и знать изменение магнитной индукции в пространстве. Расположим зависимости изменения магнитной индукции для различных x на плоскостях, перпендикулярных заданному витку (рис. 2, 3).

Исследование полученных зависимостей показало, что магнитная индукция в витке такой формы увеличивается с приближением к более широкой части витка и уменьшается при приближении к более узкой его части. Около более узкой части витка магнитная индукция имеет явно выраженную вогнутость, а возле широкой — выпуклость. При рассечении витка вдоль получаем зависимость изменения магнитной индукции в этой плоскости. Так же получаем распределение магнитной индукции

от одной секции обмотки, состоящей из трёх катушек, в каждой из которых один такой виток, смещённых на угол $360/z$ как в одной плоскости, так и в аксонометрии.

Для определения распределения магнитной индукции в одной секции обмотки рассматриваемого компонента электропривода нужно в формулы (4) – (19) подставить значения внешнего и внутреннего радиусов данного компонента, а также величину x . Это необходимо сделать в зависимости от того места на витке, где определяется распределение магнитной индукции.

Используя данную методику расчётов, можно провести исследование динамики изменения электромагнитных параметров управляемых специальных электрических приводов во вновь проектируемой конструкции специального электрического привода. Также можно получить распределение магнитной индукции в уже существующих электрических приводах и конструкциях электрических двигателей. Это позволит правильно определять искомые параметры для оптимального проектирования, улучшения эффективности электроприводов. Проведенное исследование позволяет создавать систему контрольных примеров при разработке алгоритмов. Использование алгоритмов оптимального выбора данных позволяет правильно создавать программы расчета исследуемых объектов.

Заключение. Используя данную методику расчётов, можно проследить изменение электромагнитных параметров управляемых асинхронных специальных электрических приводов для вновь проектируемой конструкции специального электрического привода и его компонентов — асинхронных двигателей. Также можно получить распределение магнитной индукции в уже существующих электрических приводах и конструкциях. Это позволит правильно определять искомые параметры для оптимального проектирования, улучшения эффективности электроприводов.

Проведенное исследование позволяет создавать систему контрольных примеров при разработке алгоритмов и программ расчета исследуемых объектов, а также разработать конструкции, позволяющие более эффективно использовать магнитную систему как цилиндрических, так и аксиальных электроприводов.

Благодарности

Отчетное исследование финансировалось РФФИ [Название проекта: Разработка теории оценки качества информации с учетом ее структурной составляющей, № 19-47-230004, от 19.04.2019] и администрацией Краснодарского края. Вся работа по составлению статьи и получению расчетных и экспериментальных данных была равномерно распределена среди ее авторов.

Библиографический список

1. Кузнецов А. А., Бакланов А. А., Глухих В. А. Измерение тягово-энергетических параметров локомотивов с асинхронным приводом // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2017. № 3 (43). С. 89–95.
2. Байрамкулов К. Н. А., Астахов В. И. Расчет магнитного поля в среде с неоднородными и анизотропными свойствами на основе электрической цепи Кирхгофа // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010, № 1. С. 3–11.

3. Пат. 2761160 С1 Российская Федерация, МПК В 60 L 1/003; В 60 L 50/10; Н 02 Р 7/295. Способ управления тяговыми электродвигателями маневрового тепловоза, работающего с пневмообдувочной машиной / Овчаренко С. М., Фоменко В. К., Минаков В. А., Носков В. О., Денисов И. Н. № 2021101545. заявл. 25.01.21; опубл. 06.12.21, Бюл. № 34.
4. Татевосян А. А. Оптимизация параметров тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами для линейного привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 6. С. 148–156. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-148-156.
5. Karandey V. Yu., Popov B. K., Afanasev V. L. Research of change of parameters of a magnetic flux of the stator and rotor of special electric drives // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2018). 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602911.
6. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Determination of electromagnetic parameters for improvement of efficiency of special electric drives // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012164.
7. Бубнов А. В., Четверик А. Н., Чудинов А. Н. Разработка и исследование обобщенной компьютерной модели электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 23–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-23-29.
8. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Лысенко В. С. Моделирование работы преобразователя для подключения трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети // Практическая силовая электроника. 2020. № 4 (80). С. 14–19.
9. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Research of electrical power processes for optimum modeling and design of special electric drives // Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. P. 242–247. DOI: 10.2991/aime-18.2018.47.
10. Сериков А. В., Суздорф В. И. Моделирование электромагнитных процессов в коллекторных электродвигателях с питанием от статических преобразователей // Электротехника. 2016. № 12. С. 39–44.
11. Karandaev A. S., Gasiyarov V. R., Loginov B. M., Khramshin V. R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill // Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017). 2017. Vol. 206. P. 1780–1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
12. Иванов С. Н., Ким К. К., Приходченко О. В., Просолович А. А. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещенных энергетических устройствах // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. Т. 1, № 1 (41). С. 37–44.
13. Власьевский С. В., Малышева О. А., Мельниченко О. В. Сравнение расчетных сил тяги по сцеплению электровозов переменного тока с асинхронным и коллекторным приводом // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 5. С. 30–36.
14. Козярук А. Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. 2019. № 3. С. 33–37.
15. Лот Н. С., Осипов О. И., Жидков А. М. Перспективы развития электроприводов шахтных подъёмных установок // Приводы и компоненты машин. 2016. № 6 (22). С. 9–12.
16. Соловьев В. А., Дерюжкова Н. Е., Чжо А. Х., Тетерин В. В. Нечеткое управление в системе регулирования позиционных электроприводов стержневой установки // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 5. С. 77–80.
17. Климаш В. С., Соколовский М. А. Повышение эффективности комплекса электроприводов технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 575–581.
18. Данышина А. А., Кравченко О. А., Бекин А. Б. Методы и способы совершенствования электромеханических систем силокомпенсирующих манипуляторов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 1. С. 69–76. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-69-76.
19. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Каминский А. В., Коваленко С. В. Методика определения параметров асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 1. С. 30–36. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-30-36.
20. Хацевский К. В., Беляков В. Е. Математическое моделирование асинхронного электропривода с дроссельным регулированием скорости // Омский научный вестник. 2016. № 3 (147). С. 49–53.
21. Бурков А. Т., Валинский О. С., Евстафьев А. М. [и др.]. Системы управления тяговым приводом современных локомотивов // Электротехника. 2019. № 10. С. 33–36.
22. Дерюжкова Н. Е., Соловьев В. А., Тетерин В. В., Урасов Д. В. Сравнительная оценка классических и нечетких алгоритмов управления системой электропривода многоточечного формирования изделий двойной кривизны // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 52–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-52-57.
23. Mamunts D. G., Morozov S. A., Gaskarov V. D., Saushiev A. V. [et al.]. Development of an automated system for managing and optimizing management decisions in the design, organization and production of dredging // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2018). 2018. P. 73–76. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317033.
24. Pleugaliuli T. K., Sarvarov A. S., Berdibekov A. O. Development and optimization of multi-motor asynchronous electric drives for carding machines // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED), 26–30 March. 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341723.
25. Khrisanov V. I., Dmitriev B. F. The marine electrical power industry with the use of renewable energy carriers. Part 2. Axial multipole synchronous generators with permanent magnets for wind and wave offshore power plants // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87, № 10. P. 554–559. DOI: 10.3103/S1068371216100023.
26. Anuchin A., Briz F., Rassudov L. [et al.]. Implementation of fast and accurate modeling method of electric drives // 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 14–14 Oct. 2015. DOI: 10.1109/RTUCON.2015.7343158.
27. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B. [et al.]. Optimization of parameters of special asynchronous electric drives // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052002.
28. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B. [et al.]. Research and analysis of force and moment of the cascade asynchronous electric drives // International conference on innovations and prospects of development of mining machinery and electrical engineering (IPDME 2018). IOP conference series: earth and environmental science. 2018. Vol. 194, № 5. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052009.
29. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B. [et al.]. Research of electromagnetic parameters for improvement of efficiency of special electric drives and components // 5TH International conference on power generation systems and renewable energy technologies (PGSRET-2019), Istanbul Technical University, Istanbul, 26–27 August 2019. 2019. P. 69–74. DOI: 10.1109/PGSRET.2019.8882689.

КАРАНДЕЙ Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий

Кубанского государственного технологического университета (КубГТУ), г. Краснодар.

SPIN-код: 5078-5042

AuthorID (РИНЦ): 591775

Адрес для переписки: erp_kvy@mail.ru

ПОПОВА Ольга Борисовна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры информационных систем и программирования КубГТУ, г. Краснодар.

SPIN-код: 1095-6863

AuthorID: 150319

Адрес для переписки: popova_ob@mail.ru

ПОПОВ Борис Клавдиевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий КубГТУ, г. Краснодар.

SPIN-код: 7872-1515

AuthorID: 591776

Адрес для переписки: pbk47@mail.ru

АФАНАСЬЕВ Виктор Леонидович, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий КубГТУ, г. Краснодар.

SPIN-код: 9019-6653,

AuthorID: 972940

Адрес для переписки: bubuvix@mail.ru

Для цитирования

Карандей В. Ю., Попова О. Б., Попов Б. К., Афанасьев В. Л. Исследование изменения электромагнитных параметров в управляемых асинхронных специальных электрических приводах// Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 65–70. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-65-70.

Статья поступила в редакцию 24.05.2022 г.

© В. Ю. Карандей, О. Б. Попова, Б. К. Попов,
В. Л. Афанасьев

ДВЕНАДЦАТИПУЛЬСОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Внедрение двенадцатипульсовых выпрямителей взамен шестипульсовых на тяговых подстанциях городского электрического транспорта приводит к повышению технико-экономических показателей, экономии электроэнергии, снижению тока утечки, что ведет к электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо. Двенадцатипульсовые выпрямители могут иметь последовательное или параллельное соединение шестипульсовых мостов. При параллельной схеме необходимо наличие уравнительного реактора. Реализация последовательной схемы двенадцатипульсового выпрямителя осуществляется с применением специально разработанных для нее сухих преобразовательных трансформаторов и выпрямителей на основе таблеточных лавинных вентилях ввиду их преимуществ перед нелавинными.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, тяговая подстанция, двенадцатипульсовый выпрямитель, таблеточные лавинные вентилях, ток утечки, технико-экономические показатели.

В системах электроснабжения городского электрического транспорта применяются в основном шестипульсовые выпрямители [1–3]. Надежность и эффективность работы тяговых подстанций городского электрического транспорта, повышение электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо напрямую связаны с заменой шестипульсовых выпрямителей двенадцатипульсовыми, которые имеют более высокие коэффициенты мощности и полезного действия, улучшают качество питающего и выпрямленного напряжения, снижают электромагнитное влияние на смежные приемники электроэнергии. Пропускная способность участков городского электрического транспорта при этом повышается за счет меньшего коэффициента наклона внешней характеристики и стабилизации напряжения. Внедрение двенадцатипульсовых выпрямителей взамен шестипульсовых при коэффициенте нагрузки тяговой подстанции k_n от 0,25 до 0,75 приведет к снижению удельного расхода электрической энергии на 2,5 % [3–9].

На 28 тяговых подстанциях Муниципального предприятия (МП) г. Омска «Электрический транспорт» эксплуатируется 65 выпрямительных агрегатов, 64 из которых имеют сложные нулевые шестипульсовые схемы выпрямления параллельного типа. Выпрямительные агрегаты включают в себя выпрямительные блоки БВКЛЕ-1000 (42 шт.) и БВКЛЕ-2000 (23 шт.), а также преобразовательные трансформаторы ТМРУМ-1200/10 (42 шт.) и ТМПУ-2000/10 (23 шт.). Выпрямительный блок БВКЛЕ-1000 содержит 36 лавинных вентилях штыревого типа ВЛ200-9 (6×3×2 шт.). Преимуществом использова-

ния лавинных вентилях в составе выпрямительных агрегатов перед нелавинными заключается в большей устойчивости к перенапряжениям.

Вследствие применения лавинных вентилях у выпрямительных агрегатов тяговых подстанций городского электрического транспорта не использовались и до сих пор не используются достаточно эффективные средства защиты от перенапряжений со стороны вентиляхных обмоток трансформаторов, такие как ограничители перенапряжения (ОПН) или вентиляхные разрядники. На некоторых выпрямительных агрегатах для защиты от перенапряжений установлены демфирующие RC-цепи, включенные между выводами вторичных обмоток. Подключение RC-цепей осуществляется через предохранители.

Предприятия-изготовители выпрямительных блоков БВКЛЕ с середины 80-х годов стали оснащать их вентиляхами таблеточной конструкции нелавинного типа, что повысило динамическую устойчивость выпрямительных блоков, но значительно снизило их устойчивость к перенапряжениям.

В качестве опытного образца для оценки эффективности работы один двенадцатипульсовый выпрямительный агрегат параллельного типа введен в эксплуатацию на тяговой подстанции городского электрического транспорта г. Омска, которая является тупиковой, централизованного электроснабжения с изолированной от земли отрицательной шиной, и питает только троллейбусную контактную сеть. Схема главных электрических соединений выпрямительного агрегата приведена на рис. 1. В схеме выпрямительного агрегата ВАКЛЕ-1000-600Н использованы реконструированные выпрями-

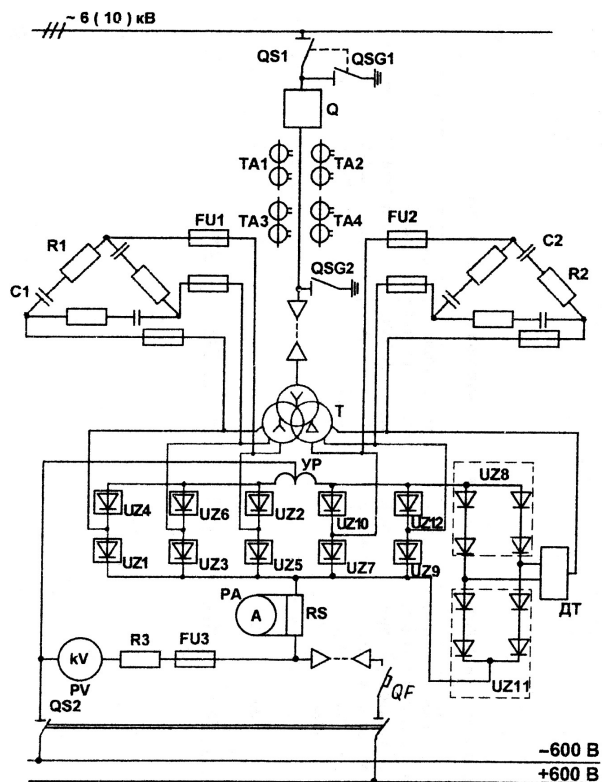


Рис. 1. Схема главных электрических соединений двенадцатипульсового выпрямителя параллельного типа с использованием вентильных конструкций ВКЛЕ-1000-600Н

тельные блоки ВКЛЕ-1000 и преобразовательный трансформатор ТМРУМ-1200/10. Выпрямительные блоки ВКЛЕ-1000 реконструированы сотрудниками МП «Электрический транспорт» г. Омска и ОмГУПСа. Преобразовательный трансформатор ТМРУМ-1200/10 реконструирован в электромеханических мастерских ЭМАСТ Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД).

Реконструкция выпрямительных блоков ВКЛЕ-1000 предусматривала увеличение числа вентильных плеч с шести до двенадцати, перераспределение числа вентилях в вентильных плечах и изменение ошиновки выпрямителя. До модернизации в каждом из шести вентильных плеч выпрямительных блоков было установлено три вентиля ВА200-9, включенных последовательно. Общее число вентилях в выпрямительных блоках было равно 36 (6×3×2 шт.). В двенадцатипульсовом выпрямителе параллельного типа должно быть вдвое меньше последовательно включенных вентилях в каждом из 12 вентильных плеч. Было решено принять число вентилях, соединенных последовательно, равным двум, что привело к увеличению общего числа вентилях до 48 (12×2×2 шт.). В схеме были сохранены демпфирующие RC-цепи. Они были также подключены между выводами вторичных обмоток трансформатора.

Стоимость реконструкции одного преобразовательного трансформатора ТМРУМ-1200/10 на базе ЭМАСТ не превысила 30 % от стоимости нового оборудования [10].

Для оценки эффективности применения двенадцатипульсового выпрямителя проведено сравнение характеристик шести- и двенадцатипульсового выпрямительных агрегатов, установленных на одной тяговой подстанции.

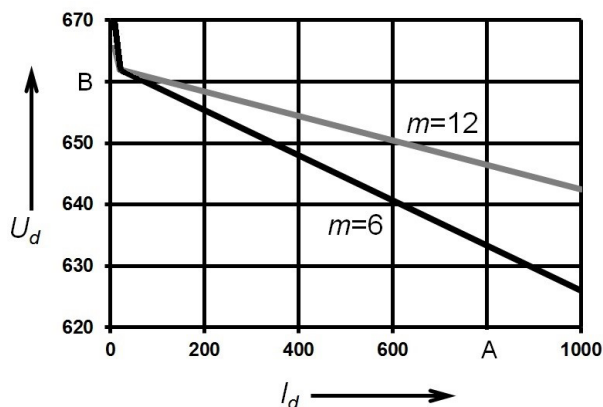


Рис. 2. Внешние характеристики шести- и двенадцатипульсовых выпрямителей параллельного типа

Уровень напряжения на шинах тяговой подстанции при изменении тока нагрузки I_d определяется внешними характеристиками выпрямительного агрегата. У двенадцатипульсового выпрямительного агрегата внешняя характеристика более пологая. Коэффициент наклона ее равен 0,26, в то время как у шестипульсового — 0,5. Внешние характеристики шести- и двенадцатипульсовых выпрямительных агрегатов параллельного типа одной тяговой подстанции приведены на рис. 2.

Ухудшение изоляции высоковольтного оборудования является причиной попадания на корпус троллейбуса опасного потенциала. Оценка состояния изоляции проводится по двум параметрам: сопротивлению изоляции $R_{ут}$ и току утечки $I_{ут}$. Сопротивление изоляции в большей степени характеризует работоспособность изоляции электрических машин, аппаратов и проводов, а ток утечки является интегральной характеристикой электробезопасности транспортного средства. Запрещается эксплуатировать троллейбус при величине тока утечки, превышающей максимально допустимую норму — 3,0 мА [11].

Ток утечки троллейбуса зависит не только от состояния изоляции полюсов цепей питания относительно корпуса, но и от значения напряжения в контактной сети и потенциала отрицательного провода контактной сети в точке нахождения троллейбуса [12–14].

Контроль тока утечки троллейбуса ЗиУ проводился в сухую погоду при включенных и отключенных двигателях при прямом измерении тока между корпусом машины и землей. При этом в контактную сеть поочередно подавалось питание от шести- и двенадцатипульсового выпрямительных агрегатов, что возможно реализовать на тупиковой тяговой подстанции.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что значение шестой гармоники с частотой 300Гц в кривой выпрямленного напряжения шестипульсового выпрямительного агрегата достигает 42В. В кривой выпрямленного напряжения двенадцатипульсового выпрямительного агрегата отсутствуют гармоники, кратные шести. Это объясняет результаты экспериментальных исследований, которые показали, что значения тока утечки $I_{ут}$ при работе шестипульсового выпрямительного агрегата примерно в три раза выше, чем при работе двенадцатипульсового.

Зависимость тока утечки $I_{ут}$ от тока нагрузки шести- и двенадцатипульсовых выпрямительных

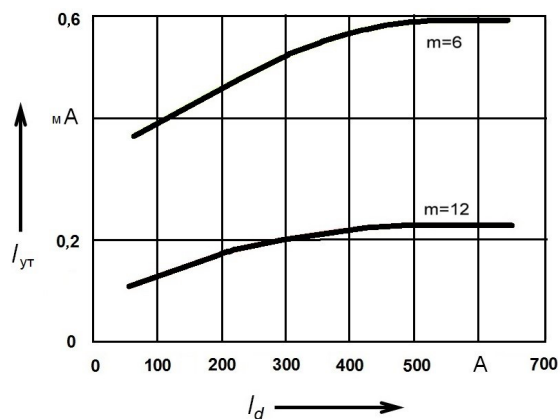


Рис. 3. Зависимости тока утечки от тока нагрузки выпрямителя

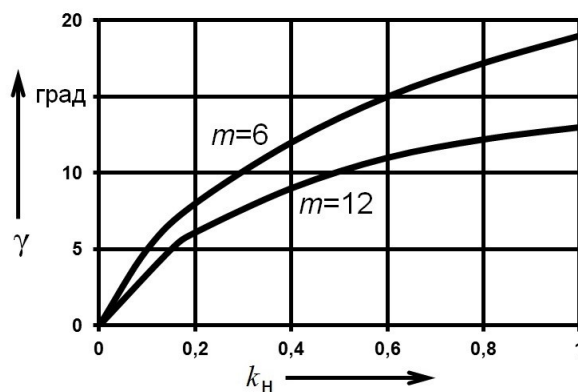


Рис. 5. Зависимость угла коммутации от коэффициента нагрузки

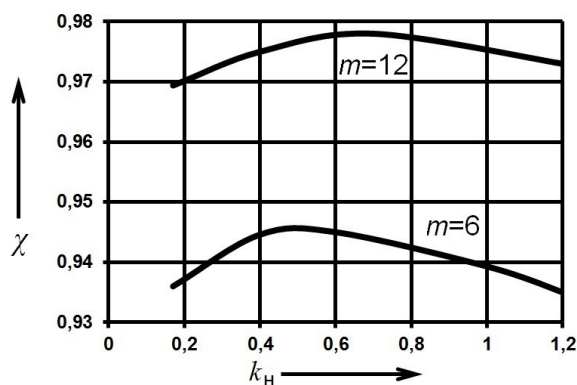


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности от коэффициента нагрузки

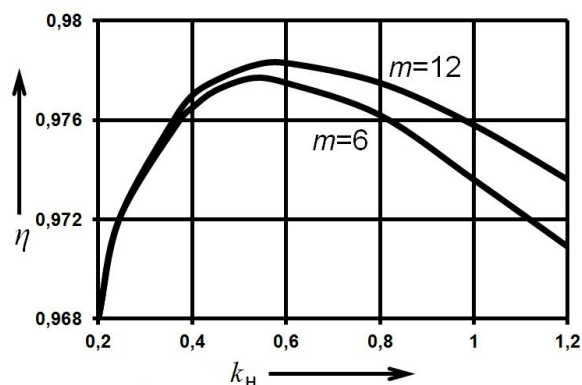


Рис. 6. Зависимость коэффициента полезного действия от коэффициента нагрузки

агрегатов тяговой подстанции приведена на рис. 3. Уменьшение тока утечки с ростом пульсаций кривой выпрямленного напряжения ведет к повышению электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо.

Экспериментальная зависимость коэффициентов мощности χ шести- и двенадцатипульсового выпрямительных агрегатов от коэффициента нагрузки k_H приведена на рисунке 4. Коэффициент мощности у шестипульсового выпрямительного агрегата при рабочих токах составляет 0,935–0,945, у двенадцатипульсового — 0,97–0,98, то есть среднее значение коэффициента мощности возрастает на 0,03 за счет лучшей формы кривой сетевого тока и снижения значений угла коммутации. Экспериментальная зависимость углов коммутации от коэффициента нагрузки шести- и двенадцатипульсовых выпрямительных агрегатов тяговой подстанции приведена на рис. 5. Уменьшение потребления реактивной энергии за счет повышения коэффициента мощности приводит к сокращению потерь электроэнергии в элементах энергосистемы [15, 16].

При проведении экспериментальных исследований были определены значения коэффициентов полезного действия (КПД) η выпрямительных агрегатов как отношение отдаваемой мощности к активной, потребляемой из питающей сети. При таком условии были учтены изменения потерь мощности в тяговом трансформаторе и вентилях. Сравнение значений КПД выпрямительных агрегатов про-

дилось в зависимости от перерабатываемой мощности, так как одна и та же мощность реализуется при различных токах из-за отличия внешних характеристик. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 6, свидетельствует о преимуществе двенадцатипульсовых выпрямителей, у которых КПД (при одинаковом коэффициенте нагрузки k_H) больше, чем у шестипульсовых.

Для систем электроснабжения городского электрического транспорта в настоящее время трансформаторы и выпрямители поставляются АО УЭТМ («Уралэлектротяжмаш», г. Екатеринбург), ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (г. Санкт-Петербург) совместно с компанией «СВЭЛ-РосЭнергоТранс». Имеются сведения об аналогичных разработках компании «Плутон». В МП «Электрический транспорт» г. Омска возможно внедрение этого оборудования. Но при этом следует иметь в виду следующее.

АО УЭТМ выпускает преобразовательные трансформаторы ТСЗП и ТСЗПУ и выпрямители В-ТПЕД только для шестипульсовых нулевых и мостовых схем выпрямления. ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» совместно с компанией «СВЭЛ-РосЭнергоТранс» выпускает преобразовательные трансформаторы ТСЗП и ТРСЗП и выпрямители В-МППД для шести- и двенадцатипульсовых мостовых схем выпрямления. Компания «Плутон» выпускает сухие преобразовательные трансформаторы, выполненные по технологии RESIBLOC, и выпрямители В-ТПЕД для шестипульсовых нулевых и шести- и двенадцатипульсовых мостовых схем выпрямления, а также

модульные тяговые подстанции с этим оборудованием.

В составе выпускаемых выпрямителей В-ТПЕД и В-МППД используются таблеточные вентили (с охладителями на тепловых трубках), обладающие значительными преимуществами перед штыревыми. Однако в этих конструкциях используются вентили нелавинного типа, которые весьма чувствительны к перенапряжениям, что в ряде случаев приводит к их повреждению [17, 18].

Работниками Муниципального предприятия (МП) г. Омска «Электрический транспорт» отмечены неоднократные случаи повреждения таблеточных вентилях нелавинного типа от перенапряжений в составе выпрямителей, особенно при грозах. Таблеточные вентили нелавинного типа особенно нуждаются в защите от перенапряжения.

За все время эксплуатации выпрямительных агрегатов на базе штыревых лавинных вентилях и нелавинных вентилях таблеточного типа работниками МП отмечено повреждение примерно 50 % нелавинных вентилях таблеточного типа и примерно 3 % штыревых лавинных вентилях, что показывает более высокую надежность лавинных вентилях.

Надежность лавинных вентилях подтверждена многолетним сроком эксплуатации на Западно-Сибирской железной дороге. Результаты диагностики по значению повторяющегося импульсного обратного тока I_{RRM} 98077 диодов в 311 выпрямителях и выпрямительно-инверторных агрегатах (ВИП) приведены в таблице 1.

Гораздо меньшая повреждаемость лавинных и нелавинных вентилях в выпрямителях и выпрямительно-инверторных агрегатах тяговых подстанций ЗСЖД по сравнению с тяговыми подстанциями городского электрического транспорта объясняется использованием эффективных средств защиты от перенапряжений вентилях и изоляции вентилях обмоток преобразовательных трансформаторов, таких как ограничители перенапряжения (ОПН), вентилях разрядники и демпфирующие RC-цепи. Однако даже без средств защиты лавинные вентили демонстрируют меньшую повреждаемость.

Двенадцатипульсовые выпрямители могут иметь последовательное или параллельное соединение шестипульсовых мостов. При параллельной схеме необходимо наличие уравнительного реактора, который выравнивает токи в параллельных мостах [3, 19]. Мощность уравнительного реактора не превышает 2 % от мощности трансформаторного оборудования. В схеме без уравнительного реактора

увеличивается наклон внешней характеристики вследствие двойной коммутации токов вентилях по сравнению со схемой с уравнительным реактором. К сожалению, оборудование для двенадцатипульсовых выпрямительных агрегатов, выпускаемое ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», компанией «СВЭЛ-РосЭнергоТранс», компанией «Плутон», предназначено для работы в двенадцатипульсовых схемах параллельного типа без уравнительного реактора.

В настоящее время в Муниципальном предприятии «Электрический транспорт» г. Омска ведутся предпроектные работы по строительству трех новых линий троллейбуса на Левобережье с модернизацией двух тяговых подстанций и установкой двух модульных тяговых подстанций, которые будут питать троллейбусную контактную сеть.

При проведении проектных работ с целью повышения эффективности и надежности работы выпрямительных агрегатов тяговых подстанций, а также повышения электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо, можно рекомендовать следующее. Выпрямительные агрегаты должны иметь двенадцатипульсовую схему выпрямления последовательного или параллельного типа.

Реализация последовательной схемы двенадцатипульсового выпрямителя должна осуществляться с применением новых, специально разработанных для нее сухих преобразовательных трансформаторов типа ТРСЗП с типовой мощностью 1000 и 2000 кВ·А и выпрямителей на основе таблеточных лавинных вентилях ввиду их преимущества перед нелавинными.

Двенадцатипульсовая схема выпрямления параллельного типа должна быть оснащена уравнительным реактором. Уравнительный реактор либо дополнительно устанавливается в оборудование, выпускаемое ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», компанией «СВЭЛ-РосЭнергоТранс» и компанией «Плутон», либо используется встроенный реактор при реконструкции преобразовательных трансформаторов ТМРУМ-1200 и ТМПУ-2000, предназначенных для сложных нулевых шестипульсовых схем выпрямления параллельного типа. При реконструкции в выпрямительных блоках БВКЛЕ-1000 и БВКЛЕ-2000 должно быть двенадцать вентилях плеч с изменением количества штатных вентилях в плече. В составе новых выпрямителей (блоков) необходимо иметь таблеточные вентили лавинного типа с охладителями на базе тепловых труб. В выпрямительном агрегате необходимо иметь защиту вентилях и изоляции вентилях обмоток преобразовательного

Таблица 1

Результаты диагностирования вентилях лавинного и нелавинного типа на ЗСЖД

Тип вентиля	Всего, шт.	На контроле, шт.	Отбраковано	
			шт.	%
ДЛ153-2000	1969	1	3	0,2
ДЛ161-200	1080	6	12	1,1
ВЛ200	63240	348	1171	1,8
ВК200	516	3	18	3,5
ДЛ133-500	28656	208	1030	3,6
Д453-1600	576	31	36	6,2
Д453-2000	2040	41	168	8,2

трансформатора от перенапряжения, современное коммутационное и защитное оборудование.

В настоящее время отечественными и зарубежными предприятиями-изготовителями разработан и внедрен широкий номенклатурный ряд мало- и необслуживаемого оборудования для устройств электроснабжения. К нему относятся вакуумные выключатели, выключатели автоматические быстроедействующие для тяговых подстанций электрических железных дорог и городского электрического транспорта, ограничители перенапряжения и другое оборудование, которое можно применять в системах электроснабжения городского электрического транспорта. База данных технических характеристик электрооборудования на различные классы напряжения составлена в соответствии с техническими указаниями за 2000–2021 гг. и ПАО «Россети» и ОАО «РЖД» [20].

Таким образом, повышения технико-экономических показателей системы электроснабжения городского электротранспорта, экономии электроэнергии, снижения тока утечки, а следовательно, повышения электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо можно достичь путем замены шестипульсовых выпрямителей тяговых подстанциях двенадцатипульсовыми с различными схемами соединения мостов. В составе двенадцатипульсовых выпрямителей должны применяться специально разработанные для них сухие преобразовательные трансформаторы, выпрямительные блоки на основе таблеточных лавинных вентилей, новое коммутационное и защитное оборудование.

Библиографический список

1. Загайнов Н. А., Финкельштейн Б. С., Кривов Л. Л. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса. Москва: Транспорт, 1988. 327 с.
2. Сопов В. И., Щуров Н. И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе. Москва: Юрайт, 2019. 400 с.
3. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Комякова Т. В. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена // Известия Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 11–20.
4. Еланский А. Ю., Титоренко К. В., Лабунский Л. С. Моделирование многопульсовых выпрямительных агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 9. С. 8–11.
5. Shaikh K. S., Mate A. M., Haibate G. J. [et al.]. Design & Simulation of Twelve Pulse Thyristorized Controllers in Series and Parallel mode of Operation // 2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICNTE44896.2019.8946066.
6. Chun L. [et al.]. Dynamic mathematical model of twelve-pulse diode rectifier with pole-to-ground DC fault // Transactions of China Electrotechnical Society. 2020. Vol. 35, № 7. P. 1529–1537.
7. Toh C. L., Tan C. W. DC traction power substation using eighteen-pulse rectifier transformer system // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2021. Vol. 12, № 4. P. 2284. DOI:10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2284-2294.
8. Li C., Fan M., Lijun F. [et al.]. Mathematical Model of Pole-to-ground DC Fault in Power Supply System of Twenty-four-pulse Diode Rectifier // 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). 2019. P. 947–952. DOI:10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019362.
9. Толоконников С. К., Аверина Н. Ю. Пути повышения энергоэффективности городского электрического транспорта //

Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов, ученых / Южно-Уральский гос. ун-т. Челябинск, 2021. Т. 9, № 1. С. 93–95.

10. Салита Е. Ю., Комякова Т. В., Ковалева Т. В. Улучшение показателей энергетической эффективности многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций // Известия Транссиба. 2017. № 3 (31). С. 114–123.
11. Об утверждении правил по охране труда на городском электрическом транспорте: приказ М-ва труда и соц. защиты Российской Федерации от 9 дек. 2020 г. № 875н. // Российская газета. 2020. 16 декабря.
12. Томянович Д. К. Защита устройств электроснабжения троллейбусов. Москва: Транспорт, 1980. 150 с.
13. Веклич В. Ф. Диагностирование технического состояния троллейбусов. Москва: Транспорт, 1990. 295 с.
14. Самигулин Н. И. Исследование электробезопасности троллейбуса // Тинчуринские чтения-2020 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы междунар. молодеж. науч. конф. В 3 т. / под общ. ред. Э. Ю. Абдуллазянова. Казань: Изд-во КГЭУ, 2020. Т. 1. С. 363–366. ISBN 978-5-89873-567-8.
15. Рудкий В. М., Тычков А. С., Старикова А. Г., Трофименко С. В. Проблема качества электроэнергии в системе электроснабжения городского электрического транспорта // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 1 (67). С. 17–23.
16. Song Z., Liu C. Study on active Harmonic Suppression on DC side of twelve pulse thyristor rectifier System // 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2021. Vol. 5. P. 2435–2443. DOI: 10.1109/IAEAC50856.2021.9391045.
17. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Результаты диагностики силовых вентилей преобразователей на тяговых подстанциях // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 97–100. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-97-100.
18. Пиксаев В. М., Алямкина Д. В., Пьянзин Д. В. Система диагностики мощных диодных выпрямителей // Вопросы электротехнологии. 2022. № 1 (34). С. 85–90.
19. Iwaszkiewicz J., Muc A., Mysiak P. A 12-pulse rectifier using coupled reactors for supplying three-inverters // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2019. Vol. 17. P. 589–592. DOI: 10.24084/repqj17.382.
20. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Кондратьев Ю. В. Оборудование для устройств электроснабжения. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2022. 97 с. ISBN 978-5-949-41296-1.

САЛИТА Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 8278-1354

AuthorID (РИНЦ): 428149

Адрес для переписки: salitaey@gmail.com

КОВАЛЕВА Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 7545-0724

AuthorID (РИНЦ): 650721

Адрес для переписки: tatevgeniy@list.ru

Для цитирования

Салита Е. Ю., Ковалева Т. В. Двенадцатипульсовые выпрямители в системе электроснабжения городского электрического транспорта // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 71–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-71-75.

Статья поступила в редакцию 21.06.2022 г.

© Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева

УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МОРСКИХ СУДОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ

В статье рассматривается вопрос обеспечения устойчивой работы судовых электротехнических комплексов. При проведении исследований используются реальные осциллограммы обменных и синфазных колебаний мощности, снятые при совместно-параллельной работе дизель-генераторных агрегатов на общие шины главного распределительного щита. Результаты математического моделирования позволяют сделать вывод о необходимости ограничения изменения значений коэффициентов усиления частотных регуляторов. Предложено ограничить изменение коэффициентов усиления частотных регуляторов при устранении обменных колебаний мощности.

Ключевые слова: обменные колебания мощности, параллельная работа, автономный электротехнический комплекс, устойчивость, генераторный агрегат, настройки регулятора частоты.

Введение. Флот Российской Федерации имеет в своем составе сотни морских судов, выполняющих различные функции [1]. К основным задачам морских плавучих объектов относятся транспортировка грузов и людей, добыча рыбных ресурсов и углеводородов, укладка трубопроводов и коммуникаций, защита государства, обеспечение работы в арктических условиях и другие [2, 3]. На борту любого морского судна имеется автономный электротехнический комплекс, состоящий из генерирующих и потребляющих электроэнергию устройств и механизмов [4]. Условия и особенности эксплуатации электротехнических комплексов морских судов регламентируются требованиями Морского регистра судоходства и Международной морской конвенцией о сохранности человеческой жизни на море СОЛАС [5, 6]. В качестве источников электроэнергии чаще всего используются совместно-параллельно включенные дизель-генераторные агрегаты на главный распределительный щит [7, 8]. Перечень мощностей и номенклатуры потребителей очень широк и определяется типом и назначением судна [9]. Поддержание устойчивой работы электростанции морского судна с выработкой качественной электроэнергии является жизненно важным условием сохранности морского судна и выполнения им своих технологических и производственных задач [10].

Постановка задачи. На морских судах применяется наиболее рациональная с технической и экономической стороны схема производства электрической энергии с параллельной работой нескольких дизель-генераторных агрегатов [11]. Каждый дизель-генератор имеет свой регулятор частоты вра-

щения и регулятор напряжения [12]. Настройки регуляторов определяют распределение нагрузки между агрегатами. В квазиустановившихся режимах эксплуатации электрических силовых комплексов морских судов возникают обменные и синфазные колебания мощности между совместно-параллельно включенными генераторами [11]. Так, например, на морском пароме «Ейск» смонтированы три главных дизеля 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА (рис. 1), зафиксированы обменные (рис. 2) и синфазные (рис. 3) колебания мощности.

Для устранения таких колебаний необходимо осуществлять воздействие на регуляторы частоты вращения и изменять их коэффициенты передачи так, чтобы не нарушалась устойчивая работа электротехнического комплекса судна. Необходимо определить допустимый диапазон изменения коэффициентов усиления частотных регуляторов совместно-параллельно включенных генераторов для сохранения устойчивой работы электростанций морских судов.

Теория. Одной из проблем электротехнических комплексов морских судов по праву считается появление обменных и синфазных колебаний мощности при совместно-параллельном включении дизель-генераторных агрегатов [11]. Такие колебания приводят к ускоренному использованию ресурса частотных регуляторов вращения дизелей, невозможности использования генерирующих устройств на полную мощность, к пульсирующей форме напряжения в электрической сети судна, снижению характеристики полезного действия электрических приводов и систем судовой автоматики, а также не-

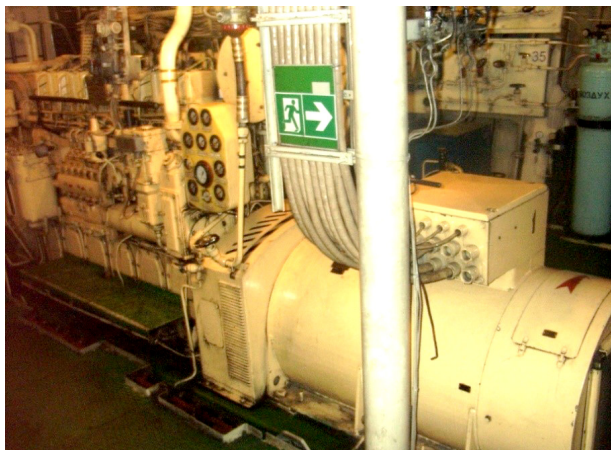


Рис. 1. Дизель-генератор на пароме «Ейск»

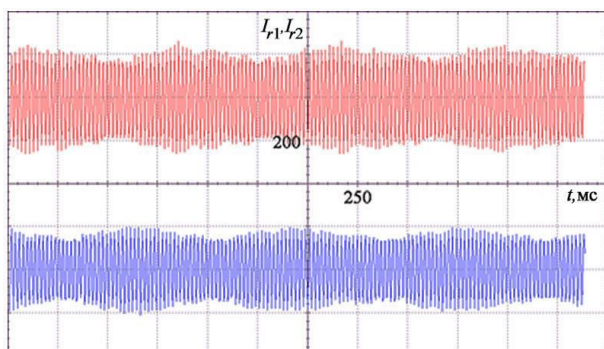


Рис. 2. Токи совместно-параллельно включенных генераторов в квазиустановившемся режиме (обменные колебания мощности)

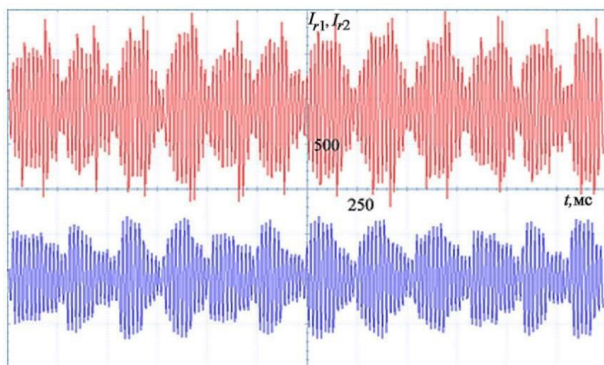


Рис. 3. Токи совместно-параллельно включенных генераторов при работе гребных электродвигателей (синфазные колебания мощности)

гательно сказываются на устойчивости работы всего электротехнического комплекса судна, вплоть до его обесточивания. Очевидно, что нарушение электроснабжения автономного морского объекта может привести к аварийной ситуации и поставить под угрозу безопасность судна и его экипажа.

Для уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности доказана эффективность ступенчатого уменьшения коэффициентов усиления частотных регуляторов вращения дизелей, а для устранения синфазных колебаний мощности необходимо избегать значительного различия этих коэффициентов у параллельно работающих агрегатов [11, 13]. До установки блока устранения обменных колебаний мощности на судно и ввода его в работу

необходимо воспользоваться математическим моделированием и оценить допустимые границы и соотношения при изменении коэффициентов усиления частотных регуляторов [14].

Синхронные генераторы представляются уравнениями Парка–Горева в неподвижных относительно ротора d и q координатах:

$$\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} = \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_{sq}}{d\tau} = -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_f}{d\tau} = u_f - r_f i_f, \quad (3)$$

где ψ_{sd} , u_{sd} , i_{sd} — проекции векторов потокосцепления, напряжения и тока статора на ось d ;

ψ_{sq} , u_{sq} , i_{sq} — проекции векторов потокосцепления, напряжения и тока статора на ось q ;

r_s — сопротивление обмотки статора генератора;

ψ_f — потокосцепление генераторной обмотки возбуждения;

i_f — ток генераторной обмотки возбуждения;

u_f — напряжение генераторной обмотки возбуждения;

r_f — сопротивление генераторной обмотки возбуждения;

τ — время процесса.

$$\psi_{sd} = (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_f, \quad (4)$$

$$\psi_{sq} = (L_q + L_{sq})i_{sq}, \quad (5)$$

$$\psi_f = L_d i_{sd} + L_f i_f, \quad (6)$$

где L_{sd} , L_d — индуктивности рассеяния статорной обмотки и обмотки главного контура намагничивания по оси d ;

L_{sq} , L_q — индуктивности главного контура и обмотки намагничивания по оси q ;

L_f — индуктивность генераторной обмотки возбуждения.

Синхронный генератор имеет бесщеточный возбудитель с пропорциональным регулятором напряжения:

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f(U_0 - u_m)]/T_B, \quad (7)$$

где K_f — коэффициент усиления,

$$u_m = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2},$$

U_0 — заданное значение напряжения.

Дизель опишем уравнением:

$$J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} = M_d - M_g, \quad (8)$$

$$M_d = K_m h, \quad (9)$$

$$M_g = \psi_{sq} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sq}, \quad (10)$$

где J_m — приведенный момент инерции валов дизель-генератора,

M_d — момент дизеля,

M_g — момент генератора,

h — перемещение топливной рейки,

K_m — коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Частотный регулятор дизеля:

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} U_{\varepsilon} - h, \quad (11)$$

где T_{ω} — постоянная времени,
 K_{ω} — коэффициент усиления,
 U_{ε} — разность между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения.

Результаты экспериментов. На рис. 4 представлены результаты исследования математическими методами в виде графиков токов и частот вращения двух совместно-параллельно включенных на шины главного распределительного щита генераторов при значениях коэффициентов передачи их регуляторов частоты вращения $K_{\omega 1} = 80$, $K_{\omega 2} = 40$. На графиках токов видны синфазные колебания мощности с увеличивающейся амплитудой, частоты вращения генераторов при этом стремятся к установившемуся значению. Результаты математического моделирования на рис. 4 аналогичны осциллограммам токов генераторов на пароме «Ейск», представленным на рис. 3.

На рис. 5 представлены результаты математического регулирования в виде графиков токов и частот вращения двух совместно-параллельно включенных на шины главного распределительного щита генераторов при значениях коэффициентов усиления их частотных регуляторов $K_{\omega 1} = 350$, $K_{\omega 2} = 250$. Очевидно наличие синфазных колебаний токов, а значит, и мощностей с нарастающей амплитудой, мгновенные частоты вращения генераторов при этом также растут, что свидетельствует о потере устойчивости в работе судовой электростанции, и приближающемся срабатывании защиты с последующим обесточиванием судна.

Обсуждение экспериментов. Таким образом, изменение коэффициентов усиления частотных регуляторов при совместно-параллельном включении на шины главного распределительного щита дизель-генераторов может привести к возникновению неконтролируемого роста амплитуды синфазных колебаний мощности и частоты вращения. Для обеспечения сохранения устойчивой работы судовой электростанции при изменении коэффициентов усиления частоты проведено математическое моделирование при различных соотношениях значений коэффициентов передачи. Результаты исследу-

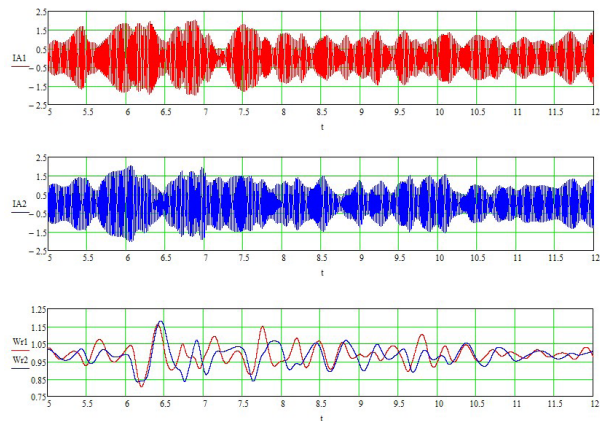


Рис. 4. Результаты исследования совместно-параллельной работы генераторов при $K_{\omega 1} = 80$, $K_{\omega 2} = 40$

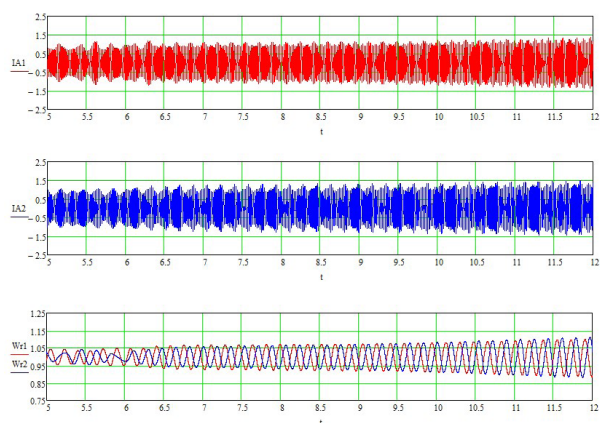


Рис. 5. Результаты исследования совместно-параллельной работы генераторов при $K_{\omega 1} = 350$, $K_{\omega 2} = 250$

ований, при которых сохраняется устойчивая работа судовой электростанции, приведены в табл. 1, а также построена карта настроек на рис. 6.

Видно, что при равенстве коэффициентов передачи регуляторов частоты дизель-генераторов синфазные колебания отсутствуют. Отличие коэффициентов передачи приводит к появлению синфазных колебаний, причем их амплитуда увеличивается с увеличением разницы между значе-

Таблица 1

Исследование зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности дизель-генератора от значений коэффициента усиления частотного регулятора в устойчивых режимах

$K_{\omega 1} / K_{\omega 2}$	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
10	0,01	1,2	1	0,9	0,9	1,2	0,5	0,45	0,4	0,3	0,3
20	1	0,01	0,9	1	1	1	1,1	0,95	0,8	0,75	0,9
40	0,8	0,65	0,05	1	1,1	0,9	1,2	1,2	1,35	1	1,2
60	1,1	0,95	0,95	0,05	0,3	0,9	0,7	0,95	0,95	1,05	1,1
80	1	1	0,8	0,25	0,05	0,25	0,7	1,1	0,9	1	1,3
100	0,6	0,7	1,1	1,1	0,2	0,05	0,22	0,8	0,8	0,6	1,1
120	0,4	1	1,2	1	1,1	0,1	0,06	0,17	1,1	0,8	1,2
140	0,6	1,1	1,2	0,9	0,95	0,22	0,08	0,06	0,17	0,7	1,05
160	1,2	1	1,2	0,7	0,8	0,6	0,25	0,09	0,06	0,17	0,6
180	1,1	1,2	1,05	1,1	1,2	0,75	0,7	0,2	0,07	0,06	0,14
200	1	1,05	0,95	1,05	1,05	0,75	0,7	0,6	0,15	0,06	0,07

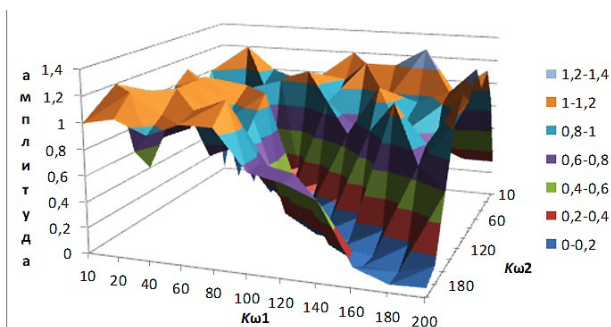


Рис. 6. Карта зависимости значений амплитуды синфазных колебаний мощности от значений коэффициентов усиления частотных регуляторов

ниями коэффициентов передачи. При изменениях коэффициентов передачи в диапазоне от 0 до 200, как, например, на рис. 4, параллельно включенные дизель-генераторы работают устойчиво. При превышении коэффициентами передачи значений наблюдаются синфазные колебания, как, например, на рис. 5, то есть параллельная работа генераторов становится неустойчивой. Данные, приведенные выше, получены для электротехнических комплексов морских судов. Однако они могут быть применены в любой автономной электротехнической системе, в которой используется встречно-параллельное включение дизель-генераторных агрегатов. Конечно, условия работы морского судна являются полностью автономными, что делает работу его электротехнического комплекса исключительно важной, но и в наземных системах могут возникать экстремальные ситуации, при которых жизнедеятельность полностью зависит от электрообеспечения.

Заключение. Исследования продемонстрировали зависимость устойчивости работы судового электротехнического комплекса с встречно-параллельным включением на шины главного распределительного щита дизель-генераторных агрегатов от значений и соотношения коэффициентов усиления частотных регуляторов. На основе результатов математического моделирования можно рекомендовать ограничить изменение коэффициентов усиления частотных регуляторов при параллельной работе в диапазоне 0–200. Такое ограничение необходимо учитывать при изменении коэффициентов усиления частотных регуляторов для устранения обменных колебаний мощности.

Библиографический список

1. Хватов О. С., Тарпанов И. А., Кузнецов П. В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 93–100. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-93-100.
2. Dar'envov A. B., Samoyavchev I., Khvatov O. S. [et al.]. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 108. 14002. DOI: 10.1051/mateconf/201710814002.
3. Sen'kov A. P., Dmitriev B. F., Kalmykov A. N. [et al.]. Ship unified electric-power systems // Russian Electrical Engineering. 2017. Vol. 88 (5). P. 253–258. DOI: 10.3103/S1068371217050108.
4. Губанов Ю. А., Калинин И. М., Корнев А. С. [и др.]. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1-1 (43). С. 103–109.

5. Sipeng Z., Ma Z., Zhang K. [et al.]. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions // Energy. 2020. Vol. 210. 118558. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.
6. Sipeng Z., Ma Z., Deng K. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 120. 109611. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.
7. Geertsma R. D., Visser K., Negenborn R. R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion // Applied Energy. 2018. Vol. 228. P. 2490–2509. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080.
8. Mondejar M. E., Andreasen J. G., Pierobon L. [et al.]. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 126–151. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
9. Грачева Е. И., Ильясов И. И., Алимова А. Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Vol. 20, № 3-4. P. 62–71. EDN: XWBLS P.
10. Ившин И. В., Низамиев М. Ф., Владимиров О. В. [и др.]. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109–114.
11. Савенко А. Е., Голубев А. Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Иваново, 2016. 172 с. ISBN 978-5-00062-196-7.
12. Савенко А. Е., Савенко П. С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 5-6. С. 46–54. EDN: UWONEI.
13. Savenko A. E., Savenko P. S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing // Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020. 2020. P. 400–405.
14. Алейников А. В., Голубев А. Н., Мартынов В. А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. 2017. №. 5. С. 37–43.

САВЕНКО Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» Керченского государственного морского технологического университета (КГМТУ), г. Керчь. SPIN-код: 4120-4999
 AuthorID (РИНЦ): 879584
 ORCID: 0000-0002-1817-8208
 AuthorID (SCOPUS): 57211745303
 Адрес для переписки: savenko-70@mail.ru
САВЕНКО Павел Станиславович, аспирант кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» КГМТУ, г. Керчь. SPIN-код: 2188-9658
 AuthorID (РИНЦ): 1144532
 Адрес для переписки: savenko-70@mail.ru

Для цитирования

Савенко А. Е., Савенко П. С. Устойчивость работы электротехнических комплексов морских судов при изменении настроек регуляторов частоты дизель-генераторов // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 76–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-76-79.

Статья поступила в редакцию 29.11.2022 г.
 © А. Е. Савенко, П. С. Савенко

Г. Ю. КИСЕЛЁВ
В. М. ТРОЦЕНКО
Е. В. ПЕТРОВА
В. А. КРИВОЛАПОВ
С. С. ГИРШИН
А. А. БУБЕНЧИКОВ
В. Н. ГОРЮНОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В данной статье рассмотрена актуальность снижения потерь электрической энергии. Приведены фактические значения и планы снижения потерь электрической энергии в ПАО «Россети» и основных филиалах ПАО «Россети Сибирь». Представлены существующие нормативы потерь в электрических сетях разных уровней напряжения. Рассмотрены возможные пути уменьшения потерь электроэнергии для достижения целевых показателей, установленных «Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года».

Ключевые слова: потребление электроэнергии, потери электроэнергии, стратегия развития, нормативы потерь, программа развития, снижение потерь.

Стремительный рост численности населения, а также быстрые темпы развития различных отраслей промышленности, прямо или косвенно связанных с потреблением электрической энергии, приводят к увеличению потребления электроэнергии.

В соответствии с данными, предоставленными компанией Enerdata мировое потребление электроэнергии с 1990 по 2020 год увеличилось в 2,29 раза [1]. На сегодняшний день компания Enerdata является одной из крупнейших независимых информационно-консалтинговых компаний, основной спецификой работы которой является проведение глобальных исследований энергопотребления в мире.

В соответствии с разбивкой по странам внутреннего потребления электроэнергии за 1990 год [1], самыми крупными потребителями электроэнергии в порядке уменьшения являлись Соединенные Штаты Америки — 2713 ТВтч, Россия — 917 ТВтч, Япония — 775 ТВтч [1].

По состоянию на 2020 год Россия переместилась на четвертое место по потреблению электроэнергии с показателем — 906 ТВтч, Соединенные Штаты Америки переместились на второе место с показателем — 3842 ТВтч, и на первое место со значительным отрывом от других стран вырвался Китай с показателем — 6752 ТВтч. Это связано с тем, что на сегодняшний день Китай является абсолютным лидером по объемам промышленного производства. Большое количество иностранных промышленных комплексов располагается именно на территории Китая [1].

Потребление электроэнергии в России в 2020 году незначительно снизилось в сравнении с 1990 годом. Однако данная тенденция не имеет прямолинейного характера, и в период 90-х годов наблюда-

ется значительное снижение потребления (рис. 1). Так, на 1998 год верхняя отметка электропотребления составляла всего 650 ТВтч. В дальнейшем прослеживается плавный рост электропотребления вплоть до 2019 года с небольшой просадкой в 2009 году [1]. Однако в 2020 году потребление электроэнергии в России сократилось, что напрямую связано с пандемией COVID-19.

Проанализировав тенденцию изменения потребления электроэнергии в мире за период с 1990 по 2020 года (рис. 2), можно отметить, что в 2020 году мировое потребление электроэнергии сократилось на 1,1 % в сравнении с 2019 годом. Это первое снижение с 2009 года, контрастирующее с устойчивым ростом в период с 2009 по 2018 год, который замедлился в 2019 году. В подавляющем большинстве стран пандемия COVID-19 оказала значительное влияние на спрос электроэнергии, в том числе и в Российской Федерации. Интересно отметить, что Китай быстро реабилитировался от кризиса, вызванного пандемией COVID-19. В 2020 году увеличение объема потребляемой электроэнергии в Китае составило 3,1 % [1].

Ввиду колоссального роста потребления электроэнергии требуется незамедлительное увеличение пропускной способности линий электропередач и снижение потерь электроэнергии.

Существующие на сегодняшний день способы экономии электроэнергии не могут в полной мере обеспечить достижения максимально возможных энергетических показателей. Таким образом, необходимо разработать новые способы и подходы к проблеме снижения потерь электроэнергии.

Основные задачи и пути развития энергетики Российской Федерации определены рядом нор-

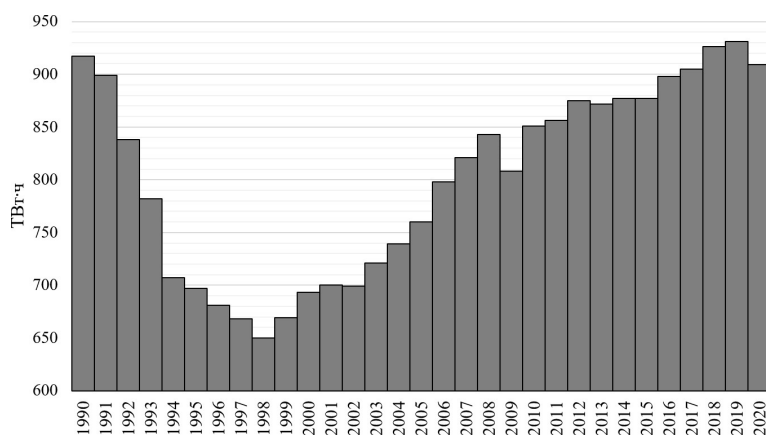


Рис. 1. Тенденция изменения потребления электроэнергии в год за период 1990–2020 в России

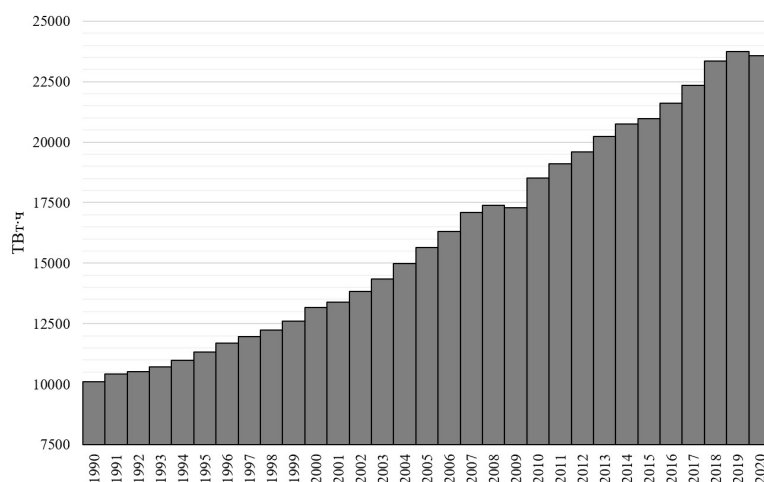


Рис. 2. Тенденция изменения потребления электроэнергии в год за период 1990–2020 в мире

мативных документов Правительства Российской Федерации. Распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» критерием повышения эффективности энергетического комплекса определен уровень потерь электрической энергии в электрических сетях [2]. Согласно намеченной стратегии, к 2024 году уровень потерь электрической энергии в электрических сетях не должен превышать 9,8 %, а к 2035 году потери не должны превышать 7,3 % [2]. Распоряжением Правительства РФ от 03 апреля 2013 № 511-р (ред. от 29 ноября 2017 г.) «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации» в главе 3 «Организация максимально эффективной и соответствующей мировым стандартам сетевой инфраструктуры» установлено, что «Повышение операционной эффективности неразрывно связано с реализацией мероприятий, направленных на снижение потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям» [3]. Постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 321 (ред. от 12 декабря 2022 г.) утверждена государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» [4]. Программой определены цели государственной политики в области энергетики. При этом одной из проблем названы: «высокие потери в электрических сетях, неоптимальная нагрузка генерирующих

мощностей в Единой энергетической системе России», что так же подтверждает необходимость поиска решения отмеченной выше проблемы [4]. Более детальное развитие стратегия получила в Программе инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 годы с перспективой до 2025 года». В главе 2.2 данного документа определено, что одним из направлений является «развитие, модернизация и повышение энергоэффективности ЕНЭС путем снижения потерь в электрической сети [5].

Снижение указанного показателя является важным для развития экономики России. По минимальным экспертным оценкам, потенциал снижения потерь электроэнергии в сетях России находится в пределах 15–25 млрд. кВт·ч в год. [6]. Для стран с устойчивой экономикой международные специалисты считают приемлемыми потери в электросетях в диапазоне от 4 до 5 %. При этом предельный уровень потерь с учетом всех факторов и особенностей транспортировки обозначен в 10 % [7]. При более высоких значениях потерь в сети высока вероятность присутствия также и коммерческих потерь.

В основе представленной ниже информации лежат официальные отчетные сведения о фактических потерях в ПАО «Россети» и в филиалах ПАО «Россети Сибирь», размещенные в открытом доступе. Наибольший потенциал для сокращения потерь заложен в сетях распределительного комплекса. В сети классов напряжения («Россети Сибирь») 0,4–

Нормативы потерь электроэнергии

Отпуск электрической энергии в электрическую сеть/ суммарная протяженность воздушных и кабельных линий электропередачи в одноцепном выражении	Соотношение величины отпуска электрической энергии в электрическую сеть и суммы номинальных мощностей силовых трансформаторов	Доля протяженности воздушных линий электропередачи в одноцепном выражении в суммарной протяженности воздушных и кабельных линий электропередачи в одноцепном выражении	Значение норматива потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций
Высокое напряжение (110 кВ)			
3500 и менее	2 000 и менее	–	5,02
	более 2 000		4,75
более 3500	2 000 и менее		3,33
	более 2 000		2,30
Среднее первое напряжение (35 кВ)			
700 и менее	2 000 и менее	–	5,77
	более 2 000		4,96
более 700	2 000 и менее		5,45
	более 2 000		4,07
Среднее второе напряжение (1–20 кВ)			
–	2 000 и менее	более 30	8,49
	более 2 000		7,36
	2 000 и менее	30 и менее	6,17
	более 2 000		6,08
Низкое напряжение (0,4 кВ и ниже)			
– 30 и менее	более 30		13,49
	10,49		

Таблица 2

Фактические потери электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь»

ПАО «Россети Сибирь»	Уровень потерь электроэнергии, %					
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Алтайэнерго	7,68	7,55	7,17	7,07	6,61	6,52
Бурятэнерго	7,79	7,01	6,74	7,14	11,99	11,37
ГАЭС	16,43	16,84	15,62	15,23	15,11	14,44
Красноярскэнерго	11,3	13,29	11,59	11,18	10,71	9,99
Кузбассэнерго-РЭС	4,14	4,42	4,29	3,97	3,62	3,54
Омскэнерго	7,21	7,25	7,51	6,85	6,99	6,65
Хакасэнерго	2,16	2,14	3,2	7,1	6,78	7,22
Читаэнерго	11,09	10,46	9,85	9,38	8,87	8,78
Итого по ПАО «Россети Сибирь»	6,96	7,36	7,32	7,5	7,55	7,28

Таблица 3

План снижения потерь электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь» в перспективе до 2030 года

ПАО «Россети Сибирь»	Уровень потерь электроэнергии, %					
	2020	2021	2022	2023	2024	2030
Итого по ПАО «Россети Сибирь»	7,28	7,50	7,43	7,34	7,17	5,83

10 (20) кВ потери составляют в среднем 15 % [8, 9], что значительно выше технической составляющей.

В табл. 1 представлены рекомендуемые нормативы потерь электроэнергии, вступившие в силу

в апреле 2018 года [10]. Различные значения нормативов при одном напряжении определяются протяженностью линии электропередачи, величиной отпуска электроэнергии, а также значениями номи-

Уровень потерь электрической энергии по ДЗО в ПАО «Россети»

Наименование ДЗО	Уровень потерь электрической энергии, %							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020 план	2020 факт	2021 план
Россети Центр	9,35	9,36	9,86	10,6	10,26	9,83	9,83	9,43
Россети Центр и Приволжье	9,07	8,97	7,98	7,84	7,49	7,24	7,93	7,31
Россети Волга	6,7	6,77	6,6	6,48	6,33	6,13	6,12	6,14
Россети Северо-Запад	6,38	6,22	6,07	6,59	6,32	6,22	6,22	5,11
Россети Томск	8,28	8,14	8,27	9,00	8,88	8,66	9,09	10,14
Россети Урал	7,89	7,98	7,73	7,42	7,11	7,03	6,95	6,71
Россети Юг	9,83	10,06	9,48	9,80	9,01	8,85	8,85	8,99
Россети Северный Кавказ	21,84	23,08	21,78	19,98	18,9	17,92	23,23	18,26
АО «Чеченэнерго»	40,32	34,00	34,49	35,87	36,8	28,17	34,09	26,00
Россети Кубань	12,87	12,96	12,06	11,25	10,62	10,51	10,04	10,50
Россети Московский регион	8,55	8,33	8,24	8,10	7,67	7,68	7,53	7,53
Россети Ленэнерго	12,21	10,91	11,47	11,34	10,82	10,88	10,87	10,50
Россети Сибирь	7,26	7,68	7,63	7,81	7,82	7,76	7,53	7,69
Россети Тюмень	2,54	2,54	2,61	2,84	2,66	2,6	2,67	2,49
Россети Янтарь	18,44	16,99	15,47	12,57	11,46	12,19	10,12	8,71
Итого по ПАО «Россети»	9,64	9,65	9,22	8,95	8,57	8,58	8,64	8,60

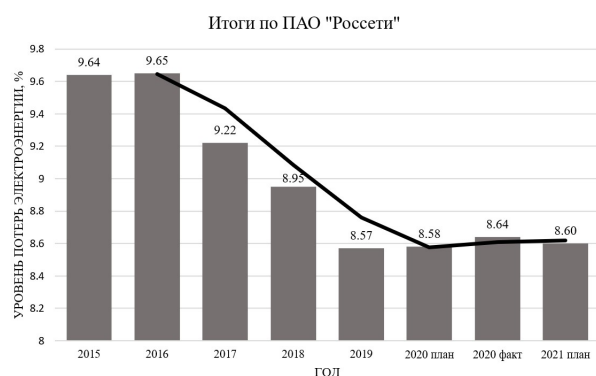


Рис. 3. Уровень потерь электрической энергии в ПАО «Россети» с 2015 по 2021 год

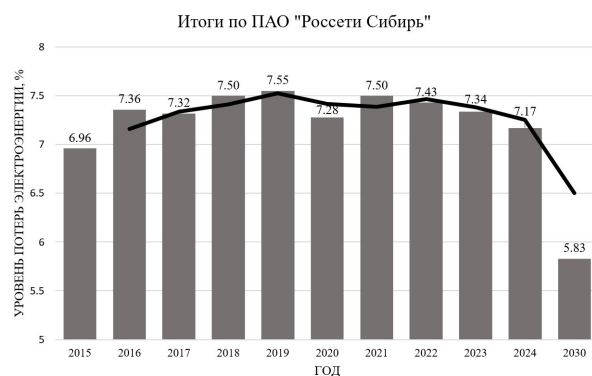


Рис. 4. Уровень потерь электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь» с 2015 по 2030 год

нальных значений параметров силовых трансформаторов.

В соответствии с годовыми отчетами ПАО «Россети Сибирь» [11] в табл. 2 представлен уровень фактических потерь электроэнергии за последние 6 лет в основных филиалах, а в табл. 3 представлен план снижения потерь электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь» в перспективе до 2030 года, утвержденный программой инновационного развития [12].

В соответствии с годовыми отчетами ПАО «Россети» [13] в табл. 4 представлен уровень фактических потерь электроэнергии за последние 6 лет во всех дочерних и зависимых обществах, а также представлен план на 2021 год. По итогам уровень потерь электроэнергии в 2020 году составил 8,64 %, что выше уровня 2019 года [13].

Результирующие потери электроэнергии по всем ДЗО ПАО «Россети» и основным филиалам ПАО «Россети Сибирь» представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Анализ таблиц показывает аномально высокие потери электроэнергии в ДЗО

«Россети Северный Кавказ», АО «Чеченэнерго», в филиале «ГАЭС» и в незначительной мере в ряде других компаний.

Выводы и заключение. Из таблиц и диаграмм видно, что необходимо вводить мероприятия по снижению потерь электроэнергии. Особенно актуальным является проведение мероприятий технического и организационного характера, направленных на снижение технологических и коммерческих потерь в целом по ПАО «Россети», а также по отдельным сетевым компаниям, в которых потери аномально высоки. В 2020 году потери составили 8,64 % [13], а план по потерям в 2020 году составлял — 8,56 %. Чрезвычайно важна работа по уменьшению потерь в сетях низкого напряжения.

Существует как минимум два пути решения данной проблемы. Первый предложен ПАО «Россети Сибирь» и представляет собой следующую проводимую работу:

1) установка интеллектуальных приборов коммерческого учета электрической энергии, пресечение безучетного потребления энергии, снижение

затрат на собственные нужды, а также изменение конфигурации сети и реконструкция;

2) дальнейшая положительная динамика по снижению потерь будет осуществляться на основе внедрения информационной системы комплексного учета электроэнергии в рамках Программы «Цифровая трансформация сетей 2030» [14];

3) реализация мероприятий Программы по снижению потерь в сетевом комплексе ПАО «Россети» (утверждена в 2017) определяла выход на уровень зарубежных компаний в 2021 году [9].

Второй путь уменьшения потерь связан с повышением точности расчета потерь электроэнергии за счет учета тепловых процессов [15–20].

На кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» в Омском государственном техническом университете на базе проведенных исследований созданы программные продукты, обеспечивающие расчет потерь электрической энергии, допустимых токов, а также температуры изолированных, неизолированных и высокотемпературных проводов при вариации погодных условий и нагрузки [21–26].

Примерами таких программ, зарегистрированных в Федеральном институте промышленной собственности (ФИПС) с июня по декабрь 2019 года, являются следующие программы:

- тепловой расчет изолированного провода;
- определение потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий с учетом погодных изменений;
- расчет потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий электроэнергетических систем в условиях естественной конвекции с учетом погодных факторов.

Библиографический список

1. Статистический ежегодник мировой энергетики 2020 // Enerdata. URL: <https://yearbook.enerdata.ru> (дата обращения: 26.12.2022).
2. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
3. Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации: распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р (ред. от 29 ноября 2017 г.). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
4. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики»: постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 321 (ред. от 12 декабря 2022 г.). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
5. Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 гг. с перспективой до 2025 г. // ПАО «Россети». URL: https://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation_program.pdf (дата обращения: 26.12.2022).
6. Воротницкий В. Э. Системное решение ключевых проблем электроэнергетики России требует активного участия государства // Энергоэксперт. 2020. № 4. С. 25. EDN: ORLFSR.
7. Шведов Г. В., Сипачева О. В., Савченко О. В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение. Москва: Издат. дом МЭИ, 2013. 424 с. ISBN 978-5-383-00832-4.
8. Глава «Россетей» Павел Ливинский о выборе между инвестициями и миноритариями: «нужно узаконить дивиденды в тарифе». URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3683044> (дата обращения: 26.12.2022).
9. Петухов К. Ю. В сетях с низким уровнем потерь высокая надежность // Российские сети. 2017. № 2. С. 4.
10. Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций: Приказ Минэнерго России от 26 сентября 2017 г., № 887. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
11. Годовые отчеты // ПАО «Россети Сибирь». URL: <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/> (дата обращения: 26.12.2022).
12. Программа инновационного развития ПАО «Россети Сибирь» на 2020–2024 гг. с перспективой до 2030 г. // ПАО «Россети Сибирь». URL: https://www.rosseti-sib.ru/upload/medialibrary/c28/Programma_innovacionnogo_razvivitiya.pdf (дата обращения: 26.12.2022).
13. Годовые отчеты // ПАО «Россети». URL: <https://www.rosseti.ru/investors/info/year/> (дата обращения: 26.12.2022).
14. Концепция цифровая трансформация 2030 // ПАО «Россети». URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения: 26.12.2022).
15. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.]. A mathematical model of steady-state thermal regime of insulated overhead line conductors // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), June 7–10, 2016. Florence, 2016. 7555481. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481.
16. Girshin S. S., Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V. [et al.]. Mathematical model of electric energy losses calculating in crosslinked four-wire polyethylene insulated (XLPE) aerial bundled cables // 2016 ELEKTRO, Strbske Pleso. 2016. P. 294–298. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084.
17. Girshin S. S., Gorjunov V. N., Bigun A. Ya. [et al.]. Overhead power line heating dynamic processes calculation based on the heat transfer quadratic model // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819013.
18. Girshin S. S. Simplified formula for the load losses of active power in power lines taking into account temperature // Przegląd Elektrotechniczny. 2019. Vol. 95, no. 7. P. 42–46. DOI: 10.15199/48.2019.07.10.
19. Girshin S. S., Bigun Ya., Petrova E. V. [et al.]. Effect of solar radiation on power losses and capacity of insulated and non-insulated wires of overhead power LINES // Przegląd Elektrotechniczny. 2020. Vol. 96, no. 6. P. 59–63. DOI: 10.15199/48.2020.06.11.
20. Воротницкий В. Э. Снижение потерь электроэнергии — важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // Энергосбережение. 2014. № 3. С. 61–64.
21. Гиршин С. С., Петрова Е. В., Ткаченко В. А. [и др.]. Тепловой расчет изолированного провода: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019616964 от 03.06.2019.
22. Гиршин С. С., Ткаченко В. А., Петрова Е. В. [и др.]. Расчет потерь электрической энергии в неизолированных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий в условиях вынужденной конвекции с учетом температуры токопроводящих жил: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019618752 от 04.07.2019.
23. Гиршин С. С., Петрова Е. В., Ткаченко В. А. [и др.]. Расчет потерь электрической энергии в неизолированных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий в условиях естественной конвекции с учетом температуры токопроводящих жил: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019619358 от 16.07.2019.

25. Петрова Е. В. Определение потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий с учетом погодных изменений: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019660200 от 02.08.2019.

26. Петрова Е. В. Расчет потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий электро-энергетических систем в условиях естественной конвекции с учетом погодных факторов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019619360 от 16.07.2019.

КИСЕЛЁВ Глеб Юрьевич, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1041-3934

AuthorID (РИНЦ): 1045461

Адрес для переписки: gleb_970519@mail.ru

ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: krivolapov_vladislav@mail.ru

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

ORCID: 0000-0002-0650-1880

Адрес для переписки: stansg@mail.ru

БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4357-5273

AuthorID (РИНЦ): 512777

ORCID: 0000-0002-2923-1123

AuthorID (SCOPUS): 57188871772

ResearcherID: D-7850-2014

Адрес для переписки: privetomsk@mail.ru

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

Для цитирования

Киселёв Г. Ю., Троценко В. М., Петрова Е. В., Криволапов В. А., Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Горюнов В. Н. Потери электрической энергии в электрических сетях // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 80–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-80-85.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023 г.

© Г. Ю. Киселёв, В. М. Троценко, Е. В. Петрова,

В. А. Криволапов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков,

В. Н. Горюнов

РАСЧЕТ ДОБАВОЧНОГО ШУНТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯТОРОВ

Цель исследования произвести обзор существующих устройств и методов для диагностики и мониторинга состояния высоковольтной изоляции, которая играет важную роль в критерии надежности энергосистемы. Одним из основных методов диагностики изоляторов является визуальный осмотр. На данный момент широкое распространение завоевали онлайн-методы, позволяющие зафиксировать процесс разрушения изоляции под напряжением. Несмотря на существование различных методов и устройств, проблема своевременного обнаружения ухудшения состояния изоляции в режиме эксплуатации на данный момент не решена. Данная задача была решена использованием добавочной конструкции шунта. При достижении поставленной задачи применялся метод расчета прочностного анализа добавочного шунта, а также выполнено моделирование данного процесса в программе ANSYS. В результате исследования с данной конструкцией шунта проведен ряд экспериментов, которые подтвердили его работоспособность. Благодаря наличию шунта удалось зафиксировать токи утечки порядка нескольких десятков микроампер. Таким образом, авторы предлагают датчик тока, который выполнен в виде добавочного резистивного шунта.

Ключевые слова: изолятор, переменное напряжение, ток утечки, резистивный шунт.

Введение. Изоляция, как и проводник, является неотъемлемой частью всех электрических машин и аппаратов. В воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП) есть естественная часть изоляции — воздух и искусственная — стеклянные, фарфоровые и полимерные изоляторы. Во время работы электроустановок происходит старение изоляции [1]. Поскольку запас электрической прочности довольно большой, то процесс старения идет от 3 до нескольких десятков лет. И может проявляться как возникновение небольших токов утечек, так и пробой с разрушением [2].

В настоящее время для повышения эффективности передачи электроэнергии и безопасности жизни людей разрабатывают различные дистанционные системы мониторинга и диагностики воздушных ЛЭП [3–4]. В [5] предложена система онлайн-мониторинга и диагностики состояния воздушных линий на средний класс напряжений с применением искусственного интеллекта. Она состоит из линейных датчиков, которые измеряют электрические параметры и по радиосвязи в режиме реального времени передают данные на подстанцию для дальнейшей обработки. В [6] особое внимание уделяют процессу диагностики состояния линий электропередачи с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Авторы статьи [7] предлагают

усовершенствованный алгоритм метода обнаружения дефектов изоляторов путем качественной обработки полученных изображений (аэрофотоснимков) с БПЛА. В [8] описан метод обнаружения дефектных изоляторов по анализу оптических изображений. Сначала идентифицируют повреждённый изолятор среди всех, а после — осуществляют поиск места дефекта с применением сегментации исследуемого объекта и преобразованием характеристик пространства вокруг него. Авторы источника [9] исследуют подвесные изоляторы по измерению тока утечки и анализу его гармонических составляющих для определения уровня загрязнений гирлянд изоляторов. Также в источниках [10, 11] по параметрам: ток утечки, коэффициент диэлектрических потерь, емкость, электрический заряд диагностируют фарфоровые изоляторы на предмет загрязнения и, как следствие, определяют процесс уменьшения электрической прочности изолятора. В статье [12] авторы для непрерывного мониторинга изоляторов используют метод, в основе которого лежит определение уровня электромагнитного излучения с учетом параметров окружающей среды.

В рамках перехода энергетического сектора к цифровизации и автоматизации [13] актуальной задачей является создание устройств мониторинга и диагностики воздушной ЛЭП, которые позволят

спрогнозировать проблемные ситуации в локальном сегменте линии, заблаговременно, оперативно и точно устранить их. Известно [14] автоматическое детекторное устройство для контроля состояния изоляторов воздушной линии, которое измеряет и анализирует ток утечки изолятора по двум показателям: коэффициент гармоник и косинус разности фаз между сигналами напряжения и тока утечки. Прибор состоит из приемника и передатчика, которые для связи используют радиосигнал. Недостаток данного устройства заключается в большом количестве данных, которые нужно обрабатывать.

В устройстве, описанном в [15], представлен оптоволоконный датчик, измеряющий четыре параметра: ток утечки, температуру, влажность и точку росы в разных трех местах линии электропередачи. Устройство передает информацию на сервер о состоянии изоляторов на 500 кВ в режиме реального времени через сеть сотовой связи (GPRS). Доступ к информации можно получить по интернету. Недостаток метода — большой объем передачи и обработки данных.

В другом устройстве [16] приведён датчик напряжения для дистанционного контроля целостности высоковольтной изоляции. Он устанавливается на фазном проводе воздушной линии и не имеет электрического соединения с землей. Датчик измеряет падение напряжения на каждом изоляторе гирлянды и по беспроводной сети непрерывно передает информацию о значении напряжения. Так как устройство оптоэлектронное, то имеет ряд преимуществ: отсутствует нагрузочный эффект вторичного замыкания и потери; полоса пропускания обеспечивает более быструю реакцию на всплеск и переходные токи; надежная изоляция между высоким напряжением и вторичной измерительной цепью. Недостатком устройства является влияние продольного магнитооптического эффекта Фарадея.

Таким образом, диагностика и мониторинг состояния изоляторов является актуальной задачей в настоящее время.

Постановка задачи. Проблема состоит в своевременном определении уменьшения до критического значения остаточного ресурса изоляции в режиме эксплуатации. Для решения задачи предлагается последовательно с изолятором включить специальный резистивный шунт. В данной статье описана конструкция шунта, приведен расчет на его механическую прочность, электротехнический расчет. Практическая значимость работы обусловлена в применении рассчитанного шунта, который входит в состав несложного диагностического устройства, для использования в энергетических компаниях в рамках цифровизации сетей и подстанций.

Устройство и принцип работы предлагаемого датчика тока. Для диагностики изоляторов авторы ранее предложили датчик тока в виде высокоомного шунта [17, 18]. Благодаря последовательному подключению шунта с изолятором и подсоединив параллельно к шунту диагностическое устройство, следит за током утечки изолятора под напряжением и без прямого участия персонала.

В качестве самого простого диагностического устройства (рис. 1) может быть измерительное реле напряжения KV1 (чувствительный нуль-орган), подключаемое параллельно шунту, которое срабатывает при превышении критического значения тока утечки $I_{\text{ут.кр}}$. Падение напряжения на шунте в этом случае превышает уставку KV1 — $U_{\text{с.р}}$, что позволяет сработать реле и показать повреждающийся

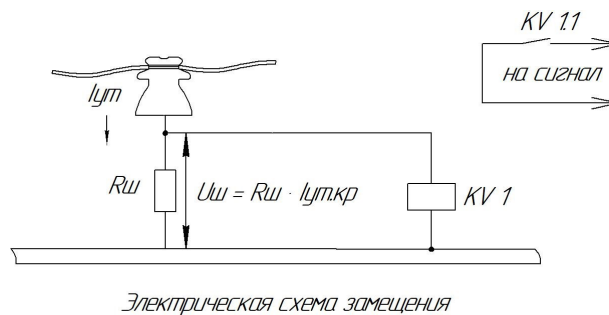


Рис. 1. Подключение измерительного реле напряжения KV1

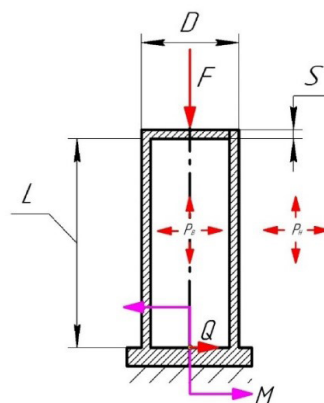


Рис. 2. Механические параметры участка трубы

изолятор. Так как процесс повреждения изолятора происходит медленно, не всегда быстро и лавинообразно, то у персонала есть время для его замены. Это позволяет своевременно исключить повреждение опорного или штыревого изолятора с возникновением короткого замыкания (КЗ) в системе с заземленной нейтралью или однофазного замыкания на землю в системе с изолированной нейтралью.

Расчет и проверка механической прочности. Чтобы не снижать надежность введением дополнительного элемента (шунта) в конструкцию ВЛЭП и не ослаблять механическую стойкость штыревых изоляторов, далее представлен расчет механической прочности высокоомного шунта в соответствии с нормативной документацией (рис. 2).

Значения для исходных параметров (табл. 1) получены из ГОСТ 14249 – 89:

$$I_{np} = L \cdot \mu = 280 \text{ мм}, \quad (1)$$

где L — длина стержня, на который крепится изолятор;

μ — коэффициент приведенной длины.

Гибкость определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{2,83 \cdot I_{np}}{D + (s - c)} = 52,8, \quad (2)$$

где I_{np} — приведенная расчетная длина трубы;

D — наружный диаметр трубы;

$(s - c)$ — расчетная толщина стенки трубы.

Значения исходных параметров для механического расчета

	Исходные данные	Обозначения	Значения	Ед.изм.
1	Модуль упругости стали	E	199 000	МПа
2	Допускаемые напряжения стали	$[\sigma]$	154	МПа
3	Коэффициент запаса устойчивости	n_y	2,4	—
4	Коэффициент приведенной длины	μ	2,0	—
5	Коэффициент прочности сварного продольного шва	φ_p	0,65	—
6	Наружный диаметр трубы	D	20	мм
7	Толщина стенки трубы	s	5,0	мм
8	Расчетная длина трубы	L	140	мм
9	Осевое сжимающее усилие	F	35,0	Н

Безразмерный коэффициент:

$$B_1 = \min \left(1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}} \right) = 0,095. \quad (3)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление следует рассчитывать по формуле:

$$[p]_B = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = 66,7 \text{ Мпа}, \quad (4)$$

где φ_p — коэффициент прочности сварного продольного шва;

σ — допускаемое напряжение стали.

Допускаемое наружное давление из условия прочности следует рассчитывать по формуле:

$$[p]_H = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s-c)}{D + (s-c)} = 102,7 \text{ Мпа}. \quad (5)$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D}{n_y \cdot B_1 \cdot l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 22813,1 \text{ Мпа}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости стали;

B_1 — безразмерный коэффициент;

n_y — коэффициент запаса устойчивости.

Коэффициент запаса устойчивости при расчете сосудов и аппаратов на устойчивость по нижним критическим напряжениям в пределах упругости следует принимать:

2,4 — для рабочих условий;

1,8 — для условий испытания и монтажа.

Допускаемое наружное избыточное давление:

$$[p]_H = \frac{[p]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_H}{[p]_E} \right)^2}} = 102,7 \text{ Мпа}, \quad (7)$$

где $[p]_H$ — допускаемое наружное давление по прочности;

$[p]_E$ — допускаемое наружное давление по устойчивости.

Допускаемое осевое сжимающее усилие по прочности:

$$[F]_H = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 36285,4 \text{ Н}. \quad (8)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_{E_1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D^2}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 45438976,4 \text{ Н}. \quad (9)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие по общей устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_{E_2} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 = 69094,9 \text{ Н}. \quad (9.1)$$

Допускаемое осевое усилие по устойчивости:

$$[F]_E = \min \{ [F]_{E_1}; [F]_{E_2} \} = 69094,9 \text{ Н}. \quad (10)$$

Допускаемое осевое усилие:

$$[F] = \frac{[F]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_H}{[F]_E} \right)^2}} = 32125,0 \text{ Н}. \quad (11)$$

Допускаемый изгибающий момент по прочности:

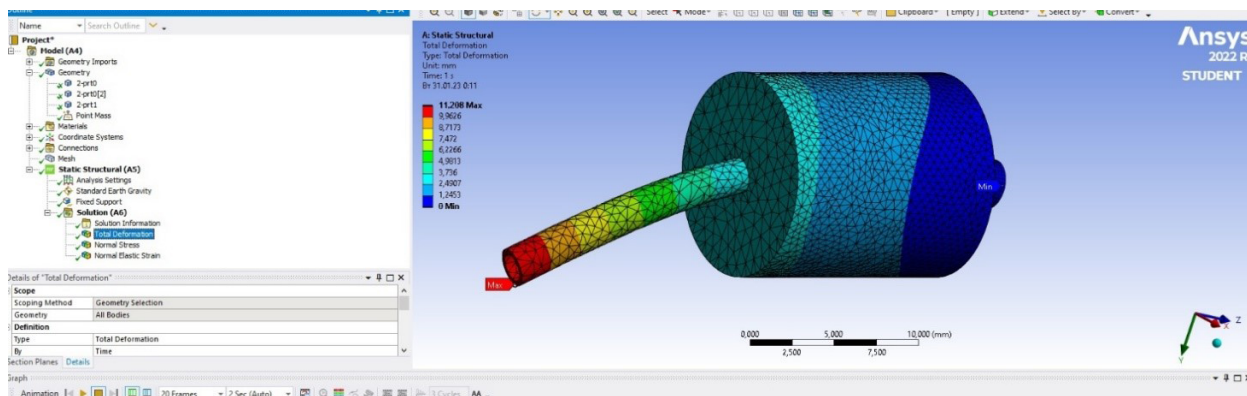
$$[M]_H = \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 90,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (12)$$

Допускаемый изгибающий момент по устойчивости в пределах упругости:

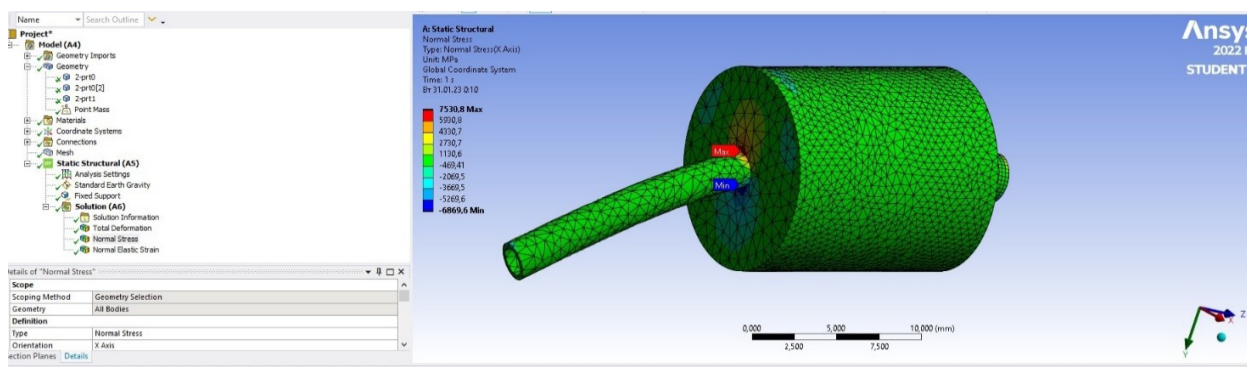
$$[M]_{E_1} = \frac{89 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D^2}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s-c)}{D} \right]^{2,5} = 1304538 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (13)$$

Допускаемый изгибающий момент:

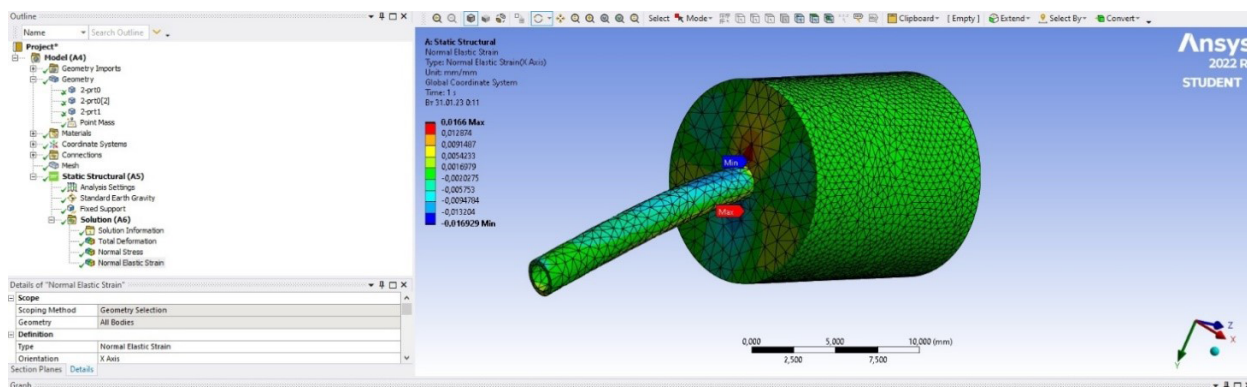
$$[M] = \frac{[M]_H}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_H}{[M]_{E_1}} \right)^2}} = 90,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (14)$$



а)



б)



в)

Рис. 3. Модель конструкции шунта в пакете ANSYS: а) общая деформация шунта, б) механическое напряжение в шунте, в) механическая деформация

Допускаемое поперечное усилие по прочности:

$$[Q]_n = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = 6047,6 \text{ Н.} \quad (15)$$

Допускаемое поперечное усилие по устойчивости в пределах упругости:

$$[Q]_E = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot [0,18 + 3,3 \cdot \frac{D \cdot (s - c)}{I^2}] = 937381,4 \text{ Н.} \quad (16)$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_n}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_n}{[Q]_E}\right)^2}} = 6047,4 \text{ Н.} \quad (17)$$

Для проверки на устойчивость при совместном действии на объект наружного давления, осевого

сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия необходимо выполнение условия:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \leq 1,0. \quad (18)$$

При расчете суммарного коэффициента по правой части формулы (18) дополнительно учли воздействие груза массой 36 кг:

$$0,01 \leq 1,0.$$

Таким образом, условие устойчивости даже с дополнительным грузом массой в 36 кг выполняется, следовательно, конструкция шунта соответствует нормам.

Для подтверждения механической прочности изготовленного шунта при помощи программного пакета КОМПАС 3D была построена его сборка. Она

выполняла функцию геометрической модели при расчете механики деформируемого твердого тела в статической постановке (Static Structural) в программном комплексе ANSYS. При помощи команды Mesh методом конечных элементов была выстроена модель тела, количество элементов в структуре составило 26231, где шаг сетки 0,5 мм. Также были заданы параметры модели: контакт на стенках шунта — воздух при температуре 25 °С. На шунт действует параметр: Standard Earth Gravity (стандартная гравитация): 9,8 м·с⁻². В модели были заданы параметр Fixed Support — жесткая заделка (ограничение всех степеней свободы) и параметр Point mass: 36 кг. Выполнение расчетов производилось с учетом расстановки сил, а также задания нагрузки на точку в конце шунта. При моделировании были использованы три операции:

Total Deformation — общая деформация шунта (максимальное значение составило 11,2 мм, минимальное значение 0 мм);

Normal Stress — механическое напряжение в шунте (максимальное значение составило 7530,8 МПа, минимальное значение — 6869,6 МПа);

Normal Elastic Strain — механическая деформация (максимальное значение составило 0,0166 мм, минимальное значение — 0,016929 мм), результаты которых представлены на рис. 3а, б и в соответственно. Таким образом, при воздействии груза массой 36 кг деформация шунта незначительна, соответственно, он должен её выдержать.

После моделирования был проведен эксперимент с использованием стержня в стене, конструкции шунта, изолятора, крепления и груза весом 36 кг (рис. 4).

Электротехнические экспериментальные исследования. В лаборатории был проведен ряд экспериментов с разработанной конструкцией шунта и диагностическим устройством.

В соответствии с [19] сопротивление изолятора должно быть не меньше 300 МОм. При напряжении 6 кВ, ток утечки составляет:

$$I_{ут} = \frac{U_c}{R_{из}} = \frac{6000}{300000000} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ А.} \quad (19)$$

U_c — напряжение сети, В;

$R_{из}$ — сопротивление изолятора, Ом.

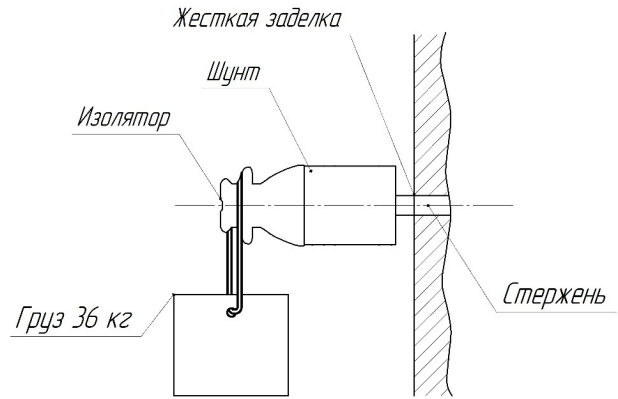


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для проверки механической прочности

В таком случае падение напряжения на шунте с сопротивлением 17,9 кОм составит:

$$U_{ш} = R_{ш} \cdot I_{ут} = 17900 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 0,358 \text{ В.} \quad (20)$$

Чтобы иметь запас по чувствительности ($k_q = 1,5$), несколько уменьшим уставку напряжения срабатывания и положим $U_{ср} = 0,24 \text{ В}$.

Для подачи переменного напряжения применяли источник переменного напряжения АИД-70М. Активное сопротивление шунта $R = 17,9 \text{ кОм}$. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 5. Критическое значение тока утечки:

$$I_{ут.кр} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} = \frac{0,24}{17900} = 13,4 \cdot 10^{-6} \text{ А.} \quad (21)$$

В ходе проведения физического эксперимента были исследованы дефектный и здоровый штыревые изоляторы марки ШФ-10Г. Дефект был выполнен в виде вертикального скола глазури изолятора, заполненного графитом. При подаче напряжения 10 кВ диагностическое устройство сработало только при подключенном дефектном изоляторе. Ток утечки составил 37,4 мкА, следовательно, его сопротивление рассчитаем по формуле:

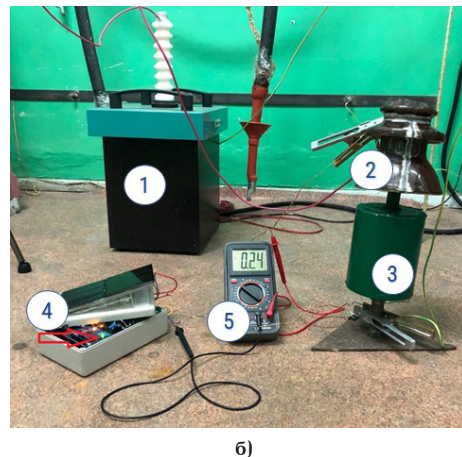
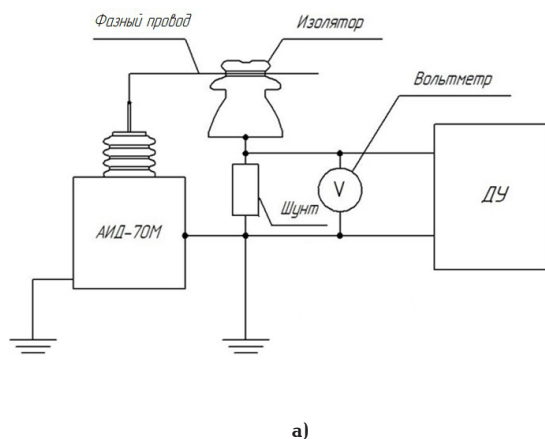


Рис. 5. Электротехническая схема экспериментального исследования:
а) блок-схема исследования; б) фотография экспериментального исследования:
1 — АИД-70М, 2 — штыревой изолятор, 3 — высокоомный шунт, 4 — ДУ, 5 — вольтметр

$$R_{\text{из.ДЕФ}} = \frac{U_C - U_{\text{ш}}}{I_{\text{ут}}} = \frac{10000 - 0,24}{37,4 \cdot 10^{-6}} = 267373262 \text{ Ом.} \quad (22)$$

Таким образом, значение сопротивления оказалось меньше допустимого, что подтвердило наличие ухудшения состояния изоляции.

Методика осуществления дистанционного контроля старения опорного, штыревого изоляторов в режиме эксплуатации имеет следующие этапы:

1) определение падения напряжения на шунте $U_{\text{ш}}$ при помощи диагностического устройства;

2) оценка тока утечки $I_{\text{ут}}$;

3) при превышении порогового значения $I_{\text{ут}}$ и срабатывании диагностического устройства при заданной уставке произвести замену изолятора.

Обсуждение результатов. В процессе моделирования конструкции шунта, при воздействии механических сил, уязвимым местом (выделена красным цветом на рис. 3в) являлась область сварного шва. При воздействии груза массой 36 кг, соответственно, силы 352,8 Н, отклонение при деформации составило 0,0166 мм, что является допустимым для нормальной работы шунта. При подвешивании груза весом 36 кг конструкция шунта визуально не деформировалась.

Последовательно подключенный шунт с изолятором позволил диагностическому устройству снять падение напряжения с шунта и при известном активном сопротивлении рассчитать ток утечки. Значения тока утечки были порядка нескольких десятков микроампер, диагностическое устройство сработало и показало о несоответствии сопротивления изолятора.

Таким образом, экспериментальный образец шунта обладает достаточной механической прочностью и экспериментально подтверждена его работоспособность под напряжением.

Заключение. Изоляторы являются одним из важнейших элементов, которые обеспечивают надежность энергетической системы в целом. Отказ изолятора вызывает значительные материальные потери, которые в несколько раз превышают его стоимость. При возникновении отказов линии электропередачи потребители могут на значительное время остаться без электроэнергии. Таким образом, диагностика изоляторов имеет важное значение в обеспечении надежности электроснабжения. Существующие методы диагностики изоляторов сложны, требуют наличия опытного персонала и возможности онлайн-измерений.

В работе представлен простой метод диагностики и мониторинга штыревых и опорных изоляторов за счет измерения тока утечки. Когда изолятор находится под высоким напряжением, через него протекает ток утечки. Величина этого тока зависит от состояния изолятора и условий окружающей среды. При наличии повреждений или загрязнений ток утечки изолятора в процессе старения увеличивается, тем самым ускоряется процесс разрушения изоляции. Постоянное длительное воздействие тока утечки вызывает нагрев, ускоряет процессы старения изолятора и уменьшает его диэлектрическую прочность. Для мониторинга данного параметра авторами был разработан высокоомный шунт для диагностики штыревых и опорных изоляторов. Произведен для шунта механический расчет. Проведены экспериментальные электротехнические

высоковольтные исследования, в которых добавочный шунт прошёл лабораторные испытания.

Библиографический список

1. Valeriy I., Iosif B. Predicting the service life of high-voltage insulators using actual leakage current values // *Current Science*. 2022. Vol. 122, № 4. P. 455–460.
2. Salem A. A., Lau K. Y., Rahima, W. [et al.]. Leakage current characteristics in estimating insulator reliability: experimental investigation and analysis // *Scientific reports*. 2022. Vol. 12, № 1. P. 1–21. DOI: 10.1038/s41598-022-17792-x.
3. Иванов, Д. А., Голенищев-Кутузов, А. В., Галиева, Т. Г. и др. Система мониторинга состояния высоковольтной изоляции // *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения): материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 140-летию изобретения электросварки Н. Н. Бенардосом, 02–04 июня 2021 г. Иваново, 2021. С. 81–84.*
4. Пат. 2753811 Российская Федерация, МПК G01R 31/12. Способ и устройство бесконтактного дистанционного контроля технического состояния высоковольтных линейных изоляторов воздушных линий электропередач / Катков В. И., Евдокимов Ю. К., Сагдиев Р. К., Охоткин Г. П. № 2020126832; заявл. 29.04.20; опубл. 23.08.21, Бюл. № 24.
5. Hashmi G., Aljohani K., Kamarudin J. Intelligent Fault Diagnosis for Online Condition Monitoring of MV Overhead Distribution Networks // *2022 4th International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAD)*. 2022. Vol. 1. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICAAD51067.2022.9799512.
6. Luo Y., Yu X., Yang D. [et al.]. A survey of intelligent transmission line inspection based on unmanned aerial vehicle // *Artificial Intelligence Review*. 2022. P. 1–29. DOI: 10.1007/s10462-022-10189-2.
7. Qiu Z., Zhu X., Liao C. [et al.]. Detection of Transmission Line Insulator Defects Based on an Improved Lightweight YOLOv4 Model // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 3. 1207. DOI: 10.3390/app12031207.
8. Zhang Z., Huang S., Li Y. [et al.]. Image detection of insulator defects based on morphological processing and deep learning // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 7. 2465. DOI: 10.3390/en15072465.
9. Villalobos R. J., Moran L. A., Huenupán F. [et al.]. A New Current Transducer for On-Line Monitoring of Leakage Current on HV Insulator Strings // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 78818–78826. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3191349.
10. Dolník B., Šárpatky L., Kolcunová I. [et al.]. Sensing Method Using Multiple Quantities for Diagnostic of Insulators in Different Ambient Conditions // *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 4. 1376. DOI: 10.3390/s22041376.
11. Li Z., Ding L., Liu J. UV detection technology of insulator discharge based on UAV platform // *2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)*. 2022. P. 261–265. DOI: 10.1109/EEBDA53927.2022.9744897.
12. Галиева Т. Г., Иванов Д. А., Садыков М. Ф. [и др.]. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24, № 4. С. 165–177. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177.
13. Баринаева В. А., Девятова А. А., Ломов Д. Ю. Роль цифровизации в глобальном энергетическом переходе и в российской энергетике // *Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика*. 2021. Т. 16, № 4. С. 126–145.
14. Palangar M. F., Mohseni S., Mirzaie M. [et al.]. Designing an automatic detector device to diagnose insulator state on overhead distribution lines // *IEEE Transactions on Industrial*

Informatics. 2021. Vol. 18, № 2. P. 1072–1082. DOI: 10.1109/ТИ.2021.3073685.

15. Werneck M. M., Pinto P. H. S., Bellini R. T. [et al.]. Optical Sensor for Monitoring Leakage Current and Weather Conditions in a 500-kV Transmission Line // *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 13. 5034. DOI: 10.3390/s22135034.

16. Andreenkov E., Shunaev S. Sensor design for the diagnostic system of hanging isolated power grids // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076288.

17. Пат. 2020136129 Российская Федерация, МПК H01C 3/00. Конструкция шунта для диагностики опорных и штырьевых изоляторов воздушной линии электропередач / Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Поляков Д. А., Никитин К. И. № 2020136129; заявл. 03.11.20; опубл. 07.06.21, Бюл. № 16.

18. Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Холмов М. А. [и др.]. Разработка диагностического устройства штырьевых изоляторов // *Омский научный вестник*. 2021. № 3 (177). С. 70–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-70-74.

19. Свод правил СП 76.13330.2016 «Электротехнические устройства». Актуализированная редакция СНиП 3.05.06-85: утв. приказом М-ва строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ 16.12.2016. Введ. 17.06.2017. Москва: Стандартинформ, 2017. 82 с.

ТЕРЕЩЕНКО Надежда Андреевна, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4017-2286

AuthorID (РИНЦ): 947723

AuthorID (SCOPUS): 57216615006

Адрес для переписки: nadezhda.tereshchenko@mail.ru
НИКИТИН Константин Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

ХОЛМОВ Михаил Александрович, магистрант гр. ЭЭМ-213 кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2561-3270

AuthorID (РИНЦ): 1087396

Адрес для переписки: misha97h@gmail.com

НОВОСЁЛОВ Виктор Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроэнергетика» Тобольского индустриального института (филиал), г. Тобольск.

SPIN-код: 3563-3532

AuthorID (РИНЦ): 816024

Адрес для переписки: vivnovoselov@yandex.ru

Для цитирования

Терещенко Н. А., Никитин К. И., Холмов М. А., Новосёлов В. И. Расчет добавочного шунта для диагностики изоляторов // *Омский научный вестник*. 2023. № 1 (185). С. 86–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-86-92.

Статья поступила в редакцию 15.09.2022 г.

© Н. А. Терещенко, К. И. Никитин, М. А. Холмов,
В. И. Новосёлов

¹ООО «Газпромнефть-Энергосервис»,
г. Омск

²Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

³Российский государственный
университет нефти и газа
(национальный исследовательский
университет) имени И. М. Губкина,
г. Москва

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Рассмотрены вопросы внедрения цифровых подстанций на объектах электроэнергетики Российской Федерации. Осуществлен анализ существующих критериев оценки работоспособности и качества функционирования современных устройств релейной защиты и выполнена оценка их достаточности. Разработана математическая модель функционирования электротехнических комплексов релейной защиты в соответствии с положениями теории массового обслуживания, теории графов и математического аппарата цепей Маркова. Расчетное значение вероятности безотказной работы комплексов релейной защиты соответствует среднему значению этого показателя по данным многолетнего анализа и свидетельствует об адекватности математической модели. Предложенная математическая модель позволяет учесть влияние объемов и качества технического обслуживания на эффективность работы комплексов релейной защиты цифровых подстанций.

Ключевые слова: цифровая подстанция, МЭК-61850, релейная защита, техническое обслуживание по состоянию, цепи Маркова, теория графов.

Внедрение цифровых инструментов в промышленные системы электроснабжения является одной из приоритетных задач развития энергетики Российской Федерации [1, 2]. Особая роль при этом уделяется электротехническим комплексам релейной защиты и автоматики (РЗА), предназначенным для ликвидации повреждений и аварийных режимов, возникающих в электрооборудовании. Осуществляется переход от электромеханических комплексов РЗА к микропроцессорным (МП РЗА) [3]. Технология объединения комплексов МП РЗА в единую систему, осуществляющую обмен информацией в соответствии с требованиями стандарта МЭК-61850, получила название «Цифровая подстанция» (ЦПС) [4].

Важным фактором обеспечения эффективности и качества функционирования комплексов МП РЗА является система технического обслуживания (ТО) [5]. Переход к новым принципам реализации устройств РЗА требует пересмотра подходов к ТО

этих устройств. В связи с этим совершенствование системы ТО и определение показателей её эффективности являются актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка математической модели функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций, позволяющей дополнительно учесть влияние объемов и качества технического обслуживания на эффективность работы защит.

Основным критерием качества функционирования устройств РЗА является количество правильных срабатываний (рис. 1). Неправильные срабатывания защит принято классифицировать на ложное (ЛС), излишнее (ИС), отказ (ОС) [6]. Отдельно выделяют неправильно допущенные срабатывания. По причинам, связанным с недостаточным качеством ТО, происходит порядка 18 % случаев неправильной работы защит [7]. Рассмотрим особенности внедрения ЦПС на примере систем электроснабжения промышленных предприятий.

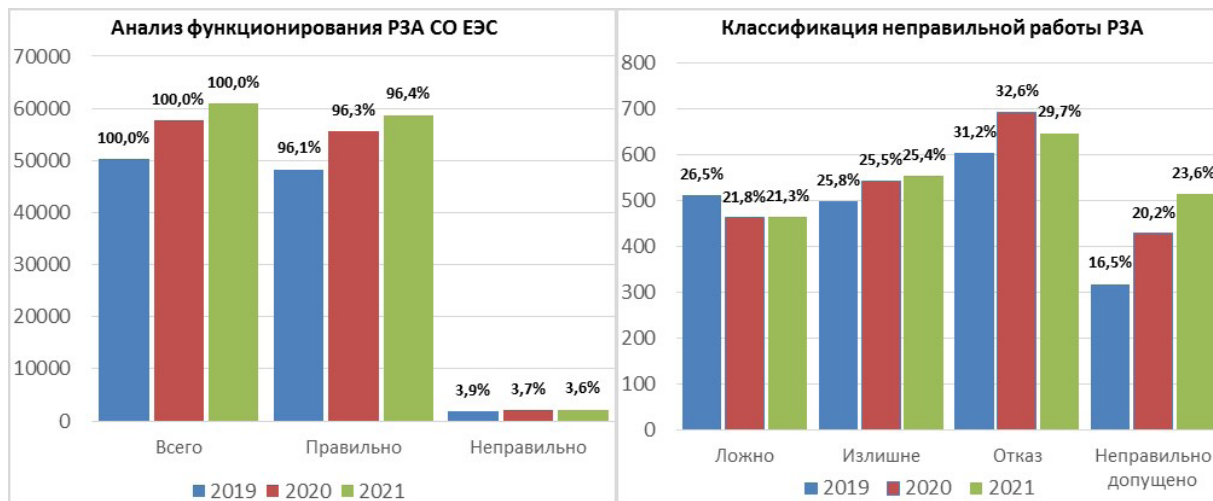


Рис. 1. Анализ функционирования устройств РЗА по данным СО ЕЭС

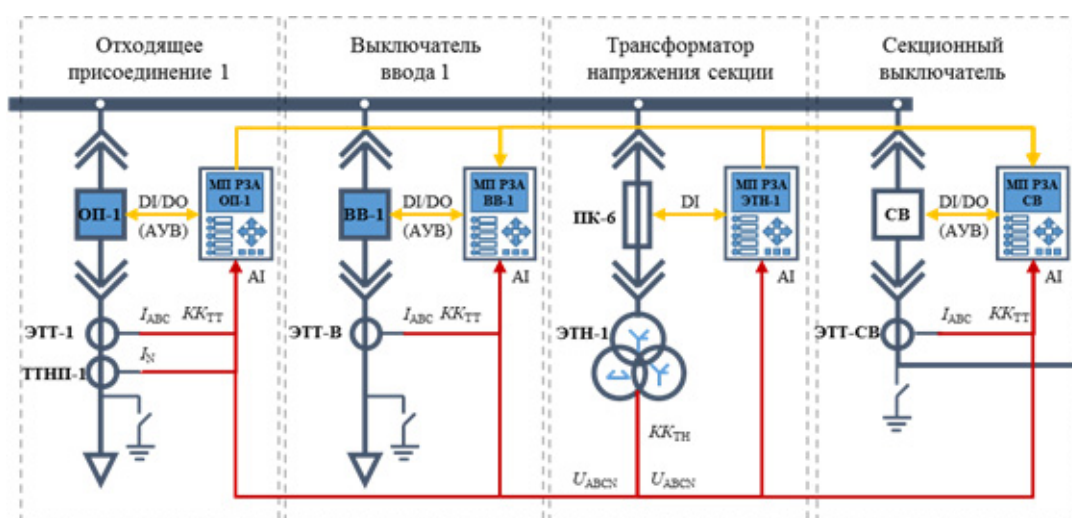


Рис. 2. Классическая МП РЗА промышленного предприятия

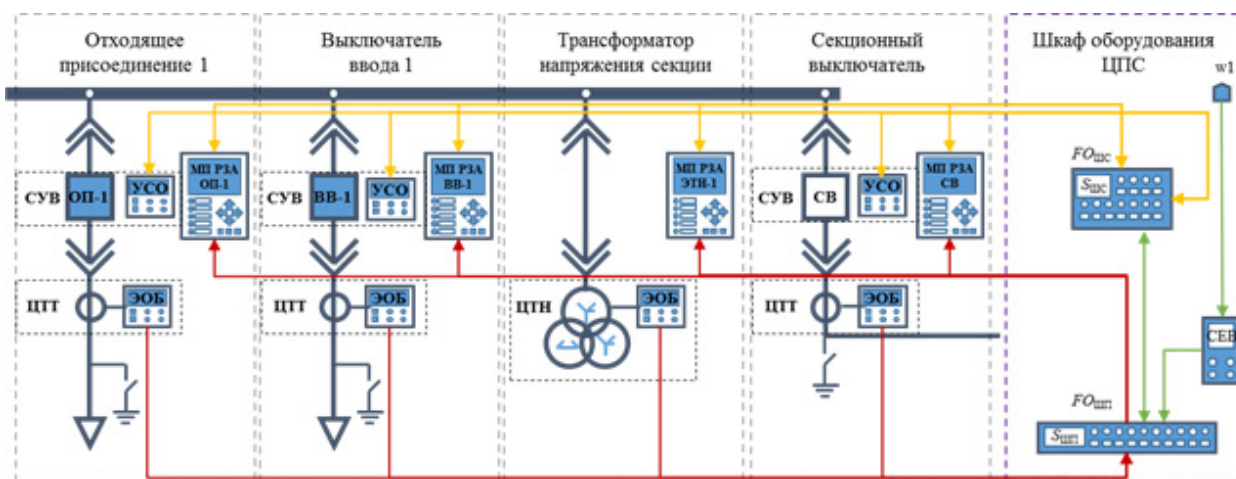


Рис. 3. МП РЗА ЦПС промышленного предприятия

На подстанциях промышленных предприятий типовые присоединения можно условно разделить на ввод (ВВ), секционный выключатель (СВ), трансформатор (ТН) напряжения и отходящее присоединение (ОП).

Рассмотрим эксплуатационные условия комплекса классической РЗА (рис. 2).

Устройство защиты ОП получает сведения о режиме электрической сети от своего трансформатора тока (ЭТТ) и трансформатора напряжения (ЭТН) секции шин по контрольным кабелям цепей тока и напряжения (КК). Получение данных о положении коммутационных аппаратов (КА) и горизонтальный обмен информацией между соседними

МП РЗА (оперативные блокировки, функции защит и пр.) осуществляется с помощью контрольных кабелей, дискретных входов и выходов (DI/DO). Сведения о состоянии МП РЗА передаются в системы телемеханики (ТМ).

При реализации ЦПС (рис. 3) устройство защиты ОП получает сведения о режиме электрической сети от цифрового трансформатора тока (ЦТТ) присоединения и от цифрового трансформатора (ЦТН) секции шин через резервированные каналы передачи данных, состоящие из оптических или медных интерфейсных кабелей ($FO_{\text{шп}}$) и коммутаторов шины процесса ($S_{\text{шп}}$). Все измерения синхронизируются с помощью резервированной системы единого времени (СЕВ), которая напрямую влияет на исправность защит. Получение данных о положении КА, горизонтальный обмен информацией между соседними устройствами МП РЗА ЦПС (оперативные блокировки, выдача команд работы защит и их функций защит и пр.) и передача сведений о состоянии комплекса МП РЗА ЦПС в системы верхнего уровня осуществляется через резервированные каналы передачи данных, состоящие из оптических или медных контрольных кабелей ($FO_{\text{шс}}$) и коммутаторов шины станции ($S_{\text{шс}}$).

Отличительной чертой современных комплексов РЗА является развитая система диагностики, обеспечивающая частую проверку исправности защит [8]. Для построения математической модели функционирования устройств РЗА с частными проверками исправности применяется математический аппарат цепей Маркова [6, 8].

Метод цепей Маркова применим для оценки надежности системы, когда для нее определено пространство состояний. Пространство состояний включает в себя множество состояний и множество возможных переходов, причем оба множества характеризуются жестко заданными исходными параметрами. Визуально пространство состояний может быть представлено в виде графа (рис. 4).

Объект может находиться в состоянии P_i в момент времени $t + \Delta t$ в случае:

— если в момент времени t он находился в состоянии P_i и за время Δt не осуществил переход в другое состояние;

— если в момент времени t он находился не в состоянии P_i за время Δt перешел в него из другого состояния.

Вероятности обоих событий описываются выражениями:

$$P_i(t) \left(1 - \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \Delta t \right). \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m P_j(t) \lambda_{ji} \Delta t. \quad (2)$$

На основании (1) и (2) вероятность нахождения устройства в состоянии i в момент $t + \Delta t$:

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t) \left(1 - \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \Delta t \right) + \sum_{j=1}^m P_j(t) \lambda_{ji} \Delta t. \quad (3)$$

Разделив уравнение (3) на Δt , получим:

$$\frac{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)}{\Delta t} = -P_i(t) \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} + \sum_{j=1}^m P_j(t) \lambda_{ji}. \quad (4)$$

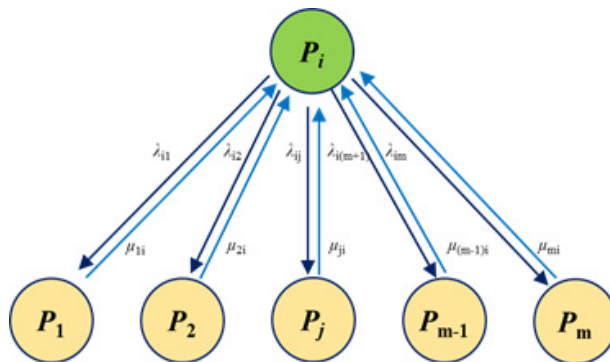


Рис. 4. Граф состояний и переходов системы

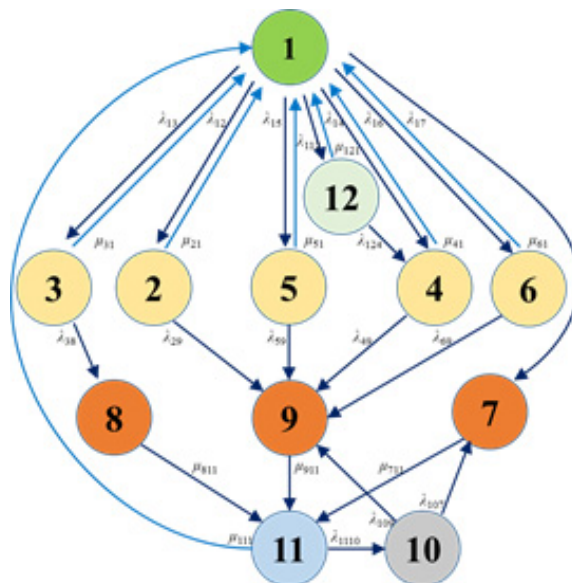


Рис. 5. Граф состояний и переходов комплекса МП РЗА

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -P_i(t) \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} + \sum_{j=1}^m P_j(t) \lambda_{ji}. \quad (5)$$

Система уравнений, описывающая каждое состояние объекта, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = \sum_{j \neq 1}^m P_j(t) \lambda_{j1} - P_1(t) \sum_{j \neq 1}^m \lambda_{1j} \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \sum_{j \neq 2}^m P_j(t) \lambda_{j2} - P_2(t) \sum_{j \neq 2}^m \lambda_{2j} \\ \dots \\ \frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j \neq i}^m P_j(t) \lambda_{ji} - P_i(t) \sum_{j \neq i}^m \lambda_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

Кроме уравнений (6) существует также «нормирующее» выражение, смысл которого заключается в том, что исследуемая система непременно находится в одном из состояний:

$$P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_m(t) = 1. \quad (7)$$

Система уравнений может быть представлена в матричной форме:

$$d\bar{P} = L^T \cdot \bar{P}. \quad (8)$$

Элементы главной диагонали матрицы определяются как:

$$L_{ii} = -\sum_{j=1}^m L_{ij}. \quad (9)$$

Вследствие зависимости (9) матрица имеет вырожденный характер (определитель равен нулю). Для решения матрицы выполняется замена одного из уравнений системы (6) на нормирующее уравнение (7). Итоговое выражение имеет вид

$$d\bar{P} = (L_n^T)^{-1} \cdot \bar{P}. \quad (10)$$

На рис. 5 представлен граф состояний комплекса МП РЗА. Из исправного состояния 1 комплекс может осуществить прямой переход в одно из неисправных состояний (2-6). При наложении любого из неисправных состояний на аварийный режим произойдет отказ в функционировании защиты (7-9). Состояние 11 соответствует процессу восстановления исправности, из которого возможен переход в исправное состояние 1 или в неопределенное состояние 10.

Состояниям 2, 4 и 6 соответствуют диагностируемые неисправности, приводящие к ИС, ОС и ЛС соответственно. При переходе в состояние 2 и 6 работа защит блокируется, и переход в состояния 8 (излишнее срабатывание) и 7 (ложное срабатывание) невозможен, но при возникновении заявки на срабатывание система перейдет в состояние 9 (отказ в функционировании).

Переход в состояние 7 возможен из исправного состояния 1 напрямую.

Особенностью применения технологии ЦПС является наличие состояния 12, соответствующего работоспособному состоянию (в случае диагностируемого отказа одного из резервируемых элементов системы) [9, 10].

Элементы комплексов РЗА подвергаются многократному воздействию в рамках регламентированных операций ТО. Многократность воздействия является одним из факторов, обеспечивающих комплексное диагностирование защит и выявление дефектов. На рис. 6 представлен анализ воздействия на элементы комплексов РЗА, объединенных в функциональные группы, в рамках регламентированных объемов ТО. Отмечается существенное снижение количества воздействий на элементы комплексов МП РЗА ЦПС. Это обусловлено недостаточным учетом специфики функционирования таких комплексов существующими нормативными актами и неприменимостью ряда регламентированных воздействий для проверки элементов МП РЗА ЦПС.

Для относительной оценки изменения многократности проверок введем понятие средний показатель воздействия, определяемый как:

$$R_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (11)$$

где R_i — регламентированное воздействие на функциональную группу комплекса РЗА; n — количество функциональных групп.

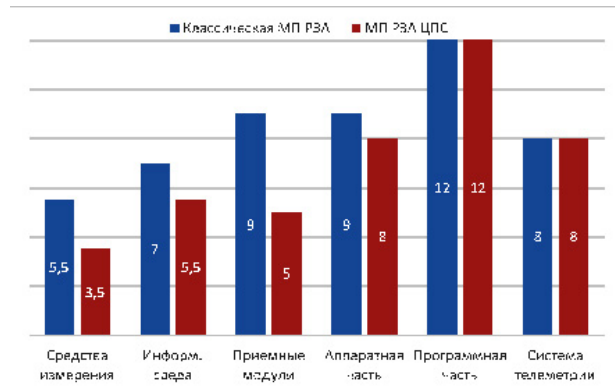


Рис. 6. Воздействие на функциональные группы комплексов РЗА при ТО

Процесс ТО устройств защиты можно представить как работу системы «Человек — машина» (СЧМ) [11]. Для оценки влияния качества ТО введено понятие коэффициента полноты проверок (КПП), который показывает, с какой вероятностью после выполнения ТО комплекс МП РЗА окажется в исправном состоянии:

$$K_{пп} = \exp\left[-\sum_{j=1}^r \lambda_j T_j k_j\right] \cdot \frac{R_{cp}}{R_{cp,n}} \cdot \left(1 - \sum_{s=1}^n q_n\right), \quad (12)$$

где T_j — среднее время выполнения операций j -го вида, λ_j — интенсивность ошибок персонала в рамках ТО, где k_j — число выполненных операций j -го вида; $R_{cp,n}$ — эталонный средний показатель воздействия; q_n — вероятность отказа компонентов, не подвергнутых воздействию в ходе ТО.

Интенсивность ошибок персонала в рамках ТО можно с достаточной точностью определить по данным анализа функционирования устройств РЗА как среднее количество в функционировании по причине некачественного ТО, отнесенное к общему количеству срабатывания защит:

$$\lambda_j = \frac{n_{нс,ср} \cdot \Delta_{то}}{n_{общ,ср}}, \quad (13)$$

где $n_{нс,ср}$ — среднее количество неправильных срабатываний, $n_{общ,ср}$ — среднее количество всех срабатываний, $\Delta_{то}$ — относительное количество неправильных срабатываний по причине некачественного ТО.

Таким образом, переход в исправное состояние с учетом полноты ТО определяется как:

$$\mu_n = K_{пп} \sum_{j=1}^n \mu_{ji}. \quad (14)$$

В свою очередь, возможность перехода комплекса МП РЗА в неопределенное состояние, способное привести к неправильной работе, определяется как:

$$\mu_n = (1 - K_{пп}) \sum_{j=1}^n \mu_{ji}. \quad (15)$$

Изменения структуры функционирования МП РЗА, вызванные внедрением технологии ЦПС, в настоящий момент не учтены в достаточной мере [12]. Таким образом, при выполнении ряда операций ТО выявление оператором дефекта комплекса МП РЗА

Параметры отказов комплекса РЗА [13]

Элемент отказа	Наработка на отказ, ч
Электромагнитный трансформатор тока/напряжения (ЭТТ/ЭТН)	400000
Контрольные кабели медные (КК), на 1 км	3170000
Цифровой трансформатор тока/напряжения (ЦТТ)	160000
Оптические (FO) или медные (FTP) кабели	2575000
Сетевая карта (NIC) и входной разъем (SFP)	3260000
Аппаратная часть МП РЗА (HW)	125000
Программная часть МП РЗА (SW)	25000
Система единого времени (СЕВ)	110000
Коммутаторы (Switch)	345000
Вакуумный выключатель (В-6)	8760000

невозможно, что приводит к снижению качества функционирования устройств МП РЗА.

Определим численные показатели качества функционирования устройств МП РЗА исходя

из справочных и каталожных данных о наработке на отказ элементов системы (табл. 1).

Матрица интенсивностей переходов между состояниями МП РЗА имеет вид:

$$L = \begin{pmatrix} L_1 & \lambda_{12} & \lambda_{17} & \lambda_{14} & \lambda_{15} & \lambda_{16} & \lambda_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{112} \\ \mu_{21} & L_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{29} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{31} & 0 & L_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{38} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{41} & 0 & 0 & L_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{49} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{51} & 0 & 0 & 0 & L_5 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{59} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & L_6 & 0 & 0 & \lambda_{69} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_7 & 0 & 0 & 0 & \mu_{711} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_8 & 0 & 0 & \mu_{811} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_9 & 0 & \mu_{911} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{107} & 0 & \mu_{109} & L_{10} & 0 & 0 \\ \mu_{111} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{1110} & L_{11} & 0 \\ \mu_{121} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{12} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Таблица 2

Стационарные состояния комплексов РЗА

Состояние	Обозначение	МП РЗА классической подстанции	МП РЗА цифровой подстанции	МП РЗА цифровой подстанции при $R_{cp}/R_{cp.н} = 1$
Исправное	P_1	0,956	0,959	0,972
Работоспособное (ЦПС)	P_{12}	0	$1,538 \cdot 10^{-4}$	$1,561 \cdot 10^{-4}$
Излишнее наблюдаемое	P_2	$1,145 \cdot 10^{-4}$	$0,958 \cdot 10^{-4}$	$0,964 \cdot 10^{-4}$
Излишнее ненаблюдаемое	P_3	0,013	0,011	0,011
Отказ наблюдаемое	P_4	$1,584 \cdot 10^{-4}$	$1,149 \cdot 10^{-4}$	$1,157 \cdot 10^{-4}$
Отказ ненаблюдаемое	P_5	0,019	0,014	0,014
Ложное наблюдаемое	P_6	$1,144 \cdot 10^{-4}$	$0,957 \cdot 10^{-4}$	$0,963 \cdot 10^{-4}$
Неопределенное	P_{10}	$1,331 \cdot 10^{-4}$	$8,906 \cdot 10^{-4}$	$2,482 \cdot 10^{-4}$
Восстановление	P_{11}	$3,113 \cdot 10^{-4}$	$1,384 \cdot 10^{-4}$	$1,061 \cdot 10^{-4}$
Ложное срабатывание	P_7	$0,928 \cdot 10^{-4}$	$0,786 \cdot 10^{-4}$	$0,781 \cdot 10^{-4}$
Излишнее срабатывание	P_8	$1,379 \cdot 10^{-4}$	$1,689 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$
Отказ в срабатывании	P_9	$1,782 \cdot 10^{-4}$	$1,821 \cdot 10^{-4}$	$1,319 \cdot 10^{-4}$

Результаты расчетов стационарных значений вероятности безотказной работы представлены в табл. 2.

Расчетное значение вероятности безотказной работы комплекса классической МП РЗА составило 95,6 %, что совпадает в пределах погрешности со средним значением этого показателя по данным многолетнего анализа и свидетельствует об адекватности предложенной математической модели. Разработанная математическая модель может быть применена для оценки эффективности функционирования комплексов РЗА при изменении объемов и качества ТО, в том числе для оценки рисков при реализации проектов по созданию ЦПС.

Анализ результатов расчета свидетельствует о том, что эффективность функционирования устройств защиты в случае применения технологии ЦПС повышается и составляет 95,9 %, даже несмотря на снижение полноты проверок современных устройств защиты в связи с несовершенством существующей методики ТО. Такой результат обусловлен в первую очередь диагностируемыми устройствами ЦПС и резервированием элементов схемы защит. Пересмотр регламентированных объемов существующей системы ТО может обеспечить полноту проверок защит, сопоставимую с классической МП РЗА (условие $R_{\text{ср}}/R_{\text{ср.н}} = 1$). В результате эффективность функционирования защит ЦПС может быть обеспечена на уровне 97,2 %.

Библиографический список

1. О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204. Москва, 2018. 19 с.
2. Цифровая экономика Российской Федерации: государственная программа Российской Федерации от 28.07.2017 г. № 1632-р. Москва, 2017. 88 с.
3. Долежилек Д. Опыт разработки, создания, тестирования и поддержки цифрового вторичного оборудования для систем РЗА // Релейщик. 2018. № 2. С. 44–61.
4. ГОСТ Р МЭК 61850-7-3-2009. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 7. Базовая структура связи для подстанций и линейного оборудования. Раздел 3. Классы общих данных. Введ. 2011–01–01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-mek-61850-7-3-2009> (дата обращения: 10.12.2022).
5. Хлебцов А. П., Шилин А. Н. Тенденции и перспективы развития информационно-измерительных систем диагностики цифровых подстанций // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2018. № 2. С. 31–36.
6. Шалин А. И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 384 с. ISBN 5-7782-0374-8.
7. Алекин Д. Ю., Яговкин Г. Н. Анализ причин ошибочных действий оперативного персонала при переключении в процессе эксплуатации электроустановок // Безопасность и охрана труда. 2017. № 2. С. 76–79.
8. Кокорин Е. Л., Дмитриев С. А. Оценка работоспособности устройств релейной защиты и автоматики на основе графовой вероятностной модели // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2017. Т. 1. С. 404–407.
9. Дубров В. И., Оганян Р. Г., Шайхутдинов Д. В. [и др.]. Методы и подходы определения технического состояния циф-

ровых электроподстанций // Фундаментальные исследования. 2016. № 9-1. С. 16–20.

10. Шалимов А. С. Схемы испытаний устройств релейной защиты и автоматики на основе стандарта IEC 61850 // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 3. С. 34–36.

11. Акимова Г. П., Соловьев А. В., Пашкина Е. В. Методологический подход к определению влияния человеческого фактора на работоспособность информационных систем // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2007. Т. 29. С. 102–112.

12. Паздерин А. В., Мурзин П. В., Одинаев И. Н., Бобкалонов Ф. З. Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4 (45). С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11.

13. Долежилек Д. Опыт разработки, создания, тестирования и поддержки цифрового вторичного оборудования для систем РЗА // Релейщик. 2018. № 2. С. 44–61.

14. Царёв Н. В., Пинчуков П. С. Особенности расчета показателей надежности цифровых устройств релейной защиты и автоматики // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 4. С. 83–87.

СИМАКОВ Александр Владимирович, ведущий инженер ООО «Газпромнефть-Энергосервис», г. Омск; аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 3865-0506

AuthorID (РИНЦ): 894651

ORCID: 0000-0002-9237-4469

AuthorID (SCOPUS): 57200447013

Адрес для переписки: simak_off94@mail.ru

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: hvv-omgups@mail.ru

ЧЕРНЕВ Максим Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Теоретическая электротехника и электрификация нефтяной и газовой промышленности» Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И. М. Губкина, г. Москва.

SPIN-код: 5260-8301

AuthorID (РИНЦ): 924161

Адрес для переписки: makschernev@gmail.com

Для цитирования

Симаков А. В., Харламов В. В., Чернев М. Ю. Разработка математической модели функционирования электротехнических комплексов релейной защиты цифровых подстанций // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 93–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-93-98.

Статья поступила в редакцию 09.01.2023 г.

© А. В. Симаков, В. В. Харламов, М. Ю. Чернев

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.7

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-99-102

Г. Н. АНИСИМОВ¹
К. К. КИМ¹
А. А. ТКАЧУК¹
А. Ю. КУЗЬМЕНКО²

¹Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург

²Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

СПОСОБ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ИЗМЕРЕНИЯ УДАРНОГО ТОКА СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ

В статье предложен новый метод неразрушающего измерения одного из важнейших предельно допустимых параметров силовых тиристорных ударного тока. Метод основан на непрерывном контроле в каждый момент времени динамической емкости, изменение характера временной зависимости которой прогнозирует разрушение полупроводниковой структуры.

Ключевые слова: силовой тиристор, динамическая емкость, ударный ток, неразрушающее измерение.

Введение. Важнейшим параметром, характеризующим надежность работы статических преобразователей при аварийных режимах, является ударный ток силовых тиристорных преобразователей.

На железнодорожном транспорте тиристорные преобразователи нашли широкое применение в устройствах электроснабжения и управления в силовых цепях электропоездов. Неправильная настройка тиристорных преобразователей или неисправности отдельных элементов могут привести к потерям электрической энергии или к выходу из строя дорогостоящего силового оборудования [1,

2]. Вопросы постоянного мониторинга тиристорных полупроводниковых преобразователей способны снизить энергетические и финансовые потери при эксплуатации железнодорожного транспорта [3].

Вопросы диагностирования силовых тиристорных установок рассмотрены в работе [4]. Авторами изучены и разработаны два метода онлайн-обнаружения в режиме реального времени короткого замыкания или обрыва тиристора в источнике питания с управляемым выпрямителем. Представлены структура двух устройств, диагностические процедуры

и использование ключевых технологий, а также приведены результаты испытаний.

Особенности работы тиристорных преобразователей в аварийных режимах рассмотрены в работе [5]. Обоснована целесообразность использования высоковольтного тиристорного ключа на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах для практической реализации технологии безопасного проведения электродинамических испытаний силовых трансформаторов. Рассмотрена схема защиты от перенапряжений испытуемого силового трансформатора и высоковольтного тиристорного ключа при аварийном отключении тока короткого замыкания.

В статье [6] анализируются токовые характеристики короткого замыкания и обрыва цепи одиночного тиристора, а также токовые характеристики обрыва цепи линии переменного тока и предлагается новый метод оперативной диагностики неисправности выпрямительного устройства. Приведенные результаты моделирования показывают, что время идентификации неисправности составляет от 1 до 10 мс в случаях короткого замыкания тиристора, обрыва цепи тиристора и обрыва цепи сети переменного тока соответственно, а время локализации неисправностей составляют от 20 до 30 мс соответственно.

В обзорной работе [7] рассматриваются различные виды отказов, связанные с силовой электроникой в преобразователях, а также уровни устройств и новейшие методы мониторинга состояния для обнаружения этих отказов на самой ранней стадии. Силовые полупроводниковые устройства считаются наиболее чувствительной частью силовых электронных систем, и основные причины нагрузок на эти устройства могут быть вызваны атмосферными условиями, а также кратковременными большими нагрузками, которые следует учитывать при проектировании силовых электронных систем.

В большинстве существующих методов неразрушающего измерения ударного тока используются корреляционные зависимости, например [8–10], либо они не имеют достаточно строгого теоретического обоснования [11].

Теория. Разработанный новый метод неразрушающего измерения ударного тока предназначен для определения ударного тока полупроводникового прибора с достаточно высокой точностью и при полной автоматизации процесса измерения. Сущность метода заключается в особенности поведения некоторого параметра, который условно назван ди-

намической емкостью (C_A) и определяется следующим образом:

$$C_A = \frac{i}{du/dt}, \quad (1)$$

где i — ток, протекающий через структуру, du/dt — скорость изменения напряжения на полупроводниковой структуре.

При подаче синусоидального импульса тока на испытуемый прибор длительностью 10 мс с амплитудой, заведомо превышающей амплитуду, соответствующей началу разрушения полупроводниковой структуры, в зависимости $C_A(t)$ на восходящей ветви изохронной прямой вольт-амперной характеристики наблюдается резко выраженный экстремум. Как показали многочисленные экспериментальные исследования, проведенные авторами на тиристорах типа Т-25, Т-50, ТЧ-50, ТЛ-160, Т15-160, Т-200, мгновенное значение тока, при котором проявляется данный экстремум во временной функции динамической емкости, с достаточной точностью (погрешность измерения не превышает 15 %) можно принять за ударный ток тиристора.

Постановка задачи. Для выяснения физической сущности критерия неразрушающего измерения ударного тока была сформулирована и решена электротепловая задача, причем учитывались резкое снижение коэффициентов инжекции эмиттерных переходов с ростом тока, электронно-дырочное рассеяние, рассеяние на фонах, рекомбинация Шокли–Рида и оже-рекомбинация, а также нагрев структуры протекающим током. Была построена однородная симметричная модель с линейными электрофизическими параметрами эмиттерных областей с учетом выполнения условия квазинейтральности во всех слоях полупроводниковой структуры, при низком уровне инжекции в эмиттерах и высоком — в базе, принималась во внимание нелинейность теплофизических параметров кремния и равномерность тепловыделения в базовой области тиристора.

В результате совместного решения уравнений непрерывности, переноса и тепловой диффузии с применением преобразований Лапласа и Кирхгофа были получены выражения для температурного поля в полупроводниковой структуре $\vartheta(x, t)$ (2), средней по толщине базы концентрации инжектированных носителей заряда p_{cp} (3), прямого падения напряжения на тиристоре u (4) и динамической емкости $C_A(t)$ (5):

$$\vartheta(x, t) = -\frac{1}{a_1} \text{Ln} \left(1 - \frac{a_1 \chi P_m}{2\sigma d A_1} \left(\frac{t}{2} - \frac{t}{4} \left(\text{erfc} \frac{d-x}{2\sqrt{\chi t}} + \text{erfc} \frac{d+x}{2\sqrt{\chi t}} \right) + \frac{1}{8} \sqrt{\frac{t}{\chi}} \left((d-x) \text{ierfc} \frac{d-x}{2\sqrt{\chi t}} + (d+x) \text{ierfc} \frac{d+x}{2\sqrt{\chi t}} \right) + d \frac{P}{P_m} \sqrt{\frac{2}{\omega \chi}} (C(\omega t) \sin \omega t - S(\omega t) \cos \omega t) - \frac{d}{2\sqrt{\chi \omega}} (C(2\omega t) \cos 2\omega t + S(2\omega t) \sin 2\omega t) \right) \right), \quad (2)$$

$$p_{cp} = \left(\left(\frac{1}{4\tau_z^2 \eta^2} + \frac{A_2 e^{-a_2 \vartheta_{cp}}}{d^2 \sigma (b_s + 1)^2 \text{hen}} I_m \sin \omega t \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2\tau_z \eta} \right), \quad (3)$$

$$u = U_0 + \frac{2d}{\epsilon\sigma} i \left(\frac{A_3}{p_{cp}} e^{a_3\vartheta_{cp}} + A_4 e^{-a_4\vartheta_{cp}} \right), \tag{4}$$

$$C_{\Lambda}(t) = \frac{\epsilon\sigma}{2d} \left(\omega \text{ctg}(\omega t) \left(\frac{A_3}{p_{cp}} e^{a_3\vartheta_{cp}} \left(1 + \frac{1}{a_2 p_{cp} \sin(\omega t) d \vartheta_{cp}} \right) + A_4 e^{-a_4\vartheta_{cp}} \right) + \frac{d\vartheta_{cp}}{dt} \left(\frac{A_3}{p_{cp}} e^{a_3\vartheta_{cp}} \left(a_3 - \frac{1}{p_{cp}} \frac{dp_{cp}}{d\vartheta_{cp}} - a_4 A_4 e^{-a_4\vartheta_{cp}} \right) \right) \right)^{-1}. \tag{5}$$

где $A_1, a_1, A_2, a_2, A_3, a_3, A_4, a_4$ — постоянные экспоненциальных аппроксимаций коэффициента теплопроводности, коэффициента диффузии и величины обратной результирующей подвижности [12], $P_0 = I_m, P_m = r_{\Lambda} I_m^2, U_0$ — пороговое напряжение, r_{Λ} — динамическое сопротивление прибора, I_m — амплитуда импульса тока, ω — угловая частота тока, τ_z — время жизни носителей в базе, обусловленное рекомбинацией Шоки–Рида, η — константа оже-рекомбинации, b_s — отношение подвижностей электронов и дырок, χ — коэффициент теплопроводности, $\text{erfc } y = \sum_y^{\infty} \text{ierfc } \xi d\xi, C(z), S(z)$ — интегралы Френеля, ϑ_{cp} — средний по толщине перегрев полупроводниковой структуры, $\vartheta_{cp} = \frac{1}{d} \int_0^d \vartheta(x,t) dx, h$ — показатель рекомбинации эмиттерных областей, $2d$ — толщина полупроводниковой пластины.

Эксперимент. Исследование процессов, протекающих в полупроводниковом приборе [13], проводится по схеме, представленной на рис. 1. Схема включает в свой состав следующие узлы и элементы: 1 — генератор силовых импульсов тока, 2 — измерительный шунт, 3 — клеммы, 4 — высокочастотный шунт, 6 — блок выделения огибающих амплитуд высокочастотного напряжения, 7 — блок памяти, 8 — схема сравнения, 9 — блок защиты, 10 — блок индикации.

Предлагаемый способ оценки величины ударного тока прибора заключается в следующем: импульс тока с выхода генератора 1 подают на полупроводниковый прибор 3, на который также подается напряжение высокой частоты с генератора 5. Если плотность упомянутого тока большая, дифференциальное сопротивление полупроводникового прибора 3 имеет емкостной характер, а на высокочастотном шунте 4 будет напряжение, величина которого пропорциональна дифференциальной емкости прибора 3. Чтобы получить напряжение, пропорциональное огибающей амплитуд, из высокочастотного напряжения, используют блок 6. Это напряжение приходит на блок памяти 7 и схему сравнения 8, на которую также подается напряжение, генерируемое самим блоком памяти 7. После того как напряжение, поступающее с выхода блока 7 превысит напряжение с выхода блока 6, на блок защиты 9 поступает сигнал с выхода схемы сравнения 8. Этот сигнал приводит к отключению генератора силовых импульсов тока 1. Блок индикации 10 осуществляет регистрацию величины силового тока в момент его отключения, соответствующей величине ударного тока.

Обсуждение результатов эксперимента. Полученные аналитические зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. На рис. 2 показаны зависимости, построенные для тиристора типа Т-25.

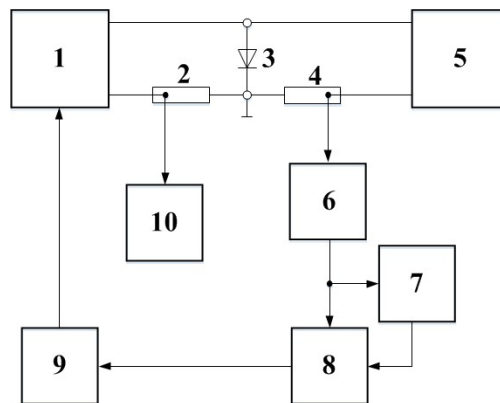


Рис. 1. Блок-схема устройства для измерения величины ударного тока силовых полупроводниковых приборов

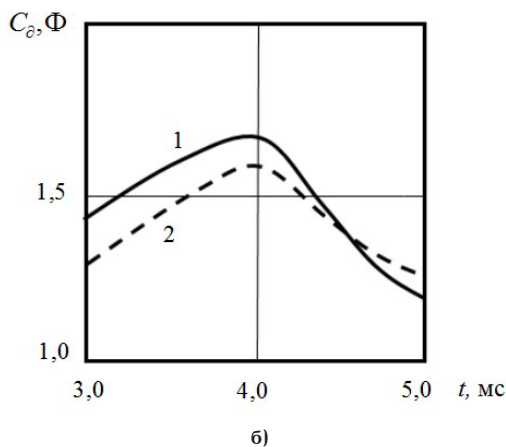
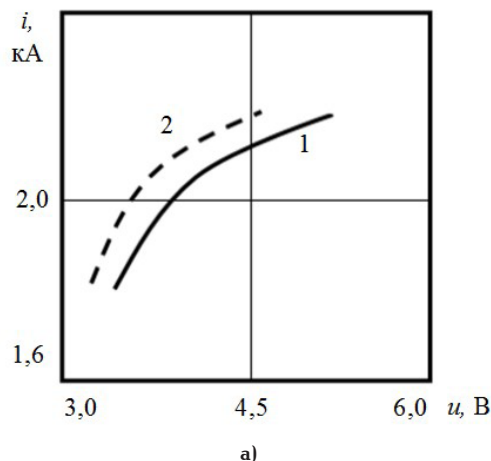


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики (а) и зависимости динамической емкости от времени (б) для тиристора Т-25 при высоких плотностях тока, где 1 — расчетные кривые, 2 — экспериментальные кривые

Детальный анализ выражения для динамической емкости (5) показал, что развитие физических процессов в полупроводниковых структурах при высоких плотностях тока во многом определяется различными нелинейными эффектами и прежде всего разогревом полупроводниковой структуры протекающим током. Экстремум на временной зависимости динамической емкости прогнозирует неустойчивость в режиме работы полупроводникового прибора. При этом наблюдается интенсивный разогрев структуры.

По данным расчета, концентрация термически генерированных носителей заряда в наименее промодулированной части базы становится сравнимой с концентрацией инжектированных носителей, что способствует формированию шнура тока и разрушению полупроводниковой структуры [14].

Полученные количественные соотношения, согласование их с результатами эксперимента, а также возникновение неустойчивости в структуре полупроводникового прибора при появлении экстремума динамической емкости достаточно убедительно аргументируют объективность разработанного метода неразрушающего измерения ударного тока.

Описанный способ измерений позволяет выявить ненадежные полупроводниковые приборы с предельно низким значением ударного тока.

Библиографический список

1. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Диагностирование силовых вентилей преобразователей тяговых подстанций // Известия Транссиба. 2015. № 3 (23). С. 79–85.
2. Черемисин В. Т., Никонов А. В. Анализ потерь мощности в основном оборудовании статических тиристорных компенсаторов с учетом несинусоидальности напряжения и пути их снижения // Известия Транссиба. 2019. № 1 (37). С. 54–63.
3. Салита Е. Ю., Самолинов С. С., Налетов А. К. Использование средств постоянного технического диагностирования полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Омск, 2022. С. 47–55.
4. Liu H. -d., Han J. -y., Shen N. -j., Lan H. Rectifier Power Thyristor Failure in Real-Time Detection Methods // 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2012. P. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2012.6307672.
5. Kuvshinov A. A., Khrennikov A. Y., Vakhnina V. V., Chernenko A. N. A High-Voltage Thyristor Switch for the Power Transformer Testing for a Sustainability for Short-Circuit Currents // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 2018. P. 47–52. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542313.
6. Song G., Wang X., Tang J., Liu P. An on-line fault diagnosis method for power rectifier device based on fault current characteristic // 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/CICED.2016.7576260.
7. Manohar S. S., Sahoo A., Subramaniam A., Panda S. K. Condition monitoring of power electronic converters in power plants — A review // 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEMS.2017.8056371.

8. Бардин В., Пьянзин Д., Брагин А. К вопросу о методологии оценки надежности силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. 2018. Т. 6, № 75. С. 46–48.

9. Воронин К. Д., Евсеев Ю. А., Локтаев Ю. М. [и др.]. Силовые высоковольтные полупроводниковые приборы: состояние и перспективы // Электротехника. 1984. № 13. С. 19–21.

10. Ким К. К., Паленик В. И. Генератор испытательных импульсов анодного тока силовых полупроводниковых приборов // Электро. 2002. № 1. С. 40–41.

11. Ким К. К., Анисимов Г. Н., Барбарович В. Ю., Литвинов Б. Я. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника. Санкт-Петербург: ПИТЕР, 2006. 367 с.

12. Григоренко В. П., Дерменжи П. Г., Кузьмин В. А., Мнацаканов Т. Т. Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 279 с.

13. Грехов И. В. Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника // Вестник Российской академии наук. 2008. Т. 78, № 2. С. 106–115.

14. Матюхин С. И., Ставцев А. В. Описание температурной зависимости вольтамперной характеристики силовых полупроводниковых приборов // Известия ОрелГТУ. Сер. Естественные науки. 2003. № 3-4. С. 93–99.

АНИСИМОВ Геннадий Николаевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3296-0510

AuthorID: 685147

Адрес для переписки: genn-anisimov@yandex.ru

КИМ Константин Константинович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3278-4938

AuthorID: 690443

Адрес для переписки: kimkk@inbox.ru

ТКАЧУК Антон Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7335-2340

AuthorID: 726854

Адрес для переписки: a.a.tkachuk@mail.ru

КУЗЬМЕНКО Антон Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.

SPIN-код: 3897-7011

AuthorID: 1013551

Адрес для переписки: KuZo17@yandex.ru

Для цитирования

Анисимов Г. Н., Ким К. К., Ткачук А. А., Кузьменко А. Ю. Способ неразрушающего измерения ударного тока силовых тиристоров // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 99–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-99-102.

Статья поступила в редакцию 20.12.2022 г.

© Г. Н. Анисимов, К. К. Ким, А. А. Ткачук, А. Ю. Кузьменко

А. А. ВАЛЬКЕ¹
В. А. ЗАХАРЕНКО¹
Д. Г. ЛОБОВ¹
Д. Б. ПОНОМАРЕВ¹
А. Г. ШКАЕВ¹
М. Ю. НИКОЛАЕВ¹
С. В. ЛУКУТА²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск
²АО «ТГК-11»,
г. Омск

ИНФРАКРАСНЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Данная работа посвящена задаче инфракрасного мониторинга температуры металла поверхности труб пароперегревателей. Мониторинг реализуется на основе инфракрасных камер, осуществляющих бесконтактный контроль температуры поверхности труб настенного пароперегревателя. Приведены результаты моделирования распределения температуры вдоль трубы настенного пароперегревателя при наличии загрязнения и без. Выполнен расчет количества инфракрасных камер, необходимого для осуществления инфракрасного мониторинга поверхности труб пароперегревателей. Разработанные конструкторские решения по месту монтажа инфракрасных камер на котле типа ТП-82 подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: пароперегреватель, инфракрасная камера, металл труб пароперегревателя, котлоагрегат, визуализация температуры, переходный режим.

Введение. Одной из проблем, возникающих на ТЭЦ при эксплуатации котлов барабанного типа, являются повреждения труб настенных пароперегревателей, вызываемые их перегревом в процессе пуска котла. Следует отметить, что термодинамические процессы, протекающие в топке котла, до сих пор ещё недостаточно изучены. При этом оперативный термический контроль металла труб настенного пароперегревателя в процессе эксплуатации может производиться только усредненно и точно на выходе теплоносителя из настенного пароперегревателя посредством термодатчиков, а выявление потенциально опасных повреждений на всех трубах настенного пароперегревателя производится только при визуальном внешнем осмотре поверхностей нагрева во время остановки котла [1–4].

Поэтому актуальной задачей является разработка средств инструментального контроля тепловых процессов на поверхностях пароперегревателей в реальном времени. Наличие такого контроля позволило бы оперативно выявлять недопустимые температурные градиенты и теплонапряжённости на поверхности труб пароперегревателя и предот-

вращать аварийные ситуации, связанные с повреждениями труб настенного пароперегревателя в процессе пуска котла [5, 6]. Цель работы — создание системы контроля за температурным состоянием металла пароперегревателей в переходных режимах котлоагрегатов типа ТП-82 Омской ТЭЦ-3.

Постановка задачи. При проведении патентных исследований было проанализировано 65 патентов на изобретения и полезные модели Российской Федерации, три свидетельства о регистрации программных продуктов, статьи из периодической печати. Проведён ретроспективный обзор результатов интеллектуальной деятельности в области разработки методов и средств теплового контроля поверхностей как труб пароперегревателей, так и экранных труб топок котлов за период более 30 лет. По результатам ретроспективного обзора за 30 лет было установлено, что только на некоторых станциях прошли опытную апробацию системы теплового контроля и диагностики экранных труб [7, 8]. Для контроля тепловых режимов работы экранных радиаторов применяют радиометрические и температурные вставки [9]. В представлен-

ной работе предлагается для теплового контроля состояния металла поверхностей труб настенного пароперегревателя применение бесконтактного теплового контроля в реальном времени без останова работы котла.

Предлагаемый способ реализуется на основе инфракрасных камер, осуществляющих бесконтактный контроль температуры поверхности труб настенного пароперегревателя (НПП). По результатам анализа причин повреждаемости настенных пароперегревателей и конструкции топки котла типа ТП-82 потребовалось определить характеристики и место установки инфракрасных камер.

Теория.

1. Анализ причин повреждаемости настенных пароперегревателей в условиях работы поверхностей нагрева в переходных режимах.

Тепловые разрушения труб пароперегревателей являются одной из основных проблем для эксплуатации. Очевидно, что причиной разрушений являются чрезмерные термические напряжения металла труб, возникающие как вследствие одностороннего лучистого обогрева труб факелами, так и ещё по ряду причин [1, 2, 5, 10, 11], по которым может нарушиться циркуляция в настенном пароперегревателе, что приведёт к аварийному перегреву металла, например, недостаточный пропуск арматуры в связи с попаданием шлама в процессе продувки или из-за солевых отложений, конструктивные дефекты и др.

При пусках котлоагрегата в нижних участках настенного пароперегревателя может происходить обильная конденсация пара, что приведёт к закупорке отдельных труб и целых панелей, а это ведёт к опасному повышению температуры металла закупоренных труб или панелей в районе амбразур горелок. Трубы обычно повреждены с лобовой части, здесь заметно утонение стенки (примерно на 0,25-ой части периметра) вследствие ползучести металла и активного окалинообразования. В результате одностороннего интенсивного нагрева металл лобовой части труб обычно деформирован (несколько «выпучен»), чем отчасти объясняется уменьшение толщины стенки с обогреваемой стороны. Диаметр трубы обычно увеличен на 3–5 %, место утонения стенки имеет трещины, которые встречаются как в поперечном, так и в продольном направлениях. Это свидетельствует о наличии в процессе эксплуатации малоцикловых циклических нагрузок при пусках, остановах и в аварийных ситуациях.

Односторонний радиационный обогрев от мазутного факела в период пуска котла приведёт к возникновению термических напряжений, превышающих напряжения от внутреннего давления воды [1, 4, 7].

Аксиальные термические напряжения σ_t в трубах, сжимающие металл по лобовой (радиационной) стороне, определяются разностью температур в сечении и увеличиваются с ростом плотности теплового потока и со снижением интенсивности теплоотдачи к воде и описываются как:

$$\sigma_t = -(1 - \mu)^{-1} \cdot E \cdot \alpha_L (t_{\text{пов}} - t_{\text{ср}}),$$

где μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости стали; α_L — коэффициент линейного теплового расширения; $t_{\text{пов}}$ — температура стенки трубы по лобовой образующей; $t_{\text{ср}}$ — средняя температура в сечении трубы [9].

Опасность разрушений труб пароперегревателей возрастает при образовании и росте отложений (накипей) в трубах, поскольку имеющие более низкую теплопроводность, чем металл труб, отложения будут образовываться на лобовой (со стороны радиационного нагрева) стороне, что приведёт к перегреву металла, увеличению градиента температурного профиля и росту термических напряжений до предельных значений. При этом термические напряжения могут достигать предела текучести.

В такой ситуации контроль за температурными условиями работы труб пароперегревателей в пусковых режимах приобретает первоочередное значение.

2. Исследования степени теплонпряжённости металла трубы настенного пароперегревателя.

Поставленная в работе задача проведения исследований степени тепловой напряжённости металла труб НПП решалась на основе моделирования в системе ANSYS 17.2 распределения температурного поля по трубе пароперегревателя котла ТП-82.

В основу моделирования в Design Modeler положена геометрическая модель трубы из жаропрочной стали марки 12Х1МФ в соответствии с паспортом на котёл ТП-82.

Геометрическая модель представляет собой трубу длиной 42 метра, диаметром 42 мм и толщиной стенки 4 мм. В соответствии с технической документацией котла ТП-82 теплоноситель имеет следующие параметры: давление теплоносителя 147 кг/см², массовая скорость 828,3 кг/м²·с, температура теплоносителя на входе и выходе трубы

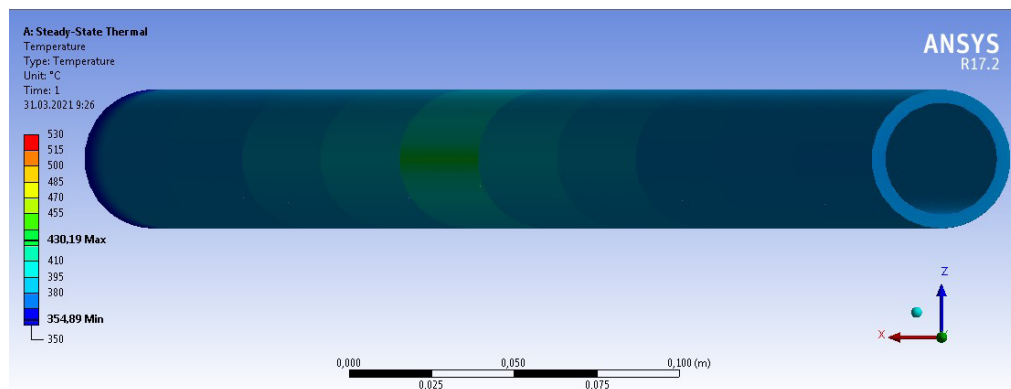


Рис. 1. Распределение температурного поля вдоль трубы НПП

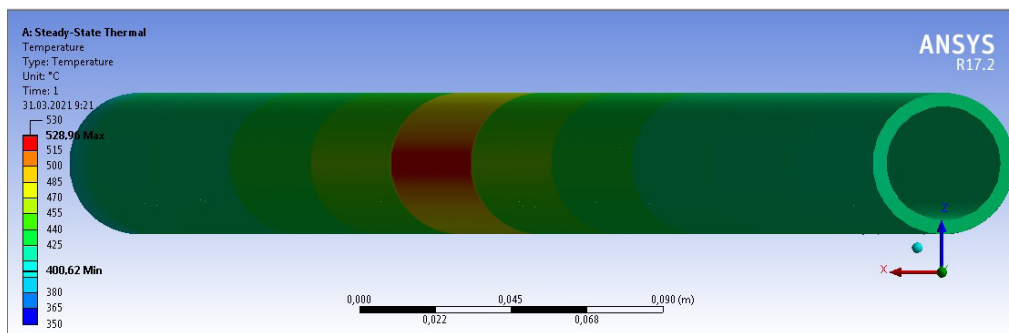


Рис. 2. Распределение температурного поля при загрязнении трубы

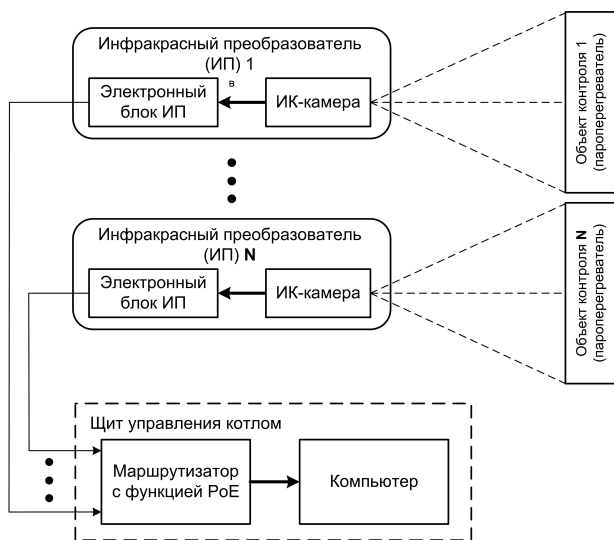


Рис. 3. Структурная схема системы инфракрасного мониторинга

равна 342 °С и 365 °С соответственно. В результате моделирования получено распределение температурного поля трубы без дефектов, вид которого показан на рис. 1. Как видно из температурного профиля на рис. 1, перегрев трубы от факела практически отсутствует.

Как можно видеть из рис. 2, при снижении охлаждения стенки трубы, вызванного, например, загрязнением трубы, снижением давления или другими параметрами температура на поверхности стенки трубы повышается как по всей длине трубы, так и по сечению.

3. *Разработка структурной схемы инфракрасного мониторинга температуры металла поверхности труб пароперегревателей.*

Система инфракрасного мониторинга включает в себя несколько (от 1 до N) инфракрасных преобразователей (ИП), структурная схема представлена на рис. 3. Максимальное число ИП на данном этапе работ ограничено значением $N = 4$, в дальнейшем, при необходимости, оно может быть увеличено.

ИП устанавливаются на внешней стороне стенки котла и визируются через смотровое отверстие в стене на поверхность пароперегревателя, являющуюся объектом контроля. Инфракрасная камера (ИК-камера), входящая в состав ИП, служит для регистрации распределения температур по поверхности пароперегревателя.

Диапазон регистрируемых температур поверхности пароперегревателя в соответствии с техническим заданием составляет от 100 до 600 °С. Для ре-

гистрации таких температур наилучшим вариантом является использование инфракрасных камер, обладающих спектральной чувствительностью в диапазоне (7,5...13) либо (8...14) мкм.

В соответствии с предоставленной технической документацией конструкция настенного пароперегревателя котла типа ТП-82 включает 108 отдельных труб. При условии установки одной ИК-камеры на пароперегреватель её горизонтальное разрешение должно составлять не менее 640 точек, т.к. в этом случае обеспечивается возможность оценки распределения температуры по поверхности каждой отдельной трубы, что позволяет определять наличие различного рода дефектов.

Электронный блок ИП обеспечивает функции удаленного управления ИК-камерой и осуществляет первичную обработку информации о распределении температуры по поверхности пароперегревателя. Кроме того, данный блок обеспечивает сетевое соединение ИП с маршрутизатором на щите управления котлом. При этом электронный блок обеспечивает поддержку технологии PoE и формирует необходимое напряжение питания для инфракрасной камеры.

На щите управления котлом располагаются маршрутизатор и компьютер. Маршрутизатор обеспечивает возможность сетевого соединения со скоростью не менее 100 Мб/с для всех инфракрасных преобразователей. Благодаря поддержке функции PoE имеется возможность питания ИП непосредственно от маршрутизатора через сетевой кабель, что позволяет отказаться от применения дополнительных блоков питания в составе ИП.

Компьютер на щите управления осуществляет окончательную обработку информации о распределении температур по поверхности пароперегревателей, обеспечивает возможность отображения динамики изменения температуры металла как в формате графиков, так и в табличном виде. Отображение может осуществляться как в реальном времени, так и в ретроспективе. Для этого предусмотрена возможность записи в архив всех данных, поступающих от инфракрасных преобразователей. При превышении максимально допустимого значения температуры металла поверхности труб пароперегревателя выдается предупреждающий сигнал.

4. *Расчет необходимого количества инфракрасных преобразователей.*

В ходе анализа конструкции котла ТП-82 был определен технически реализуемый вариант установки инфракрасных преобразователей, позволяющий наблюдать распределение температур по всей поверхности пароперегревателя — это монтаж приборов на заднюю стенку котла ТП-82 между нижней мазутной горелкой и холодной воронкой.

Во-первых, установка ИП ниже мазутной горелки значительно облегчит температурный режим эксплуатации оборудования. Во-вторых, благодаря наличию тяги мазутный факел не должен попадать в поле зрения ИП и мешать наблюдению поверхности пароперегревателя. Для этого в задней стенке должны быть выполнены специальные смотровые каналы.

Для расчета количества инфракрасных преобразователей, необходимого для осуществления инфракрасного мониторинга, был проведен расчет геометрических размеров монтажной арматуры, необходимой для установки ИП на заднюю стенку полутопки котла ТП-82.

Для монтажа ИП в задней стенке котла выполняется визирный канал, в который устанавливается металлический тубус, с закрепленным на нем сканирующим пирометрическим преобразователем. В соответствии с предоставленной АО «ТГК-11» технической документацией расстояние от поверхности пароперегревателя до задней стенки котла L составляет 7550 мм. ИП устанавливается на отметке 6000 мм и визируется под углом на отметку 10000 мм, при этом центр нижней газовой горелки (отметка 10000 мм) будет находиться точно посередине вертикальной зоны обзора сканирующего инфракрасного преобразователя. Таким образом, расстояние от места установки ИП до центра нижней газовой горелки H будет составлять 4000 мм.

Расстояние от места установки тубуса до центра вертикальной зоны обзора ИП составляет:

$$X = \sqrt{H^2 + L^2} = \sqrt{4000^2 + 7550^2} = 8544 \text{ мм.}$$

В ходе работы изначально рассматривался вариант установки одного ИП на каждой из полутопок котла ТП-82.

В соответствии с предоставленной АО «ТГК-11» технической документацией ширина зоны контроля температуры настенного пароперегревателя котла ТП-82 D составляет 6750 мм. Длина тубуса составляет 250 мм, при этом с целью уменьшения нагрева корпуса ИП он устанавливается на расстоянии 50 мм от крышки тубуса. Таким образом, расстояние B от передней поверхности тубуса до линзы оптической системы ИП составляет 300 мм.

Необходимый угол обзора ИП в горизонтальной плоскости равен:

$$\begin{aligned} \alpha &= 2 \arctg \cdot \left[0,5 \cdot \frac{D}{X + B} \right] = \\ &= 2 \arctg \cdot \left[0,5 \cdot \frac{6750}{8544 + 300} \right] = 41,8^\circ. \end{aligned}$$

Следует отметить, что имеющиеся на рынке инфракрасные камеры, на базе которых может быть реализован ИП, имеют оптические системы, обеспечивающие стандартное значение угла обзора в горизонтальной плоскости, равное 42° . Поэтому, с точки зрения выбора инфракрасной камеры, является возможным вариант установки одной камеры на полутопку котла.

Необходимый минимальный диаметр тубуса в данном случае должен составлять:

$$d = 2B \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha) = 2 \cdot 300 \cdot \operatorname{tg}(0,5 \cdot 41,8^\circ) = 229 \text{ мм.}$$

По оценкам специалистов по котельному оборудованию Омской ТЭЦ-3 применение тубуса та-

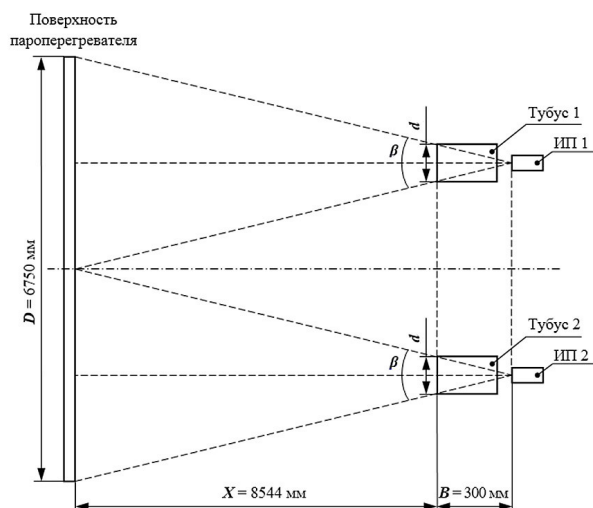


Рис. 4. Иллюстрация варианта установки двух ИП на задней стенке полутопки котла ТП-82

кого диаметра было признано неприемлемым для реализации техническим решением, так как для его обеспечения требуется изгиб шести экранных труб, что является недопустимым изменением конструкции котла.

В результате был предложен вариант, в котором на каждую полутопку устанавливается два инфракрасных преобразователя.

Иллюстрация геометрии в плоскости центра вертикальной зоны визирования ИП для такого варианта установки представлена на рис. 4.

Для проверки возможности технической реализации установки двух инфракрасных преобразователей на одну полутопку котла ТП-82 также были произведены геометрические расчеты требуемых углов обзора ИП в горизонтальной плоскости и внутреннего диаметра тубусов.

Необходимый угол обзора ИП в горизонтальной плоскости β определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \beta &= 2 \arctg \cdot \left[0,25 \cdot \frac{D}{X + B} \right] = \\ &= 2 \arctg \cdot \left[0,25 \cdot \frac{6750}{8544 + 300} \right] = 21,6^\circ. \end{aligned}$$

Представленные на рынке инфракрасные камеры, на базе которых в данном случае могут быть реализованы ИП, имеют оптические системы, обеспечивающие стандартное значение угла обзора в горизонтальной плоскости, равное 24° . Следовательно, вариант установки двух камер на полутопку котла является технически реализуемым.

Минимальный диаметр тубуса в случае установки двух ИП должен составлять:

$$d = 2B \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha) = 2 \cdot 300 \cdot \operatorname{tg}(0,5 \cdot 21,6^\circ) = 115 \text{ мм.}$$

Результаты экспериментов. После анализа полученных результатов расчётов в соответствии с рекомендациями специалистов по котельному оборудованию Омской ТЭЦ-3 был реализован вариант установки тубусов для двух инфракрасных преобразователей на одну полутопку (рис. 3). Тубусы выполнены из стальной трубы с внешним диаметром 159 мм (внутренний диаметр составляет 150 мм).

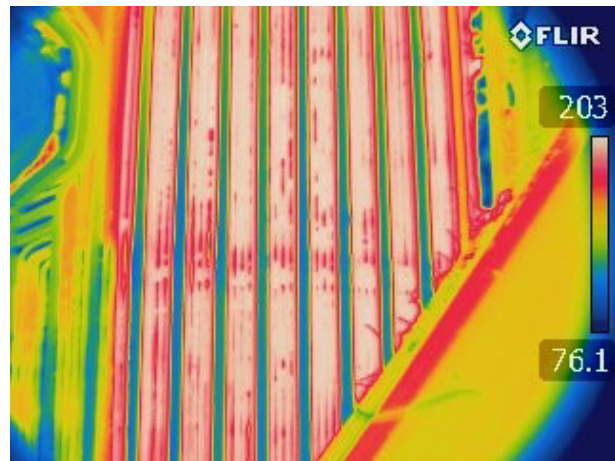
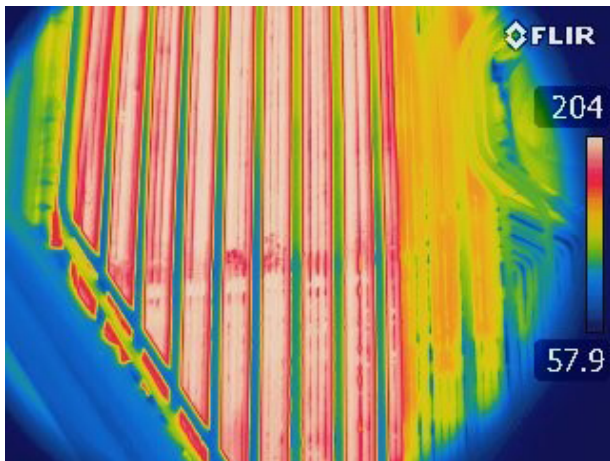


Рис. 5. Термограммы стенки пароперегревателя правой полутопки котла ТП-82 на этапе розжига котла

Для оценки корректности проведенных геометрических расчетов и точности установки тубусов проведен тестовый тепловой контроль при пуске котла посредством переносного тепловизора.

На рис. 5 представлены термограммы стенки настенного пароперегревателя котла ТП-82. Термограммы получены с помощью тепловизора FLIR E60, имеющего угол обзора 25° по горизонтали и разрешение кадра 320×240 пикселей. Как видно по термограммам на рис. 5, все трубы НПП присутствуют в кадре и практически отсутствует отраженное излучение от мазутного факела.

Обсуждение результатов. Из приведенных результатов моделирования распределения температуры вдоль трубы настенного пароперегревателя можно сделать вывод о том, что при измерении температуры на любом участке внешней стенки трубы пароперегревателя можно получать информацию о фактической температуре на поверхности трубы НПП.

Этот вывод положен в основу обоснования места установки ИП перед смотровым люком топки пароперегревателя.

По результатам геометрических расчетов на один котел типа ТП-82 требуется установка четырех ИП с ИК-камерами с углом сканирования по горизонтали $24^\circ - 25^\circ$ и разрешением кадра не менее 320 пикселей. По представленным на рис. 5 экспериментальным термограммам видно, что все трубы НПП попадают в поле зрения ИК камеры и отсутствует отраженное излучение от мазутного факела.

Выводы и заключение. Проведена разработка структурной схемы инфракрасного мониторинга температуры металла с учетом рекомендаций специалистов по котельному оборудованию СП «ТЭЦ-3» АО «ТГК-11». Экспериментально подтвержден разработанный вариант установки инфракрасных преобразователей, позволяющий наблюдать распределение температур по всей поверхности пароперегревателя.

По результатам работы подана заявка в ФИПС на полезную модель «Система контроля температурного режима пароперегревателя топки котла». В ходе работ планируется разработка программного обеспечения для визуализации контролируемого поля температур в виде цветовой палитры и температурных профилограмм на экране монитора компьютера в режиме реального времени и в ретроспективе.

Библиографический список

1. Артамонов В. В. О признаках эксплуатационных разрушений пароперегревателей под действием перегрева // Контроль. Диагностика. 2010. 163 с.
2. Roy R. K., Das S. K., Panda A. K., Mitra A. Analysis of superheater boiler tubes failed through non-linear heating // Procedia Engineering. 2014. Vol. 86, P. 926–932. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.115.
3. Priymak E. Y., Gryzunov V. I. Special features of behavior of the metal of convection superheater in the process of high-temperature operation // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 53 (3). 2011. 136–140. DOI: 10.1007/s11041-011-9356-4.
4. Haghight-Shishavan B., Firouzi-Nerbin H., Nazarian-Samani M. [et al]. Failure analysis of a superheater tube ruptured in a power plant boiler: Main causes and preventive strategies // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 98. P. 131–140. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.016.
5. Исаев В. А., Коневков А. М. Особенности исследования тепловых и гидродинамических процессов в пароперегревателях паровых котлов // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 11-1(55). С. 104–110.
6. Falahatkar S., Pour-Reza T., Karimi H. The application of radiation shields for thermal control of superheater tubes in boiler // Energy and Power Engineering. 2012. Vol. 4, no. 2. P. 77–84. DOI: 10.4236/epe.2012.42011.
7. Боровский А. В., Герасимов Л. Н., Дружинин С. А. [и др.]. Инфракрасный измерительный комплекс для стационарного контроля пылеугольной топки // Современные технологии автоматизации. 2000. № 4. С. 70–77.
8. Захаренко В. А., Пономарев Д. Б., Шкаев А. Г. Пирометрический контроль топочного пространства котлоагрегатов ТЭЦ // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 4. С. 207–212.
9. Соколов В. В., Литвинова Л. А. Тепловые нагрузки в топке котла энергоблока 800 МВт при сжигании природного газа // Теплоэнергетика. 1985. № 5. С. 55–58.
10. Макаров А. Н. Аналитическое моделирование факела и теплообмена в печах, топках, камерах сгорания // VI Минский международный форум по теплообмену (Минск, 19–23 мая 2008 г.). Минск, 2008. 13 с.
11. Таймаров М. А., Лавирко Ю. В. Лучистый поток от факела в котлах ТГМ-96 и ТГМЕ-464 // Известия КГАСУ. 2016. № 1. С. 143–149.

ВАЛЬКЕ Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 5219-4823

AuthorID (SCOPUS): E-5132-2014

Адрес для переписки: alex_siberia@mail.ru

ЗАХАРЕНКО Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2501-4655

AuthorID (SCOPUS): 7006028243

ResearcherID: E-5359-2014

Адрес для переписки: zaha_vl@mail.ru

ЛОБОВ Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 369378

AuthorID (SCOPUS): E-6010-2014

Адрес для переписки: dg-lobov@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код РИНЦ: 3054-6265

AuthorID (SCOPUS): 5519010850

ResearcherID: E-5169-2014

ORCID: 0000-0002-5206-0756

Адрес для переписки: dimi3i@mail.ru

ШКАЕВ Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5947-5090

AuthorID (SCOPUS):

ResearcherID: E-5276-2014

Адрес для переписки: Shkayev@mail.ru

НИКОЛАЕВ Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1649-8920

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

Адрес для переписки: munp@yandex.ru

ЛУКУТА Сергей Владимирович, главный специалист ПТО Технического блока АО «ТГК-11», г. Омск.

Адрес для переписки: lukuta_sv@tgk11.com

Для цитирования

Вальке А. А., Захаренко В. А., Лобов Д. Г., Пономарев Д. Б., Шкаев А. Г., Николаев М. Ю., Лукута С. В. Инфракрасный мониторинг температуры металла поверхности труб пароперегревателей в переходных режимах // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 103–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-103-108.

Статья поступила в редакцию 05.11.2022 г.

© А. А. Вальке, В. А. Захаренко,

Д. Г. Лобов, Д. Б. Пономарев,

А. Г. Шкаев, М. Ю. Николаев, С. В. Лукута

ПРИМЕНЕНИЕ ХРОМАТО-МАСС СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛОТНОГО СОСТАВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

В настоящей статье приведены результаты исследования кислотного состава трансформаторного масла из высоковольтных трансформаторов, эксплуатируемых более 30 лет. Кислотный состав масел изучен с помощью новой методики, базирующейся на высокочувствительном и высокоселективном методе анализа — газовая хроматография с масс-селективным детектором (хромато-масс спектрометрии). Методика позволила определить кислотный состав изоляционного масла в разрезе низкомолекулярные кислоты (НМК), высокомолекулярные кислоты (ВМК) и фенольные соединения (ФС). Приведена структура некоторых соединений, идентифицированных в масле. Установлено, что при старении масла из числа кислотных соединений преимущественно образуются: ВМК (60–95 %) > ФС (3–16 %) > НМК (1–6 %). В рамках проведенных исследований установлено, что доля наиболее опасных низкомолекулярных кислот от общего количества кислотных соединений составляет не более 6 %. Остальная кислотность масла обусловлена наличием высокомолекулярных и фенольных соединений, которые не оказывают отрицательного влияния на изоляционные свойства масла и бумаги в обнаруженных концентрациях, а некоторые из них (соединения фенольной природы), наоборот, даже улучшают стабильность против окисления. Данные расширенные испытания проб масла из действующего высоковольтного оборудования представляют практическую ценность в превентивной диагностике состояния его изоляции.

Ключевые слова: изоляционное масло на нефтяной основе, кислотный состав, хромато-масс спектрометрия, высоковольтный трансформатор.

В действующем высоковольтном оборудовании изоляционное минеральное масло подвергается старению, в результате чего образуются разные вещества, в том числе кислотные соединения. Согласно литературным данным [1, 2], при старении трансформаторного масла образуются карбоновые кислоты, основными из которых являются муравьиная, уксусная, пропионовая, масляная и леволиновая кислоты. Перечисленные кислоты условно можно отнести к низкомолекулярным соединениям. Однако нефтяное масло состоит из целого спектра углеводородов различного строения и молекулярной массы, соответственно, при их окислении образуется огромное количество продуктов, в том числе высокомолекулярные кислоты (ВМК) [3]. Установлено, что сами по себе кислоты, образуя в масле истинный раствор, не ухудшают изоляционные характеристики масла [1, 4]. Однако присутствие воды в масле усиливает их воздействие на электрическую прочность [5–7]. Так, низкомолекулярные кислоты (НМК) — муравьиная и уксусная кислота в концентрациях, равнозначных кислотному числу (КЧ) масла 0,1 мгКОН/г, заметно снижает пробивное напряжение масла [5, 6]. Высокомолекулярные

кислоты, содержащиеся в масле до 4 мгКОН/г, не оказывают отрицательного влияния на электрическую прочность жидкой изоляции [7]. Анализ литературы показал, что высокие значения КЧ масла удается получить лишь в специальных лабораторных экспериментах [1, 2, 4, 8–13]. В рабочих же пробах трансформаторного масла значение КЧ редко достигает 0,8 мгКОН/г масла [4, 8–14]. Несмотря на это, снижение электрической прочности масла может происходить за счет синергического эффекта НМК и воды. В литературе отмечается также о взаимосоусиливающем действии кислот и перекисей на коррозию металлов [2, 3]. Опыты показывают, что в отсутствии перекисей даже при высокой кислотности масла коррозия остается незначительной. Напротив, масло с высоким содержанием перекисей и низким количеством кислот вызывает значительную коррозию [2]. Поэтому контроль содержания кислотных соединений в масле имеет не последнее значение.

На практике количественной мерой наличия кислотных соединений в эксплуатационном трансформаторном масле является кислотное число. В настоящее время все методики, которые исполь-

Условия проведения хромато-масс спектрометрического анализа

Газовый хроматограф/Детектор (в режиме полного сканирования)	Clarus 500 MS (Perkin Elmer)/масс-селективный с электронноударной ионизацией, энергия 70 эВ
Характеристики колонки	Капиллярная колонка Solgel-WAX, длина 60 м, внутренний диаметр 0,32 мм, толщина пленки неподвижной фазы 0,25 мкм
Газ-носитель	Гелий (в режиме постоянного потока, контроль скорости потока по давлению, начальное давление в колонке 14 psig)
Коэффициент деления потока	20/1,52 (общий поток/номинальный)
Температура инжектора	300 °С
Объем вводимой пробы	1 мкл
Температура детектора	220 °С
Температура термостата колонок (программируемый режим)	Начальная 40 °С (выдержка 10 мин), нагрев до 160 °С (со скоростью 20 °С/мин, выдержка 10 мин), нагрев до 250 °С (со скоростью 10 °С/мин). Общее время анализа 60 мин.
Температура трансфер-лайна	250 °С
Режим записи масс-спектров	Диапазон сканирования масс от 10 до 450 а.е.м., задержка включения филамента 0,00–0,20 мин и 5,00–6,50 мин. Режим полного ионного тока.
Программа библиотечного поиска и обработки хроматограмм	AMDIS, THERMO XCALIBUR версия 4.0
Библиотека масс-спектров	NIST 2017
Метод расчета концентрации	Метод внутреннего стандарта с применением растворов чистых веществ (уксусной, гексановой кислоты и их эфиров, фенол) в масле

зуются для определения КЧ в изоляционном масле, базируются на методе кислотно-основного [15] и потенциометрического [16] титрования. Однако ни один из стандартизованных методов не позволяет определить кислотный состав изоляционного масла в разрезе НМК и ВМК. Продуктами деструкции масла также могут быть фенольные соединения (ФС). Некоторые фенольные соединения проявляют слабые кислотные свойства, а значит, реагируют с молекулами гидроксида калия. Следовательно, фенольные соединения вносят свой вклад в значение КЧ масла, но при этом их сила значительно ниже органических кислот. Данные соединения технически не могут быть определены кислотно-основным титрованием. Поэтому целью настоящего исследования является анализ компонентного состава эксплуатационного трансформаторного масла из высоковольтных трансформаторов в разрезе НМК (низкомолекулярные кислоты), ВМК (высокомолекулярные кислоты) и ФС (фенольные соединения) с помощью, разработанной нами методики, базирующейся на газовой хроматографии с масс-селективным детектором (ГХ/МС).

Основная часть. В качестве объектов исследования были выбраны пробы трансформаторного масла марок ТКп (с высоким содержанием ароматических углеводородов) из баков высоковольтных трансформаторов.

К низкомолекулярным кислотам условно относятся органические кислоты с числом атомов углерода C_1-C_5 [2, 3]. Анализ НМК заключался в разбавлении пробы масла органическим растворителем, введении определенной дозы смеси в испаритель и последующем снятии масс-спектров и хроматограмм. В качестве растворителя использовался гептан. Соотношение масло к растворителю — 1:1.

Число атомов углерода в высокомолекулярных кислотах от C_6 и выше. Качественному и количественному определению ВМК предшествовала пробоподготовка, а именно превращение всех ВМК

в метиловые или этиловые эфиры (этерификация). Процедура этерификации ВМК в эфирные соединения проводилась по ГОСТ 31665.

Условия проведения хромато-масс анализа трансформаторного масла подробно описаны в табл. 1. Поиск пиков НМК и ВМК на хроматограммах проводился в режиме селективного ионного тока. Идентификация соединений осуществлялась с использованием библиотеки масс-спектров NIST 2017.

Анализ трансформаторного масла на содержание фенольных соединений проводили по методике [17].

Относительная погрешность хромато-масс спектрометрического определения веществ в пробах в условиях сходимости не превышала 10 % ($P=0,95$).

В табл. 2 представлены результаты определения кислотного состава методом ХМС в пробах эксплуатационного масла. Значения НМК, ВМК и ФС даны в пересчете на КЧ масла [мгКОН/г]. Долю всех обнаруженных кислотных соединений ($\varphi_{\text{кч}}$) от общей кислотности масла рассчитывали по формуле 1:

$$\varphi_{\text{кч}} = \frac{(\sum \text{НМК} + \text{ВМК} + \text{ФС})}{\text{КЧ}} \cdot 100\% \quad (1)$$

В последней колонке табл. 2 записаны полученные значения. В исследованных пробах масла доля кислотных соединений, обнаруженных методом ХМС, варьируется от 68 до 86 %, среднее значение — 77 %. Остальные 14–32 % от общего значения КЧ, скорее всего, приходятся на более тяжелые фракции окисленных углеводородов масла, которые методом хромато-масс спектрометрии не удалось идентифицировать. По химическому смыслу данные соединения имеют карбоксильные и/или гидроксильные группы (в случае высокомолекулярных фенолов), в которых атом водорода способен замещаться атомом калия при титровании раство-

Кислотный состав эксплуатационного масла из высоковольтных трансформаторов

№ п/п	КЧ·10 ⁻³ , мгКОН/г масла [15]	Кислотный состав (·10 ⁻³), мгКОН/г масла (метод ХМС)				Ф _{кис.} , %
		НМК	ВМК	ФС	Сумма кислотных соединений	
1	21	0,49	10,78	3,68	14,95	71,2
2	16	0,50	8,47	2,81	11,78	73,6
3	18	0,39	10,24	3,34	13,97	77,6
4	16	0,26	7,95	3,12	11,2	70,0
5	8	0,25	4,15	2,47	6,72	84,0
6	9	0,24	4,78	1,38	6,41	71,2
7	6	0,30	3,33	1,32	4,94	82,4
8	6	0,20	3,46	0,77	4,42	73,7
9	5	0,22	2,55	0,81	3,58	71,6
10	11	0,24	5,27	1,98	7,49	68,1
11	15	0,43	8,31	2,66	11,4	76,0
12	7	0,17	4,23	0,91	5,31	75,8
13	9	0,25	5,71	1,17	7,13	79,2
14	6	0,06	3,84	0,79	4,7	78,3
15	6	0,05	4,03	0,74	4,82	86,0
16	12	0,03	8,45	1,58	10,06	83,8
17	7	0,08	4,37	0,84	5,29	75,5
18	22	0,34	16,45	1,7	18,48	84,0
19	8	0,13	6,01	0,19	6,34	79,2
20	2	0,03	1,56	0,05	1,65	82,4
21	1	0,02	0,75	0,02	0,79	79,2
22	1	0,02	0,71	0,02	0,75	75,2

Примечание: содержание НМК приведено в пересчете на уксусную кислоту; ВМК — в пересчете на гексановую кислоту; ФС — в пересчете на фенол.

ром щелочи (гидроксид калия). Такими веществами могут быть сложные органические соединения: нафтеновые и нафтенно-ароматические кислоты, полиаренные фенолы и другие соединения с очень большой молекулярной массой, температура кипения которых выше 300 °С [2]. Кроме того, в масле присутствуют кислые газы, в частности, диоксид углерода, который также титруется спиртовым раствором гидроксида калия по методике кислотно-основного титрования [15], а значит, вносит свой вклад в общую кислотность масла.

Для более наглядного восприятия данных удобно принять сумму НМК, ВМК и ФС за 100 % и оценить вклад каждой группы соединений в общую кислотность масла (табл. 3).

Доля фенольных соединений в масле из баков высоковольтных трансформаторов составляет от 3 % до 16 %. Доля НМК в масле довольно низкая (от 1 до 6 %). Таким образом, общая кислотность изоляционного масла из электрооборудования в наибольшей степени обусловлена наличием ВМК (от 60 до 95 %).

Резюмируя вышесказанное, следует выделить главное. При старении масла марки ТКп из числа кислотных соединений преимущественно образуются: ВМК > ФС > НМК.

Хромато-масс спектральный анализ показал, что для окисленного масла ТКп наиболее характерны ароматические и нафтенно-ароматические карбоновые кислоты, общие формулы которых приведены

на рис. 1. В составе масла также обнаружены моно-, ди- и трехатомные фенолы (рис. 1).

Образование перечисленных соединений в масле ТКп несомненно обусловлено его первоначальным химическим составом и неодинаковым механизмом окисления под влиянием температуры и кислорода воздуха [2, 3]. Напомним, что масло ТКп в относительно большом количестве состоит из ароматических и нафтенных углеводородов, окисление которых приводит к образованию соответствующих кислот и фенолов [1, 2].

Соединения с высокой молекулярной массой, имеющие карбоксильные или гидроксильные группы, не представляют практического интереса. Константа диссоциации труднолетучих соединений значительно меньше 10⁻² (слабые кислоты) и даже ниже, чем 10⁻⁷ (очень слабые кислоты), поэтому многие из них не оказывают заметного влияния на электроизоляционные свойства масла [4, 6].

Таким образом, инструментальный метод — хромато-масс спектрометрии является высокоэффективным и селективным методом анализа веществ. Основным недостатком данного метода является неспособность определения высококипящих соединений. Для успешного определения вещества методом ГХ/МС это соединение должно пройти через колонку газового хроматографа при атмосферном давлении и температуре 250–300 °С. Последнее приводит к невозможности ХМС-анализа без предварительной дериватизации

Таблица 3

Доля низкомолекулярных, высокомолекулярных и фенольных соединений от их суммы в целом (%)

№ п/п	НМК	ВМК	ФС
1	3	72	25
2	4	72	24
3	3	73	24
4	2	71	27
5	4	60	37
6	4	75	22
7	6	67	27
8	5	78	17
9	6	71	23
10	3	70	26
11	4	73	23
12	3	80	17
13	4	80	16
14	1	82	17
15	1	84	15
16	1	84	16
17	2	83	16
18	2	89	9
19	2	95	3
20	2	95	3
21	3	95	3
22	3	95	3

труднолетучих, высокополярных, термолабильных соединений [18]. Однако необходимо признать, что хромато-масс спектрометрический метод позволяет детектировать ультрамикрочастицы на фоне высоких концентраций других соединений [19]. Для этого используется мониторинг заданных ионов — поиск пиков нужных соединений по селективному ионному току. К тому же, в нашем случае, метод

ХМС позволил дифференцировать соединения кислотного характера на НМК, ВМК и ФС и оценить вклад каждой группы соединений в общую кислотность масла. Такой подход имеет практический смысл при оценке состояния изоляционного масла по КЧ. Наиболее нежелательными компонентами для изоляционной системы маслосодержащего высоковольтного оборудования являются НМК [2, 3, 5, 6]. С помощью ХМС-анализа удалось установить, что доля НМК от общего количества кислотных соединений составляет не более 6 % для масла ТКп. Остальная кислотность масла обусловлена наличием ВМК и ФС, которые не оказывают отрицательного влияния на изоляционные свойства масла и бумаги в обнаруженных концентрациях [7], а некоторые из них (соединения фенольной природы), наоборот, даже улучшают стабильность против окисления [20, 21, 22].

Заключение. Наибольшее влияние на ухудшение электроизоляционных свойств, а также на снижение ресурса трансформаторного масла и твердой изоляции оказывают низкомолекулярные кислоты. Особенно их отрицательное воздействие на эксплуатационные характеристики внутренней изоляции усиливается в присутствии воды и перекисных соединений, которые образуются при старении изоляционных материалов.

По разработанной нами методике впервые проведен хромато-масс-спектральный анализ изоляционного масла на определение кислотного состава в разрезе: высокомолекулярные кислоты, низкомолекулярные кислоты, фенольные соединения. Обнаружено, что при старении масла ТКп из числа кислотных соединений преимущественно образуются: ВМК (60–95 %) > ФС (3–16 %) > НМК (1–6 %).

Идентифицированы структуры органических кислот и других соединений, образующихся при старении масла с высоким содержанием ароматических углеводородов. В данном масле преимущественно накапливаются ароматические и нафтоароматические кислоты.

В целом в рамках проведенных расширенных исследований установлено, что значение КЧ во всех пробах эксплуатационного масла остается довольно низким. При этом доля наиболее опасных

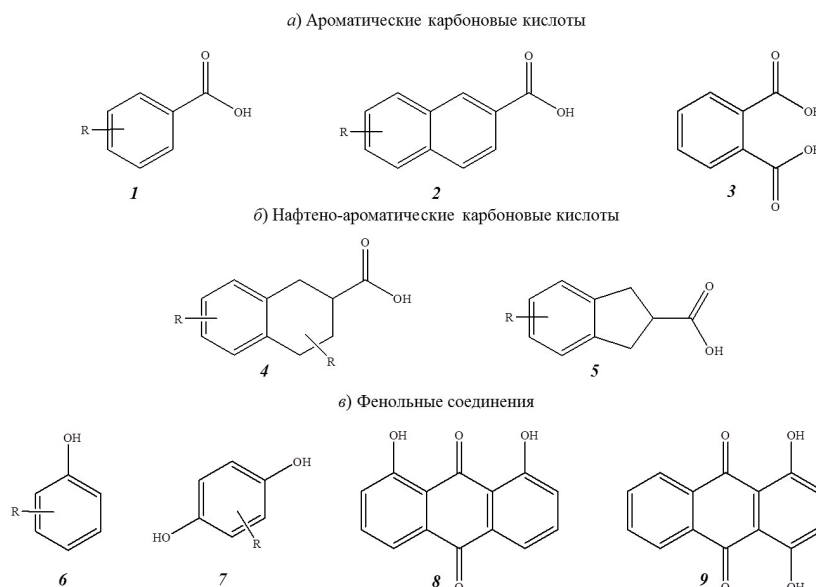


Рис. 1. Общие структурные формулы кислотных соединений масла ТКп из высоковольтных трансформаторов

низкомолекулярных кислот от общего количества кислотных соединений составляет не более 6 %. Остальная кислотность масла обусловлена наличием ВМК и ФС, которые не оказывают отрицательного влияния на изоляционные свойства масла и бумаги в обнаруженных концентрациях, а некоторые из них (соединения фенольной природы), наоборот, даже улучшают стабильность против окисления. Все это подтверждает, что традиционный показатель КЧ (определяемый по методике, базирующейся на кислотно-основном титровании [15]), является «однобоким» параметром и не может использоваться в качестве единственного критерия оценки степени окисленности трансформаторного масла в эксплуатации. Такие расширенные испытания проб масла из действующего высоковольтного оборудования представляют практическую ценность в превентивной диагностике состояния его изоляции.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10198, <https://rscf.ru/project/22-79-10198/>.

Библиографический список

1. Липштгейн Р. А., Шахнович М. И. Трансформаторное масло. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Черножуков Н. И., Крейн С. Э., Лосиков Б. В. Химия минеральных масел. 2-е изд., перераб. Москва: ГНТИНГТА, 1959. 417 с.
3. Иванов К. И. Промежуточные продукты и промежуточные реакции автоокисления углеводородов. Москва-Ленинград: Гостоптехиздат, 1949. 192 с.
4. Джуварлы Ч. М., Иванов К. И., Курлин М. В. [и др.]. Электроизоляционные масла. Москва: ГНТИ Нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. 276 с.
5. Lundgaard L. E., Hansen W., Ingebrigtsen S. Ageing of Mineral Oil Impregnated Cellulose by Acid Catalysis // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008. Vol. 15 (2). P. 540–546. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4483475.
6. Lundgaard L. E., Hansen W., Ingebrigtsen S. [et al.]. Aging of Kraft paper by acid catalyzed hydrolysis // *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*. 2005. P. 381–384. DOI: 10.1109/ICDL.2005.1490105.
7. Lundgaard L. E., Hansen W., Linhjell D. [et al.]. Aging of oil-impregnated paper in power transformers // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19 (1). P. 230–239. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820175.
8. CIGRE Brochure 323. Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers, Task Force D1.01.10. 2007. 87 p. ISBN 978-2-85873-018-6.
9. Martin D., Wijaya J., Lelekakis N. Thermal analysis of two transformers filled with different oils // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2014. Vol. 30 (1). P. 39–45. DOI: 10.1109/MEI.2014.6701106.
10. Fofana I., Bouaicha A., Farzaneh M. [et al.]. Ageing Behaviour of Mineral Oil and Ester Liquids: a Comparative Study // *Annual report of IEEE conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Quebec, QC. 2008. P. 87–90.
11. Fofana I., Bouaicha A., Farzaneh M. [et al.]. Decay products in the liquid insulation of power transformers // *IET Electric Power Applications*. 2010. Vol. 4 (3). P. 177–184. DOI: 10.1049/iet-epa.2009.0181.
12. Heathcote M. J. *Basic Materials in J & P Transformer Book: A Practical Technology of the Power Transformer*. 13th ed. Oxford: Elsevier, 2007. 958 p. ISBN 9780750681643.
13. Hodges P. K. *Mineral base oils and oxidation stability*. Hydraulic Fluids. Oxford: Elsevier, 1996. 167 p. ISBN 0-340-67652-3, 0-470-23617-5.
14. Jalbert J., Rodriguez-Celis E. M., Arroyo-Fernández O. H. [et al.]. Methanol Marker for the Detection of Insulating Paper Degradation in Transformer Insulating Oil // *Energies*. 2019. Vol. 12. 3969. DOI: 10.3390/en12203969.
15. ГОСТ 5985-79. Нефтепродукты. Метод определения кислотности и кислотного числа (с Изменениями № 1, 2). Введ. 1980-01-01. Москва: Изд-во стандартов, 1994. 8 с.
16. ГОСТ Р МЭК 62021-1-2013. Жидкости изоляционные. Определение кислотности. Часть 1. Метод автоматического потенциометрического титрования. Введ. 2014-01-01. Москва: Стандартинформ, 2014. 12 с.
17. Lyutikova M. N., Nekhoroshev S. V., Kuklina V. M. [et al.]. Identification of Impurities of Unknown Composition in Insulating Oil by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) // *Power Technology and Engineering*. 2020. Vol. 54, № 4. P. 594–599. DOI: 10.1007/s10749-020-01257-0.
18. Sparkman D. O., Penton Z. E., Kitson F. G. *Chromatography and Mass Spectrometry*. 2nd ed. Oxford: Gas Elsevier Inc., 2011. 632 p.
19. Kitson F. G., Larsen B. S., VeEwen C. N. *Gas chromatography and mass spectrometry. A practical guide*. Oxford: Academic press, 2002. 389 p.
20. Рогинский В. А. Фенольные антиоксиданты. Реакционная способность и эффективность. Москва: Наука, 1988. 247 с.
21. Кулиев А. М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. 2-е изд., перераб. Ленинград: Химия, 1985. 312 с.
22. Jakubczyk M., Michalkiewicz S. Electrochemical behavior of butylated hydroxyanisole and butylated hydroxytoluene in acetic solutions and their voltammetric determination in pharmaceutical preparations // *Int. J. Electrochem. Sci*. 2018. № 13. P. 4251–4266.

ЛЮТИКОВА Марина Николаевна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Безопасность труда» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), г. Новосибирск.

SPIN-код: 7758-4477

AuthorID (РИНЦ): 941492

ORCID: 0000-0002-0824-9025

Адрес для переписки: m.lyutikova@mail.ru

КОРОБЕЙНИКОВ Сергей Миронович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Безопасность труда» НГТУ, г. Новосибирск.

AuthorID (РИНЦ): 36968

AuthorID (SCOPUS): 6602670644

ORCID: 0000-0001-7581-5042

ResearcherID: A-9683-2014

Адрес для переписки: korsermir@gmail.com

РИДЕЛЬ Александр Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Безопасность труда» НГТУ, г. Новосибирск.

SPIN-код: 7327-4710

AuthorID (РИНЦ): 1084734

ORCID: 0000-0002-5385-2237

Адрес для переписки: ridel@corp.nstu.ru

Для цитирования

Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Ридель А. В. Применение хромато-масс спектрометрии для определения кислотного состава трансформаторного масла // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 109–113. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-109-113.

Статья поступила в редакцию 19.12.2022 г.

© М. Н. Лютикова, С. М. Коробейников, А. В. Ридель

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУЙНО-КАПЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО, МАГНИТНОГО И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЕЙ МЕТОДОМ ВИСЯЩЕЙ КАПЛИ. ЧАСТЬ 1

В статье рассматриваются принцип действия и основные компоненты струйно-капельных оптических измерительных систем, работающих на основе метода висящей капли для контроля напряженностей электрического поля, магнитного поля и гравитационного поля.

Для осуществления чувствительности висящей капли к электрическому или магнитному полям предложено ее электростатически заряжать или создавать ее из магнитной жидкости, а ее масса позволяет чувствовать изменения гравитационного поля. Использование магнитных жидкостей в качестве основы висящей капли наиболее многофункционально для измерений напряженностей электрического поля, магнитного поля и гравитационного поля.

Рассматривается реализация нулевого метода измерений с использованием висящей капли в качестве устройства сравнения, нуль-органа, воспринимающей разность воздействий измеряемого и опорного(ых) поля(ей) на уровне квазиулевых трехкоординатных смещений. Они измеряются высокоточными оптическими способами измерений. Анализируются различные варианты современных оптических систем измерений.

Ключевые слова: висящая капля, напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля, напряженность гравитационного поля, магнитная жидкость, магнитометр, гравиметр, матричный видеорегистратор.

Введение. В исследованиях космического пространства и небесных тел возникает потребность измерений напряженности электрического поля (НЭП), напряженности магнитного поля (НМП) и напряженности гравитационного поля (НГП). Контроль НЭП и НМП также используется при проверках элетромагнитной совместимости узлов на разных стадиях создания космических аппаратов (КА).

Контроль геомагнитных параметров Земли является важной задачей с возможностью использования их для навигации и локации КА. Поэтому прогресс в создании универсальных методов и средств измерения НЭП, НМП и НГП является актуальной задачей.

Измерениям этих параметров посвящено много научных публикаций [1–6], и активность таких исследований обусловлена бурным развитием микро-, оптоэлектроники и других направлений технической физики.

В авторских работах [7–9] обсуждались вопросы построения струйно-капельных оптических измерительных систем (СКОИС) для измерения НЭП. В основе их работы лежат две идеи:

1) создание направленного потока заряженных капель, траектория движения которых чувствительная к воздействию НЭП, как в кинескопе телевизора;

2) использование капель в качестве криволинейных отражателей для стробоскопического триангуляционного оптического измерителя этих смещений.

Однако такие СКОИС сложны в реализации, имеют ограничения функциональных возможностей за счет контроля только лишь НЭП и ограничения чувствительности по следующим причинам:

— из-за предельного значения заряда капель, определяемого условием Рэллея, связанного с возможным вынужденным их дроблением;

— импульсного режима работы измерительной системы;

— осуществления триангуляционных измерений с необходимостью измерений поперечных смещений лазерного луча относительно его оси, обладающего существенно меньшей разрешающей способностью по сравнению с т.н. «продольными» измерениями смещений.

Совершенствование СКОИС за счет устранения или минимизации этих недостатков обуславливает поиск новых технических решений. И одно из направлений может быть связано с использованием неподвижных капель: висящей (висячей) на капилляре или лежащей на поверхности, например, магнитной жидкости (МЖ), чувствительной к НЭП, НМП и НГП с высокоточным определением ее положения.

Применение метода висящей капли наиболее распространено в тензиометрии для измерения поверхностного или межфазного натяжения жидкостей и в смежных областях [10–12]. И поэтому разработка и исследование многофункциональных СКОИС для измерений НЭП, НМП и НГП на основе метода висящей капли является актуальной задачей. Рассмотрение таких СКОИС в открытой печати ранее не было представлено. Данная работа направлена на устранение этого недостатка.

Данная статья является началом серии статей, рассматривающих принцип действия и основные компоненты СКОИС на основе висящей капли.

1. Основы принципа действия и устройство СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП. В разделе обсуждаются принцип действия СКОИС с висящей каплей для контроля НЭП, НМП и НГП и одно из устройств, реализующих ее.

1.1. Основы принципа действия СКОИС контроля НЭП, НМП и НГП.

В основе данного способа измерений лежит возможность использования в качестве чувствительного элемента к постоянным или медленно меняющимся НЭП, НМП и НГП висящей капли с одновременным высокоточным оптическим контролем ее смещений. Для измерений используются следующие способности:

- висящая капля с электростатическим зарядом $q_{\text{кап}}$ чувствительна к электрическому полю E ;
- висящая капля из МЖ чувствительна к магнитному полю H ;
- висящая капля обладает массой $m_{\text{кап}}$ и поэтому чувствительна к гравитационному полю G .

В процессе измерений на висящую каплю помимо входных измерительных параметров $E_{\text{изм}}$, $H_{\text{изм}}$ и $G_{\text{изм}}$ оказывают влияние компенсирующие воздействия опорными (мерами) параметрами: электрическим полем $E_{\text{он}}$, если висящая капля заряжена, и/или магнитным полем $H_{\text{он}}$, если висящая капля создана на основе МЖ. Так, итоговое смещение пытаются свести к квазинулевому минимальному разрешимому смещению на уровне порога чувствительности. Этим реализуют нулевой метод измерений, в котором висящая капля, выполняет функцию трехкоординатного устройства сравнения (нульоргана, компаратора) разности между входными и опорными параметрами. Принимается квазистатический режим работы СКОИС с низкой, стремящейся к нулю $v_{\text{кап}} \rightarrow 0$ скоростью движения висящей капли.

Выражение для векторного результата такого сравнения с использованием квазинулевого вектора $\Delta l_{\text{р}\Sigma}$ можно записать в общем виде:

$$\overline{\Delta l(E_{\text{изм}}, H_{\text{изм}}, G_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}}, H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}} \approx 0, \quad (1)$$

где $\overline{\Delta l(E_{\text{изм}}, H_{\text{изм}}, G_{\text{изм}})}$ — смещение висящей капли при воздействии измеряемых параметров НЭП, НМП и НГП, $\overline{\Delta l(E_{\text{он}}, H_{\text{он}})}$ — смещение висящей капли при общем воздействии опорных НЭП и НМП; $\overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}}$ — квазинулевой вектор, определяемый разрешающей способностью измерений трехкоординатных смещений висящей капли.

На данном этапе исследований СКОИС на основе висящей капли из-за сложности учета всех физических параметров и составляющих погрешности примем, что порог чувствительности измерений $\Delta l_{\text{пор}\Sigma}$ равен разрешающей способности $\Delta l_{\text{р}\Sigma}$ средств

измерений трехкоординатных смещений висящей капли: $\Delta l_{\text{пор}\Sigma} = \Delta l_{\text{р}\Sigma}$, используя в дальнейшем второй параметр.

Соответственно, при независимых воздействиях измеряемых параметров выражение (1) можно разложить на три формулы:

при измерениях НЭП:

$$\overline{\Delta l(E_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}}; \quad (2)$$

при измерениях НМП (в режиме работы магнитометра):

$$\overline{\Delta l(H_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}}; \quad (3)$$

при измерениях НГП (в режиме работы гравиметра):

$$\overline{\Delta l(G_{\text{изм}})} - \overline{\Delta l(E_{\text{он}})} - \overline{\Delta l(H_{\text{он}})} = \overline{\Delta l_{\text{р}\Sigma}}; \quad (4)$$

где $\overline{\Delta l(E_{\text{изм}})}$ и $\overline{\Delta l(E_{\text{он}})}$ — смещения висящей капли с электростатическим зарядом $q_{\text{кап}}$ при воздействии на нее измеряемого $E_{\text{изм}}$ и опорного $E_{\text{он}}$ электрических полей, $\overline{\Delta l(H_{\text{изм}})}$ и $\overline{\Delta l(H_{\text{он}})}$ — смещения висящей капли МЖ при воздействии на нее измеряемого $H_{\text{изм}}$ и опорного $H_{\text{он}}$ магнитных полей, $\overline{\Delta l(G_{\text{изм}})}$ — смещения висящей капли от воздействия измеряемого гравитационного поля $G_{\text{изм}}$.

Длина вектора $\Delta l_{\text{р}\Sigma}$ определяется геометрической суммой трехкоординатных составляющих $\Delta l_{\text{р}x}$, $\Delta l_{\text{р}y}$ и $\Delta l_{\text{р}z}$, принимая условие нормального распределения каждой из них:

$$\Delta l_{\text{р}\Sigma} = \sqrt{\Delta l_{\text{р}x}^2 + \Delta l_{\text{р}y}^2 + \Delta l_{\text{р}z}^2}, \quad (5)$$

где $\Delta l_{\text{р}x}$, $\Delta l_{\text{р}y}$ и $\Delta l_{\text{р}z}$ — разрешающие способности при измерении смещений висящей капли по трем осям ОХ, ОУ и ОZ.

Висящая капля является объемным телом, поэтому для исключения влияния ее размера на результат нужно осуществлять измерения смещений в двух противоположных точках или с учетом дополнительной опорной координаты. Тогда вместо одного измерения для каждой из трех осей ОХ, ОУ и ОZ будет два, позволяя записать (на примере измерений для оси ОХ):

$$\Delta l_{\text{р}x} = \sqrt{\Delta l_{\text{р}x1}^2 + \Delta l_{\text{р}x2}^2}. \quad (6)$$

С учетом этого уравнение (5) для трех координат можно переписать к виду

$$\Delta l_{\text{р}\Sigma} = \sqrt{\Delta l_{\text{р}x1}^2 + \Delta l_{\text{р}x2}^2 + \Delta l_{\text{р}y1}^2 + \Delta l_{\text{р}y2}^2 + \Delta l_{\text{р}z1}^2 + \Delta l_{\text{р}z2}^2}, \quad (7)$$

которое при использовании одинаковых измерительных средств и равенства $\Delta l_{\text{р}x1} = \Delta l_{\text{р}x2} = \Delta l_{\text{р}y1} = \Delta l_{\text{р}y2} = \Delta l_{\text{р}z1} = \Delta l_{\text{р}z2}$ можно преобразовать к новому выражению (на примере оси ОХ):

$$\Delta l_{\text{р}\Sigma} = \Delta l_{\text{р}x} \sqrt{6} \approx 2,45 \cdot \Delta l_{\text{р}x}. \quad (8)$$

Рассмотрение различных вариантов современных высокоточных оптических измерительных систем контроля смещений висящей капли с учетом полученных выражений будут рассмотрены далее.

1.2. Устройство СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП.

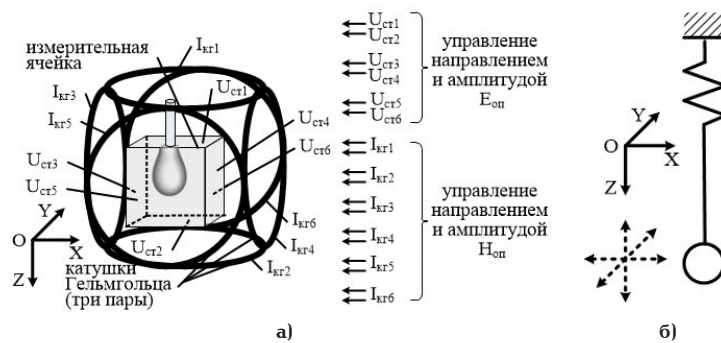


Рис. 1. Измерительная ячейка СКОИС с висящей каплей внутри пустотелого куба и трех пар катушек Гельмгольца (трехкоординатный измеритель смещений капли не показан)

В статье рассматривается вариант СКОИС, в котором измерительная ячейка (рис. 1а) представляет собой пустотелый куб с полупрозрачными металлизированными покрытиями, нанесенными на три его пары противоположных сторон (стенки) размером $I_{ия}$, формирующих три пары обкладок, сориентированных по осям OX , OY и OZ . Сверху к измерительной ячейке подходит тонкий капилляр, формирующий внутри нее с помощью управляемого дозатора (на рис. 1а не показан) из небольшого объема вытекшей жидкости, преимущественно МЖ, висящую каплю, подобно маятнику с возможностью углового отклонения.

Одно из направлений развития подобных исследований может быть связано с использованием в качестве чувствительного элемента маятника на подпружиненном подвесе (рис. 1б) с тремя степенями свободы за счет возможности квазинулевых смещений вдоль осей: OX , OY и OZ . На основе этого возможна группа технических решений, особенности которой будут рассмотрены в следующих авторских публикациях.

Подведение трех сигналов $\Delta U_{on x'}$, $\Delta U_{on y'}$ и $\Delta U_{on z'}$ к трем парам противоположных металлизированных покрытий измерительной ячейки формирует внутри нее пропорциональное опорное электрическое поле E_{on} , состоящее из трех компонент $E_{on x}$, $E_{on y}$, $E_{on z}$. Выражение для E_{on} с учетом зависимости от ΔU_{on} и длины стороны кубической измерительной ячейки $I_{ия}$, можно записать в следующем виде:

$$E_{on} = \frac{U_{on}}{I_{ия}} = \frac{1}{I_{ия}} \sqrt{\Delta U_{on x}^2 + \Delta U_{on y}^2 + \Delta U_{on z}^2} \quad (9)$$

Придание висящей капле электростатического заряда $q_{кан}$ делает ее чувствительной к НЭП, а воздействие на нее трехкомпонентного опорного электрического поля E_{on} определяется силой Кулона $F_{кул}$:

$$F_{кул} = q_{кан} \cdot E_{on} = \frac{q_{кан}}{I_{ия}} \sqrt{\Delta U_{on x}^2 + \Delta U_{on y}^2 + \Delta U_{on z}^2} \quad (10)$$

Естественным ограничением для $\Delta U_{on x'}$, $\Delta U_{on y'}$ и $\Delta U_{on z'}$ является напряжение пробоя, составляющее для воздуха $U_{пр} \approx 20$ кВ/см.

Вокруг измерительной ячейки также расположены три пары соосных катушек Гельмгольца, сориентированных друг против друга, с осями каждой пары вдоль OX , OY и OZ .

Параметры таких катушек Гельмгольца могут быть следующими. В одной из экспериментальных установок [13] однородное магнитное поле вдоль одного из направлений создавалось в зазоре 60 мм между двумя параллельно расположенными катушками Гельмгольца, каждая из которых, имея сопротивление ≈ 8 Ом и индуктивность $\approx 17,5$ мГн, создана намоткой 250 витков в форме кольца диаметром 120 мм проводом диаметром 0,9 мм. Катушки градуировались с использованием тесламетра РНУВЕ, формируя при проходящем в катушках токе 1 А НМП ≈ 3 кА/м (38 Э). Пропускаемый ток в экспериментах мог достигать 3 А.

В исследованиях [14] катушки Гельмгольца имели примерно близкие к вышеуказанным значения параметров. Так, каждая катушка имела внешний диаметр 122,5 мм, состояла из 390 витков провода диаметром 1 мм. И при пропускании тока 4 А НМП достигала 4 кА/м. Протекание токов $I_{x1'}$, $I_{x2'}$, $I_{y1'}$, $I_{y2'}$, I_{z1} и I_{z2} через вышеупомянутые катушки Гельмгольца приводит к формированию однородного магнитного поля H_{on} в пространстве измерительной ячейки 1, амплитуда и пространственное направление вектора которого определяется суперпозицией трех составляющих $H_{on x}$, $H_{on y}$, $H_{on z}$.

Взаимодействие МЖ с внешним магнитным полем можно описать следующим образом. МЖ является суперпарамагнетиком и проявляет свои магнитные свойства только при воздействии внешнего магнитного поля, не сохраняя остаточной намагниченности при его исчезновении. Взаимодействие с внешним магнитным полем проявляется не только в ориентации магнитных моментов частиц, но и во влечении, тяге частиц в область сильного поля.

Суммарный вектор притяжения частиц МЖ, притягивающий ее каплю и смещающий ее на вектор $\Delta(H_{on})$, обусловлен магнитной объемной силой F_{mar} :

$$F_{mar} = \mu_0 \cdot M(H) \cdot H_{on} \quad (11)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость, $M(H)$ — намагниченность МЖ, зависящая от внешнего магнитного поля и являющаяся функцией НМП.

Функция $M(H)$ является нелинейной (рис. 2) и может быть аппроксимирована для двух диапазонов значений НМП. При малых значениях H , не превышающих 5...7 кА/м, которые наиболее интересны для целей данных исследований, проявляется линейная связь между M и H :

$$M(H) = \chi H, \quad (12)$$

где χ — начальная магнитная восприимчивость МЖ.

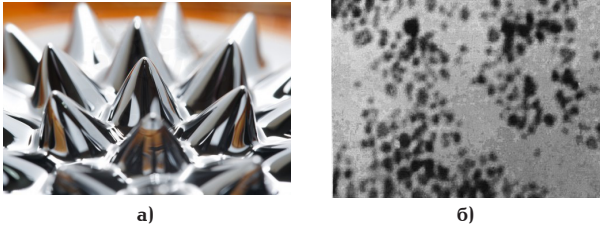


Рис. 2. Магнитная жидкость: пики на поверхности при воздействии внешнего магнитного поля [18], электронная фотография частиц [17]

При возрастании значений НМП, превышающих вышеуказанные значения, для известных экспериментально определенных кривых намагничивания МЖ, часть которых упомянута в [15], активно используется немного упрощенное, но достаточно точное выражение, связывающее M и H [15, 16]:

$$M(H) = \frac{M_s \cdot H}{H_m + H}, \quad (13)$$

где H_m — напряженность полунасыщения, т.е. значение НМП, при котором намагниченность МЖ равна половине намагниченности ее насыщения $M = M_s/2$.

В связи с тем, что НМП H_{on} зависит от трех пар протекающих токов $I_{к11}-I_{к12}$, $I_{к33}-I_{к34}$ и $I_{к55}-I_{к56}$ (рис. 1а), в каждой из трех пар катушек Гельмгольца, расположенных в соответствии с осями ОХ, ОУ и ОZ:

$$H_{on} = k_{mag} \cdot I_{on} = k_{mag} \sqrt{\Delta I_{onx}^2 + \Delta I_{ony}^2 + \Delta I_{onz}^2}, \quad (14)$$

где k_{mag} — коэффициент пропорциональности НМП. Это позволяет записать следующее уравнение:

$$F_{mag} = \mu_0 M(H) H_{on} = \mu_0 M(H) k_{mag} \sqrt{\Delta I_{onx}^2 + \Delta I_{ony}^2 + \Delta I_{onz}^2}. \quad (15)$$

Выражение для силы тяжести, действующей на висющую каплю, с учетом системы координат СКОИС можно записать в следующем виде:

$$F_{тяж} = m_{кан} g = m_{кан} \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}, \quad (16)$$

где g_x , g_y и g_z — три ортогональные компоненты силы тяжести относительно системы координат СКОИС.

2. Жидкости для использования в СКОИС на основе висящей капли для контроля НЭП, НМП и НГП. В соответствии с уравнениями (2)–(4) и принципом действия к жидкости, используемой для формирования висящей капли, предъявляются требования чувствительности к электрическому и/или магнитному полю, а также высокой отражающей способности.

Для измерения НЭП и НГП также могут использоваться обычные технические жидкости без магнитоуправляемых свойств, являясь фактически специальными чернилами. Так они представляют собой водный раствор с непрозрачным красителем (с высоким поглощением излучения) и пигментом типа «металлик» на основе нанопорошков металлов (алюминий, бронза, медь в т.ч. с добавками «под золото») с размерами частиц $\leq 50-100$ нм с высоким

коэффициентом отражения. Особенности использования различных жидкостей в СКОИС ранее уже были рассмотрены в [7–9].

Магнитные жидкости (МЖ) в природе не существуют, были созданы искусственно в середине 1960-х годов и обладают магнитоуправляемыми свойствами (рис. 2а). Основная особенность МЖ заключается в том, что она является суперпарамагнетиком из-за того, что, обладая высокой магнитной восприимчивостью, проявляет свои магнитные свойства только в присутствии внешнего магнитного поля и не сохраняет остаточной намагниченности при его исчезновении. В нулевом магнитном поле совокупность магнитных моментов отдельных наночастиц, составляющих МЖ, направлена произвольно, что в суперпозиции равно нулю.

Структура МЖ представляет взвесь в жидкой немагнитной среде (керосин, вода, толуол, минеральные и кремнийорганические масла и т.п.) микрочастиц размером около 10–15 нм ферро- и ферромагнетиков, например, из высокодисперсного железа, ферромагнитных окислов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , ферритов никеля, кобальта (рис. 2б) [17].

Высококачественные МЖ могут сохранять однородность в течение многих лет. Наиболее распространены в России и странах СНГ являются следующие МЖ [15]: на основе керосина МК-21, МК-43, МК-52, МК-66, МК-72; на основе трансформаторного масла ММТр-10, ММТр-23, ММТр-44 и на основе воды МВ-4. У таких МЖ имеются следующие основные физические характеристики: плотность ρ (в kg/m^3) меняется в диапазоне от 1037 (МВ-4) до 1650 (МК-72), изменения начальной магнитной восприимчивости χ составляют от 0,1 (ММТр-10) до 4,6 (МК-72). В некоторых исследованиях используют МЖ на основе керосина с магнитной восприимчивостью χ , достигающей 7,0 [14].

Намагниченность МЖ имеет явно выраженную нелинейную зависимость от внешнего магнитного поля $M(H)$ (рис. 3). Также у МЖ из вышеупомянутого ряда (рис. 3) намагниченность насыщения M_s (в kA/m) находится в диапазоне от 3,9 (МВ-4) до 72,5 (МК-72), а напряженность полунасыщения H_m (в kA/m) изменяется от 15,4 (МК-66) до 61,0 (ММТр-10).

3. Анализ возможностей высокоточных измерений отклонений висящей капли. Современные высокоточные оптические способы определения смещений висящей капли или изменения ее формы можно условно разделить на три следующие группы, которые подробно рассмотрены далее.

3.1. Измерение смещений висящей капли лазерными 2D или 3D сканерами. Для данной группы принимается допущение о том, что коэффициент отражения МЖ и уровень оптического сигнала, отраженного от нее, достаточен для устойчивой работы сканеров. Их преимущество заключается в автоматическом сканировании, «ощупывании» объекта оптическим потоком и использовании симметричности висящей капли.

3.1.1. 2D сканирование поверхности висящей капли триангуляционным методом. В процессе измерений осуществляется линейное сканирование дискретными точками лазерного луча и определение двух координат каждой точки (рис. 4а). Дискретность сканирования для модели LLT 29xx-10/VL (с лазером голубого излучения) по оси ОХ достигает 1280 точек на профиль (10 мм), составляя $\approx 7,8$ мкм (поперечная разрешающая способность), а оси ОZ разрешение не превышает 1,0 мкм (про-

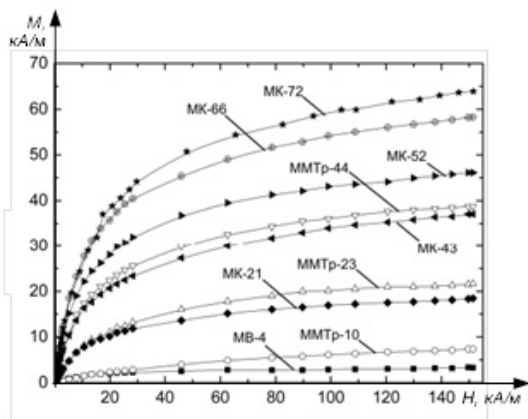


Рис. 3 Кривые намагничивания различных МЖ [15]

дольная разрешающая способность) [19]. Предполагается, что для контроля трехкоординатных смещений висящей капли потребуется два таких датчика: сканирующих ее вдоль осей OX и OZ с учетом ее калиброванной функции формы [10]. Тогда разрешающая способность при измерении трехкоординатных смещений висящей капли упрощенно определится по формуле (5):

$$\Delta l_{p\Sigma} = \sqrt{1,0^2 + 1,0^2 + 7,8^2} \approx 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

3.1.2. 3D сканирование поверхности висящей капли триангуляционным методом. Так, 3D сканирующая система модели LLT30x0-25 (рис. 4б) [19] имеет следующие разрешающие способности: $\Delta l_{px} = \Delta l_{py} = 7,8$ мкм вдоль осей OX , OY и $\Delta l_{pz} = 1,5$ мкм вдоль оси OZ . С учетом выражением (5) получаем

$$\Delta l_{p\Sigma} = \sqrt{7,8^2 + 7,8^2 + 1,5^2} \approx 11,13 \text{ мкм.}$$

Предполагается, что потребуется один такой датчик, сканирующий висящую каплю вдоль осей OX и OZ с учетом ее калиброванной функции формы [10].

3.2. Фронтальное многоточечное измерение смещений висящей капли при помощи однокоординатного измерения продольных смещений.



а)



б)

Рис. 4. Сканирование поверхности контролируемого объекта [19]: 2D сканирование (а), 3D сканирование (б)

Особенность данного подхода заключается в использовании поверхности висящей капли в качестве отражателей для оптического потока.

С учетом этого для расчетов разрешающей способности смещений висящей капли используется выражение (8).

Средства измерений данной группы рассмотрены далее, их общее количество составит 6 шт. На рис. 5 показана схема измерений смещений висящей капли на примере использования измерителей смещений I_{x1} , I_{x2} и I_{z1} , I_{z2} для двух осей OX и OZ соответственно. Процесс измерения включает процедуру поиска, определения максимального утолщения, «экватора» висящей капли.

3.2.1. Триангуляционный датчик смещений optoNCDT 2300-2DR [19] с синим лазером имеет разрешающую способность 30 нм в пределах диапазона измерений 2 мм. Для таких исходных данных значение $\Delta l_{p\Sigma}$ составляет:

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-9} = 73,5 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.2. Конфокальный датчик confocalDT IFS2407 [19] имеет разрешение 3 нм в пределах диапазона измерений 0,1 мм. И, так же как и ранее, используя формулу (16), получаем значение $\Delta l_{p\Sigma}$

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 3 \cdot 10^{-9} = 7,35 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.3. Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS имеет разрешающую способность 30 пм (согласно IMS5600) в пределах диапазона измерений 2,1 мм [19]. Тогда, с учетом формулы (16), можно рассчитать $\Delta l_{p\Sigma}$:

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-12} = 73,5 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

3.2.4. Конфокальный датчик confocalDT IFS2407 имеет разрешение 3 нм в пределах диапазона измерений 0,1 мм [19]. И, так же как и ранее, используя формулу (16), получаем значение $\Delta l_{пор\Sigma}$

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 3 \cdot 10^{-9} = 7,35 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

3.2.5. Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS имеет разрешающую способность 30 пм (согласно IMS5600) в пределах диа-

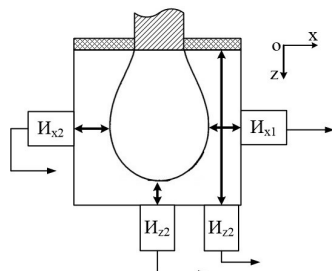


Рис. 5. Многоточечная схема измерений смещений капли

пазона измерений 2,1 мм [19]. Тогда с учетом формулы (16) можно рассчитать $\Delta l_{p\Sigma}$:

$$\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 30 \cdot 10^{-12} = 73,5 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

3.2.6. У современных лазерных интерферометров разрешающая способность для контроля продольных смещений объекта записывается следующим выражением:

$$\Delta l_{\text{прог}} = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi_{\Sigma}}{4\pi} = \frac{\lambda}{2n}, \quad (17)$$

где λ — длина волны, $\Delta\varphi_{\Sigma}$ — суммарная фазовая погрешность, основными составляющими которой в основном, согласно [20], являются шумы измерительной системы лазерного интерферометра, n — коэффициент интерполяции, определяемый фазовой погрешностью $\Delta\varphi_{\Sigma}$.

К настоящему времени разрешающая способность современных лазерных интерферометров для продольных перемещений уже достигла субмикрометрических значений [21, 22]. И для дальнейших расчетов можно достаточно уверенно принять $\Delta l_{\text{прог}} = 1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ м}$, получая $\Delta l_{p\Sigma} = 2,45 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ и, в соответствии с формулой (17), имеем $n = 316 \cdot 10^3$.

3.3. Измерение смещений границы висящей капли в проходящем свете (на просвет). В данной группе представлено два устройства, осуществляющих измерение смещений висящей капли по положению ее боковых границ в трех основных ортогональных плоскостях: XOZ, YOZ и XOY.

3.3.1. Матричный видеорегистратор. В основе подобных высокоточных оптико-электронных пре-

образований контура [10–12] лежит возможность оцифровки входного изображения и для данного случая границы висящей капли путем дискретизации по пространственным координатам и квантования по уровню яркости (рис.7а, выполнен на основе рисунка из [10]). С учетом того, что размер пикселя для современных матричных видеорегистраторов достигает значений 1 мкм [23], то разрешающая способность при таком определении смещений контура висящей капли может также находиться на уровне 1 мкм. Для трехкоординатных измерений смещений висящей капли потребуется два таких матричных видеорегистратора, расположенных в плоскостях YOZ и XOZ.

3.3.2. Лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта. Принцип действия такого устройства основан на смещении поля интерференции двух дифракционных порядков лазерного луча, образованных в результате акустооптического (АО) взаимодействия, от границы объекта с последующим измерением фазового набега [24, 25]. При этом, отличаясь лишь только в оптическом тракте измерительной системы, полностью сохраняется общая структура электронного тракта. Поэтому анализ и расчеты уровня шумов для определения суммарной фазовой погрешности $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и, соответственно, коэффициента интерполяции n , проведенные ранее для лазерных интерферометров измерения продольных смещений и приведенные в п. 3.2.6, можно использовать и для расчета разрешающей способности лазерных интерферометров данного типа. Отличием будет только то, что вместо полупериода $\lambda/2$ (за счет двойного хода лазерного луча) длины волны лазерного излучения в формуле (17) надо использовать длину интерференционной картины $\Lambda_{\text{ИК}}$ или, при некотором упрощении, длину ультразвуковой волны $\Lambda_{\text{УЗВ}}$ АО модулятора: $\Lambda_{\text{ИК}} \approx \Lambda_{\text{УЗВ}}$. С учетом вышесказанного, разрешающую способность для данного прибора можно определить по формуле:

$$\Delta l_{\text{поп}} = \frac{\Lambda_{\text{УЗВ}}}{n} = \frac{v_{\text{УЗВ}}}{f_{\text{аом}} \cdot n}. \quad (18)$$

Наиболее исследован вариант акустооптического способа определения поперечных смещений на основе АО модулятора со светозвукопроводом из дистиллированной воды (скорость звука

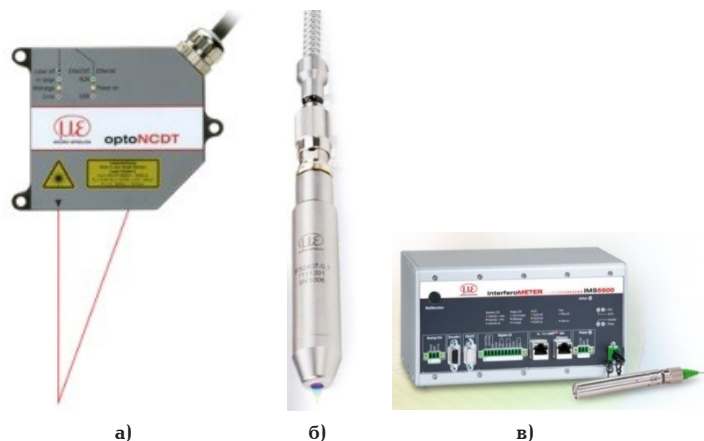


Рис. 6. Устройства для реализации многоточечной схемы измерений смещений капли [19]: триангуляционный датчик смещения optoNCDT 2300-2DR (а), конфокальный датчик confocalDT IFS2407 (б) и лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS (в)

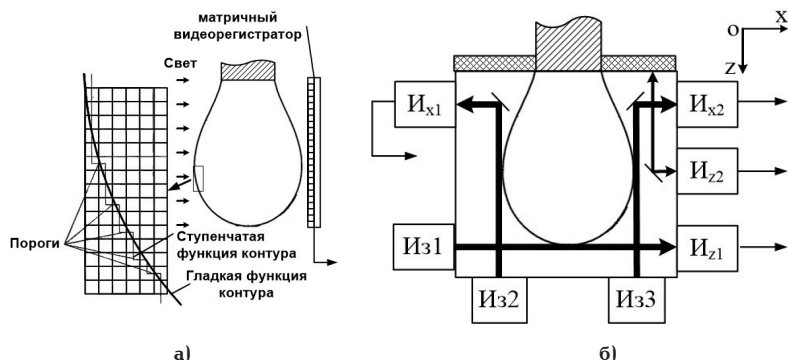


Рис. 7. Устройства измерения смещений границы висящей капли в проходящем свете (на просвет): матричный видеорегистратор (а), лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта (б)

Таблица 1

Достижимые точностные параметры и количество требуемых средств измерений трехкоординатных смещений висящей капли

№	Способ измерения	Разрешающая способность одной координаты $\Delta l_{пор}$, м	Общее количество средств измерений, необходимое для контроля смещений висящей капли, шт	Разрешающая способность измерений трехкоординатных смещений висящей капли $\Delta l_{\rho\Sigma}$, м
1	2D сканирующая система модели SC3500-80	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=7,8 \cdot 10^{-6}$, $\Delta l_{\rho} z_1=10^{-6}$	2	$7,9 \cdot 10^{-6}$
2	3D сканирующая система модели LLT30x0-25	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=7,8 \cdot 10^{-6}$, $\Delta l_{\rho} z_1=1,5 \cdot 10^{-6}$	1	$11,13 \cdot 10^{-6}$
3	Триангуляционный датчик смещения optoNCDT 2300-2DR	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=30 \cdot 10^{-9}$	6	$7,35 \cdot 10^{-9}$
4	Конфокальный датчик confocalDT IFS2407	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=3 \cdot 10^{-9}$	6	$7,35 \cdot 10^{-9}$
5	Лазерный интерферометр белого света interferoMETER 5600-DS	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=30 \cdot 10^{-12}$	6	$73,5 \cdot 10^{-12}$
6	Лазерный интерферометр продольных смещений	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=10^{-12}$	6	$\approx 2,45 \cdot 10^{-12}$
7	Лазерный интерферометр для контроля поперечных смещений границы объекта	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=0,57 \cdot 10^{-9}$, $\Delta l_{\rho} z_1=0,57 \cdot 10^{-9}$, $\Delta l_{\rho} z_2=10^{-12}$	6	$\approx 1,27 \cdot 10^{-9}$
8	Матричный видеорегистратор	$\Delta l_{\rho} x=\Delta l_{\rho} y=\Delta l_{\rho} z=10^{-6}$	2	$\approx 2,45 \cdot 10^{-6}$

$v_{зв} \approx 1450$ м/с), работающего на частоте $f_{аом} = 8$ МГц. Для этих исходных данных получаем разрешающую способность при определении границы капли

$$\Delta l_{нон} = \frac{1450}{8 \cdot 10^6 \cdot 316 \cdot 10^3} \approx 0,57 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Как следует из схемы измерений, представленной на рис. 7б, для контроля смещений висящей капли вдоль осей X и Y нужно по два таких устройства, а вдоль оси Z — такое устройство в паре с интерферометром продольных смещений, описанных в п. 3.2.4. На рис. 7б обозначены: Из1–Из3 — излучатели, Их1, Их2, Из1 — измерители поперечных смещений, Из2 — измеритель продольных смещений. С учетом этого разрешающую способность для трехкоординатных измерений смещений висящей капли можно определить на основе формулы (15) (в нанометрах):

$$\Delta l_{\rho\Sigma} = \sqrt{0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,57^2 + 0,001^2} \approx 0,57\sqrt{5} = 1,27 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Вышеприведенные данные по разрешающим способностям при измерении трехкоординатных смещений висящей капли и общее количество средств измерений, необходимое для таких измерений, сведено в табл. 1.

Заключение

1. Построение СКОИС с осуществлением нулевого способа измерений на основе висящей капли позволяет использовать в непрерывном режиме оптические способы измерений, добиваясь максимально возможной разрешающей способности.
2. Использование магнитной жидкости в качестве основы для создания висящей капли наиболее универсально, позволяя осуществить измере-

ния НЭП, НМП и НГП с компенсацией смещений висящей капли электрическим и/или магнитным полями.

3. Современные высокоточные оптические способы измерений смещений капли могут быть реализованы на основе 2D-, 3D-сканирования, фронтальных многоточечных измерений смещений, в проходящем свете (на просвет границы капли).

4. Смещение висящей капли для воздействия опорных полей наиболее удобно осуществить электрическим полем E_{on} , приданием ей электростатического заряда $q_{кан}$ и воздействием на нее магнитным полем H_{on} при использовании магнитной жидкости в качестве основы капли.

5. Максимальная разрешающая способность при измерении трехкоординатных смещений капли достигается при осуществлении многоточечной схемы измерений с использованием лазерных интерферометров продольных измерений смещений.

Библиографический список

- Zhang B., He J. Space electric field measurement system. CN patent 110488103; filed August 28th, 2019; published January 15th, 2021.
- Yue G., Du Z. High-frequency high-precision space electric field measurement system and method. CN patent 112198374; filed September 30th, 2020; published October 22th, 2021.
- Глуховера Е. Г., Бирюков С. В. Датчики напряженности электрического поля на новых физических эффектах и явлениях // Актуальные проблемы современной науки: материалы IX Регионал. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск, 2020. С. 47–50.
- Ахмеджанов Р. А., Чередов А. И., Щелканов А. В. Градиентометр напряженности магнитного поля // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 75–79. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-75-79.
- Иванов В. В. Автономный орбитальный геомагнитный навигатор // Решетневские чтения. 2011. Т. 2. С. 571–572.
- Конешов В. Н., Михайлов П. С., Соловьев В. Н., Железняк Л. К. Оценка перспективности и разрешающей способности ультравысокотемпературных моделей гравитационного поля земли // Геофизические исследования. 2021. Т. 22, № 1. С. 40–53.
- Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 1 // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-83-90.
- Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем измерений напряженности электрического поля. Часть 2 // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 78–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-78-88.
- Leun E. V. The best sensitive single-coordinate interference jet-drop measurement of electric field strength // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2182. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012095.
- Козлов П. С. Метод, алгоритмы и специализированное оптико-электронное устройство для вычисления флотационной активности реагентов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.05.- Курск, 2013.- 117 с.
- Емельяненко А. М. Разработка новых физических и математических методов исследования равновесия в зоне трехфазного контакта: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2004. 237 с.
- Gupta A., Pandey A., Kesarwani H. [et al.]. Automated determination of interfacial tension and contact angle using computer vision for oil field applications // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. DOI: 10.1007/s13202-021-01398-6.
- Белых С. С. Оптические исследования процессов ориентационного и структурного упорядочения в магнитных эмульсиях: дис. ... канд. тех. наук. Ставрополь, 2022. 159 с.
- Бушуева К. А., Костарев К. Г., Шмырова А. И. Деформация капли феррожидкости, лежащей на жидкой подложке, в однородном вертикальном магнитном поле // Конвективные течения. 2015. № 7. С. 143–157.
- Моцар А. А. Упруго-диссипативные процессы в ограниченных объемах магнитной жидкости при воздействии магнитных полей применительно к магнитожидкостным виброзащитным устройствам: дис. ... канд. тех. наук. Минск, 2017. 175 с.
- Малсугенов О. В. Каплетруйное движение магнитной жидкости в электрическом и магнитном полях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2003. 158 с.
- Копылова О. С. Особенности движения капли магнитной жидкости в магнитном и электрическом полях: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2006 137 с.
- Магнитная жидкость. Фотография поверхности. URL: <https://moscow.mrplomb.ru/magnitnaya-jidkost-ferrofluid-na-osnove-silikona-30-ml> (дата обращения: 30.01.2023).
- Каталог измерительных датчиков компании Майкро-эпсилон. URL: <https://www.micro-epsilon.com> (дата обращения: 30.01.2023).
- Леун Е. В. К вопросу достижения субмикрометрической разрешающей способности акустооптическим двухканальным лазерным интерферометром перемещений с двумя разночастотными фотоприемниками // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-110-118.
- Isleif K.-S., Heinzl G., Mehmet M., Gerberding O. Compact multifringe interferometry with subpicometer precision // Physical Review Applied. 2019. Vol. 12 (3). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.034025.
- Pisani M. A homodyne Michelson interferometer with subpicometer resolution // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20. 084008. DOI: 10.1088/0957-0233/20/8/084008.
- Занин К. А., Москатынцев И. В. Перспективы развития космических систем оптико-электронного наблюдения с учётом совершенствования полупроводниковых приёмников изображения // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2022. № 3 (57). С. 3–10.
- Заявка 98103176/28 Российская Федерация, МПК G 01 B 9/02, 11/02. Интерференционное устройство для определения положения границы объекта // Телешевский В. И., Абдикаримов Н. Н., Леун Е. В.; заявл. 17.02.98; опубл.10.12.99.
- Заявка 98108359/28 Российская Федерация, МПК G01 B 11/02. Устройство для измерения отклонений размеров деталей // Телешевский В. И., Леун Е. В., Абдикаримов Н. Н.; заявл. 17.02.98.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Москва.

SPIN-код: 6060-8056

AuthorID (РИНЦ): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В. Основы построения струйно-капельных оптических систем трехкоординатных измерений напряженностей электрического, магнитного и гравитационного полей методом висящей капли. Часть 1 // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 114–121. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-114-121.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023 г.

© Е. В. Леун

НАНОСЕНСОРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ЭКГ И ЭЭГ КАРТИРОВАНИЯ

Проблема большого числа больных сердечно-сосудистыми заболеваниями и заболеваниями головного мозга является актуальной во всем мире. Особенно остро стоит проблема смертности и последствий от этих болезней. Поэтому важным направлением в медицинском приборостроении является совершенствование и повышение информативности методов диагностики этих заболеваний. В Томском политехническом университете разработаны наносенсоры, позволяющие существенно повысить качество электрофизиологических измерений. Предложено применить разработанные наносенсоры для ЭКГ и ЭЭГ картирования.

Ключевые слова: наносенсор, ЭЭГ, ЭКГ, картирование.

Введение. Патологии сердечно-сосудистой системы на сегодняшний день лидируют в печальной статистике смертности населения в мире. Это подтверждается данными Всемирной организации здравоохранения. Причем данная причина смерти продолжает лидировать в странах с высоким уровнем дохода, несмотря на снижение в процентном соотношении [1]. Особенно среди всех причин смерти выделяется ишемическая болезнь сердца (ИБС) и инсульт. Необходимо отметить, что по данным статистики 25–30 % больных с подтвержденным диагнозом ИБС умирает внезапно. Наибольшему риску внезапной сердечной смерти в первый час развития инфаркта при этом подвержены больные острым инфарктом миокарда [2]. Инсульт, так же как и ИБС, может привести к смерти. При инсульте симптоматика может сохраняться более 24 часов или приводит к смерти больного в короткий промежуток времени вследствие причины цереброваскулярного происхождения [3].

Методы и средства. Ранняя диагностика состояния сердечно-сосудистой системы и головного мозга является важнейшей составляющей системных мероприятий по повышению долголетия человека и снижению рисков утраты трудоспособности. В целом для диагностики вышеуказанных заболеваний применяются неинвазивные и инвазивные методы.

Для целей ранней диагностики в клинической и поликлинической практике наиболее удобно использовать неинвазивные методы диагностики. Данные методы позволяют получить информацию о состоянии пациента в сочетании с возможностью

динамического наблюдения и реализацией персонализированного подхода.

Выделяют следующие основные методы неинвазивной диагностики: электрографические — электрокардиография (ЭКГ), ЭКГ картирование, электроэнцефалография (ЭЭГ), электромиография, холтеровское мониторирование, магнитокардиография); механографические — апекскардиограмма, баллистокардиограмма, сейсмокардиограмма и визуализационные методы — рентгенографические, ультразвуковые, радионуклидные, рентгеновская компьютерная томография, магнитнорезонансная томография.

Наиболее распространенными методами инструментальных исследований сердца и мозга является ЭКГ, ЭКГ картирование и ЭЭГ. Главной задачей методов ЭКГ и ЭЭГ является измерение и представление в удобном виде для восприятия электрических потенциалов с поверхности тела человека. Кроме того, в последнее время к основным задачам добавилась задача автоматической интерпретации полученных результатов с помощью специального программного обеспечения [4–6]. С помощью ЭЭГ и ЭКГ оцениваются временные (частотные), фазовые и амплитудные характеристики сигналов в определенный момент времени и в динамике. Кроме того, оценивается множество разработанных критериев, производных и интегральных характеристик сигналов с целью выявления отклонений от нормы. Вместе с тем в источниках приводятся разные данные о достоверном значении этих исследуемых показателей и критериев и негативном влиянии на них артефактов. Также

значение некоторых из них подвергается сомнению [7, 8].

В свою очередь, использование одноканальных, 3-, 6-, 12-канальных приборов не позволяет достоверно локализовать участок ишемического повреждения сердечной мышцы или мозга. Для решения этой проблемы были предложены многоканальные системы картирования, включающие в себя более 64 каналов. Примером является разработанная методика поверхностного картирования сердца со всей поверхности грудной клетки. Для реализации этой методики используются многоканальные системы, включающие до 300 датчиков для съема ЭКГ [9, 10]. Методика дает возможность в каждый момент сердечного цикла анализировать электрические потенциалы сердца на поверхности грудной клетки. Визуализация с помощью разработанного программного обеспечения этих потенциалов, по сути, является моментной картиной электрического поля клеток миокарда. Таким образом, на представленной картине можно выделить локальные дефекты электрофизиологических свойств сердца и получить широкие возможности для решения задачи по диагностике ишемической болезни сердца, что подтверждается работами в данном направлении [11–18]. Данная методика требует наличия разработанной математической модели сердца и торса человека.

Различают решение обратной и прямой задач моделирования электрической активности сердца [19]. Обратная задача состоит в том, что по распределению электрического потенциала на поверхности торса восстанавливается распределение потенциалов на поверхности сердца (3D картирование) [20–29]. Обратная задача электрокардиографии, с математической точки зрения, является задачей гармонического продолжения потенциала в сторону источников, т.е. задачей Коши для уравнения Лапласа. Расчетной областью, в которой задается уравнение Лапласа, является часть грудной клетки, ограниченная внешней поверхностью сердца, поверхностью грудной клетки, на которой доступна регистрация ЭКГ, и воображаемыми поперечными сечениями грудной клетки на уровне диафрагмы и ключиц. На части поверхности грудной клетки, где доступна регистрация ЭКГ, задаются полученные в результате ЭКГ-картирования значения электрического потенциала, а также условие равенства нулю нормальной производной потенциала. Эти данные составляют граничные условия задачи Коши. Задача Коши для уравнения Лапласа является некорректно поставленной по Адамару: сколь угодно малые погрешности условия могут привести к произвольно большим погрешностям решения. Для решения задачи Коши для уравнения Лапласа необходимо применять специальные, т.н. регуляризирующие алгоритмы решения. Результатом решения задачи Коши является распределение потенциала на поверхности сердца, которое далее должно быть интерпретировано врачом-диагностом.

Прямая задача состоит в расчете системы уравнений распространения электрического возбуждения по сердечной ткани [30–33]. Для моделирования сердечной активности используется осреднение при переходе от дискретной среды к непрерывной. Наиболее известны монодоменная, бидоменная и многодоменная модели. Для бидоменной модели электрические свойства миокарда описываются системой параболических и эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных.

В рамках данной модели сердечная ткань представлена в виде двух взаимопроникающих сплошных сред — внутриклеточной и внеклеточной. Внутриклеточные и внеклеточные среды взаимодействуют через клеточную мембрану. Процесс взаимодействия описывается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, моделирующих перенос ионов через клеточную мембрану. Мгновенное распределение потенциалов на поверхности сердца переносится на поверхность тела с помощью уравнения Лапласа. Далее оно может быть сопоставлено с измеренным распределением потенциалов. Несовпадение этих распределений требует итерационной коррекции параметров бидоменной модели, в том числе и локализации неоднородностей свойств сердечной ткани. В настоящее время в рамках проекта Chaste (Cancer, Heart and Soft Tissue Environment) существует библиотека классов, позволяющая строить компьютерные модели электрической активности сердечной ткани. Также последние несколько десятилетий активно развиваются методы исследования головного мозга, которые разделились в целом на два направления — функциональное и структурное. ЭЭГ относится к категории функциональных исследований головного мозга. К методам ЭЭГ относятся картирование спектральной мощности ЭЭГ [34–36] и амплитудное картирование ЭЭГ [37, 38].

Обсуждение и выводы. Методы поверхностного картирования дают возможность оценить относительный вклад дипольной и мультипольных частей в поле электрических источников. Тем не менее рассматриваемые методы имеют недостатки в области неинвазивной локализации и оценке размеров патологических областей и ишемии в частности [39]. Это объясняется тем что, в соответствии со свойствами решения уравнения Лапласа высшие пространственные гармонические составляющие поля, создаваемого источником в проводящей среде, ослабевают по мере удаления от источника [40, 41]. Таким образом, слабые сигналы при использовании современного оборудования, представленного на рынке, сглаживаются и практически неразличимы на фоне помех.

В Томском политехническом университете с конца 80-х годов ведутся разработки сенсоров для применения в области электрофизиологических исследований. К настоящему моменту разработаны уникальные наносенсоры с высочайшими метрологическими характеристиками, позволяющими измерять сигналы нановольтового уровня. Кроме того, разработаны и используются в экспериментальной практике аппаратные и программные комплексы на основе разработанных наносенсоров [42]. Наносенсоры представляют собой высокостабильные, малощумящие, неполяризующиеся электроды. Применение данных электродов позволило исключить из измерительной цепи фильтрующие звенья в полосе частот от 0 до 10 кГц. Также разработан модуль преобразования томографического изображения сердца в трехмерную конечно-элементную геометрическую модель. Проводилось тестирование данного модуля на пациентах.

Используя имеющийся опыт и наработки [43–45] предлагается создать многоканальный аппаратно-программный комплекс (АПК) на наносенсорах для регистрации ЭКГ и ЭЭГ потенциалов нановольтового и микровольтового уровня с целью локализации поврежденных и некротических участков методом поверхностного картирования.

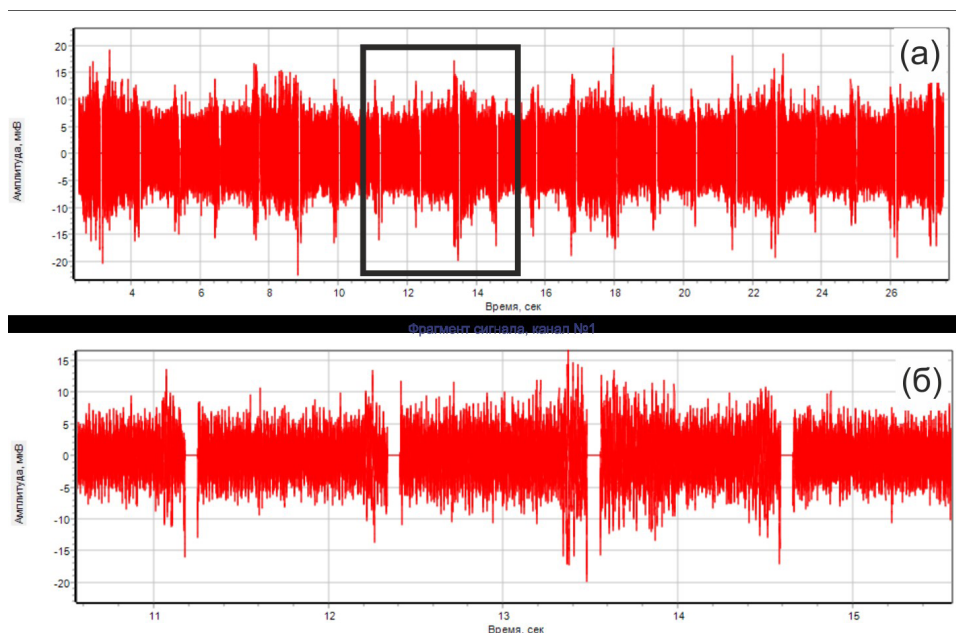


Рис. 1. Микропотенциалы сердца пациента, зарегистрированные до заболевания (27.07.21), 1 отв. по Холтеру

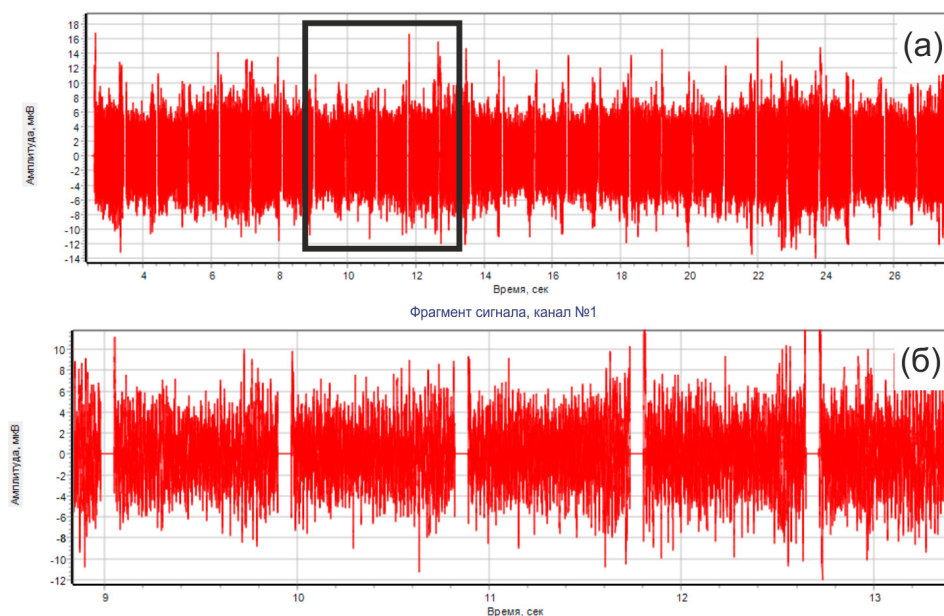


Рис. 2. Микропотенциалы сердца пациента, зарегистрированные после заболевания (24.09.21), 1 отв. по Холтеру. Амплитуда выросла

В предыдущих работах были проведены сравнительные испытания стандартных хлор-серебряных электродов FIAB Spa (Florence, Italy) для записи сигналов ЭКГ и разработанных наносенсоров с использованием 3-канального аппаратно-программного комплекса [46]. Предварительные исследования проводились на добровольцах в Томском НИИ кардиологии. Результаты сравнения стандартных хлор-серебряных электродов и наносенсоров показывают, что разработанные наносенсоры имеют более высокую чувствительность, а также обладают помехоустойчивостью к сетевой помехе. Кроме того, ЭКГ, регистрируемая вдали от источников помех с помощью наносенсоров, не содержит электромагнитных помех в диапазоне от 0 до 10000 Гц.

В последние годы были проведены исследования на добровольцах, в том числе перенесших заболевание COVID-19, вызванное коронавирусом SARS-

CoV-2. Пример результата исследования сердечной мышцы пациента, перенесшего данное заболевание средней тяжести, до заболевания и после представлено на рис. 1 и 2. Анализируя рис. 1 и 2, видно, что амплитуда микропотенциалов уменьшилась после перенесенного заболевания, что свидетельствует о начальной стадии ишемического поражения сердечной мышцы. Полученные результаты были проанализированы с использованием ранее разработанной методики [47, 48]. На рис. 3 представлен результат сравнения средних значений суммарных энергий по всем временным интервалам в следующих амплитудных интервалах: (0,5–1,0) мкВ; (1,1–3,0) мкВ; (3,1–5,0) мкВ; (5,1–20,0) мкВ; 20,1–50,0) мкВ в процентах. Результат первого исследования от 27.07.2021 принимается за 100 %. Как видно из гистограммы, произошло существенное изменение энергии микропотенциалов сердца на боль-

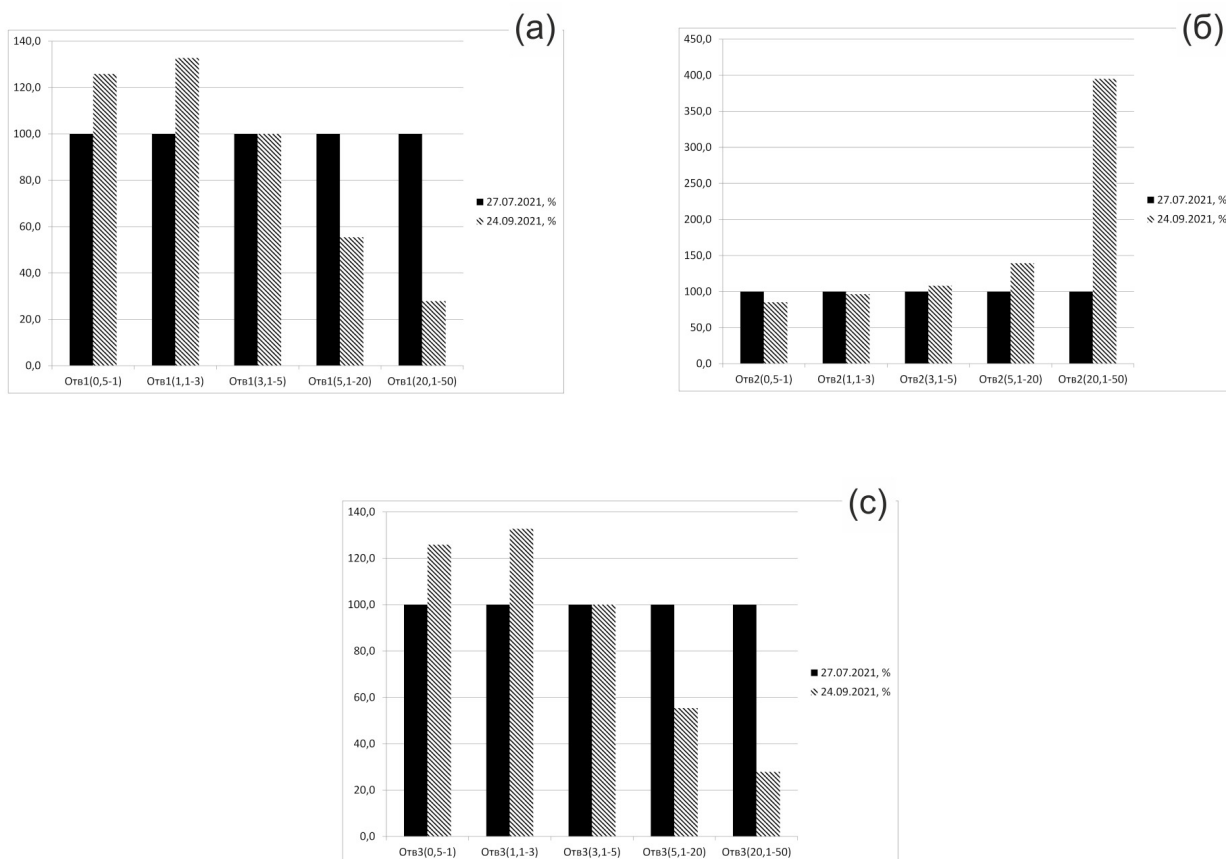


Рис. 3. (а) первое отведение; (б) второе отведение; (с) третье отведение. Сравнение средних значений суммарных энергий по всем временным интервалам в следующих амплитудных интервалах: (0,5–1,0) мкВ; (1,1–3,0) мкВ; (3,1–5,0) мкВ; (5,1–20,0) мкВ; 20,1–50,0) мкВ в процентах. Результат 1-го исследования от 27.07.2021 принимается за 100 %

шинстве интервалов во всех трех отведениях. Также были проанализированы изменения суммарной энергии микропотенциалов в каждом отведении по всем временным и амплитудным интервалам, результат представлен на рис. 4. Данный результат можно получить только с использованием наносенсоров, обеспечивающих высокое разрешение и чувствительность аппаратуры. К сожалению, большинство широко используемых в врачебной поликлинической практике кардиографических приборов и систем не могут измерить столь малые амплитудные изменения в сигнале. С разработкой отечественного аппаратно-программного комплекса такая возможность появилась. Теперь можно неинвазивно диагностировать ишемию на самых ранних стадиях развития и принимать необходимые меры заранее, не дожидаясь тяжелых последствий. Данная методика в том числе подходит и для съема сигналов ЭЭГ.

Использование наносенсоров в предлагаемом методе открывает новые возможности для локализации поврежденных и некротических участков в сердце на самых ранних стадиях развития болезни.

Задача же картирования сердца человека на основе данных от стандартных датчиков ЭКГ технически решена, кроме того, решены прямая и обратная задачи моделирования сердечной активности. Вместе с тем, учитывая уникальные характеристики и информативные возможности разработанных в лаборатории «Медицинская инженерия» Томского политехнического университета наносенсоров, появилась возможностькратно увеличить достоверность и информативность метода картирования

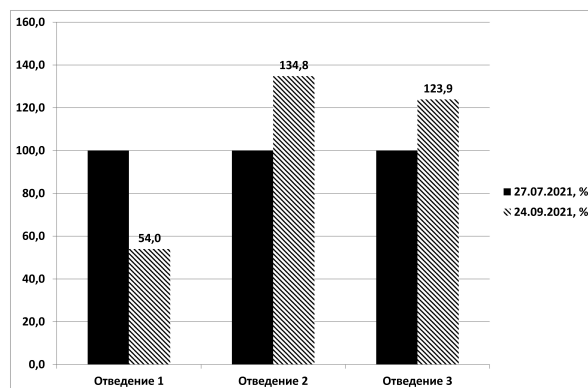


Рис. 4. Изменение суммарной энергии микропотенциалов в каждом отведении по всем временным и амплитудным интервалам. Результат 1-го исследования от 27.07.2021 принимается за 100 %

на основе измерения микропотенциалов сердца. Учитывая кратное увеличение потока информации при многоканальном использовании разработанных наносенсоров для картирования сердца потребуются заново оценить потенциал, доработать существующие модели или разработать новые модели сердечной активности.

Следует отметить, что предлагаемые пути улучшения качества ЭЭГ и ЭКГ картирования также исключают применение дорогостоящего МРТ оборудования, что снизит стоимость самого исследования как для пациента, так и для государства. Кроме того, снизится нагрузка на МРТ оборудование, что

даст возможность использовать его для других исследований пациентов.

Внедрение данной аппаратуры в медицинскую практику позволит исключить у большинства пациентов электрофизиологическое исследование сердца (ЭФИ) и эндокардиальное электрофизиологическое исследование сердца (эндоЭФИ). Следует отметить, что у части пациентов есть такие противопоказания к ЭФИ, как заболевания пищевода, острые инфекционные заболевания, фибрилляция предсердий, тромбы в полостях сердца, острые инфекционные заболевания, острый инфаркт миокарда, нестабильная стенокардия, хроническая сердечная недостаточность, аневризма левого желудочка с тромбом, сердечные механические протезы левых камер сердца при доступе слева.

Для дальнейшего развития представленного метода предлагается продолжить теоретические и практические исследования моделирования сердечной активности и многоканальной регистрации микропотенциалов наносенсорами в реальном времени с целью обнаружения и локализации поврежденных и некротических участков в сердечной мышце и головном мозге человека.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

Благодарности. Авторы благодарят за помощь и консультирование Максимова Ивана Вадимовича, профессора, д.м.н. НИИ кардиологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр (НИМЦ).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

1. The top 10 causes of death // World Health Organization. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (дата обращения: 10.09.2022).
2. Крюков Н. Н., Николаевский Е. Н., Поляков В. П. Ишемическая болезнь сердца (современные аспекты болезни, диагностика, лечения, профилактики, лечения, экспертизы): моногр. Самара, 2010. 651 с. ISBN 978-5-91082-10.
3. Кандыба Д. В. Инсульт // Российский семейный врач. 2016. Т. 20, № 3. С. 5–15. DOI: 10.17816/RFD201635-15.
4. Elgendi M. Fast QRS Detection with an Optimized Knowledge-Based Method: Evaluation on 11 Standard ECG Databases // PLoS One. 2013. Vol. 8 (9). e73557. DOI: 10.1371/journal.pone.0073557.
5. Martis R. J., Acharya U. R., Min L. C. ECG beat classification using PCA, LDA, ICA and Discrete Wavelet Transform // Biomedical Signal Processing and Control. 2013. Vol. 8 (5). P. 437–448. DOI: 10.1016/j.bspc.2013.01.005.
6. Rybalka S., Yuzhakov M., Ivanov M., Nguyen D. K., Kodermjatov R., Guo W., Maksimov I., Zimin Ilya. Methods and Approaches for Automatic Processing and Storage of High-Potential Electrocardiogram Registered by Hardware and Software Complex on Nanosensors // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 155. P. 1008. DOI: 10.1051/mateconf/201815501008.
7. Lip Y. H. Risk of Arrhythmia and Sudden Death // Journal of the Royal Society of Medicine. 2002. Vol. 95. P. 108. DOI: 10.1177/014107680209500219.
8. Bear L. R., Cheng L. K., LeGrice I. J. [et al.]. Forward problem of electrocardiography // Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology. 2015. Vol. 8. P. 677–684. DOI: 10.1161/CIRCEP.114.001573.
9. Lux R. L., Smith C. R., Wyatt R. F. [et al.]. Limited lead selection for estimation of body surface potential maps in electrocardiography // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1978. Vol. 3. P. 270–276. DOI: 10.1109/TBME.1978.326332.
10. Gerstenfeld E. P., Sippens-Groenewegen A., Lux R. L. [et al.]. Derivation of an optimal lead set for measuring ectopic atrial activation from the pulmonary veins by using body surface mapping // Journal of Electrocardiology. 2000. Vol. 33 (1). P. 179–185. DOI: 10.1054/jelc.2000.20307.
11. Ferrer-Albero A., Godoy E. J., Lozano M. [et al.]. Non-invasive localization of atrial ectopic beats by using simulated body surface P-wave integral maps // PLoS One. 2017. Vol. 12 (7). e0181263. DOI: 10.1371/journal.pone.0181263.
12. Yoram R. Noninvasive Electrocardiographic Imaging of Arrhythmogenic Substrates in Humans // Circulation Research. 2013. Vol. 112 (7). P. 863–74. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.112.279315.
13. Ghosh S., Cooper D. H., Vijayakumar R. [et al.]. Early repolarization associated with sudden death: Insights from noninvasive electrocardiographic imaging // Heart Rhythm. 2010. Vol. 7 (4). P. 534. DOI: 10.1016/j.hrthm.2009.12.005.
14. Oster H. S., Taccardi B., Lux R. L. [et al.]. Electrocardiographic Imaging Electronic text // Circulation. 1998. Vol. 97. P. 1496–1507. DOI: 10.1161/01.CIR.97.15.1496.
15. Ramanathan C., Jia P., Ghanem R. [et al.]. Noninvasive Electrocardiographic Imaging (ECGI): Application of the Generalized Minimal Residual (GMRes) Method // Annals of Biomedical Engineering. 2003. Vol. 31. P. 981–994. DOI: 10.1114/1.1588655.
16. Ghanem R. N. Noninvasive electrocardiographic imaging of arrhythmogenesis: insights from modeling and human studies // Journal of Electrocardiology. 2007. Vol. 40. P. 169–173. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2007.06.014.
17. Rajagopal A., Radzicki V., Lee H. [et al.]. Nonlinear electrocardiographic imaging using polynomial approximation networks // APL Bioengineering. 2018. Vol. 2 (4). 46101. DOI: 10.1063/1.5038046.
18. Trobec R. Computer analysis of multichannel ECG // Computers in Biology and Medicine. 2003. Vol. 33. P. 215–226. DOI: 10.1016/S0010-4825(02)00088-4.
19. Артюхина Е. А., Яшков М. В., Ревивили А. Ш. Неинвазивное электрофизиологическое картирование сердца: от разработок к практике // ПКиК. 2020. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neinvazivnoe-elektrofiziologicheskoe-kartirovanie-serdtsa-ot-razrabotok-k-praktike> (дата обращения: 28.02.2021).
20. Бокерия Л. А., Ревивили А. Ш., Калинин В. В., Ляджина О. С., Фетисова Е. А., Симонян Г. Ю. Неинвазивное эндокардиальное картирование желудочков сердца на основе решения обратной задачи электрокардиографии // Вестник аритмологии. 2009. № 57. С. 24–28.
21. Бокерия Л. А., Ревивили А. Ш., Калинин А. В. Программно-аппаратный комплекс для неинвазивного электрофизиологического исследования сердца на основе решения обратной задачи электрокардиографии // Медицинская техника. 2008. № 6. С. 1–7.
22. MacLeod R. S., Brooks D. H. Recent progress in inverse problem in electrocardiology // IEEE Eng. in Med. Bio. Mag. 1998. Vol. 17 (1). P. 78–83. DOI: 10.1109/51.646224.
23. Voth E. J. The inverse problem of electrocardiography: industrial solutions and simulations // JBEM. 2005. Vol. 7 (2). P. 191–194.
24. Asirvatham S., Packer D. L. Validation of non-contact mapping to localize the site of simulated pulmonary vein ectopic foci // Circulation. 2000. Vol. 102. P. 441–446.
25. Schilling R. J., Kadish A. H., Peters N. S. [et al.]. Endocardial mapping of atrial fibrillation in the human right atrium using a non-contact catheter // European Heart Journal. 2000. Vol. 21. P. 550–564. DOI: 10.1053/euhj.1999.1851.
26. Franzone P. C., Taccardi B., Viganotti C. An approach to inverse calculation of epicardial potentials from body surface maps // Adv. Cardiol. 1978. Vol. 21. P. 50–54.

27. Van Dam P. M., Oostendorp T. F., Linnenbank A. C., van Oosterom A. Non-Invasive Imaging of Cardiac Activation and Recovery // *Ann. Biomed. Eng.* 2009. Vol. 37. P. 1739–1756. DOI: 10.1007/s10439-009-9747-5.
28. Cluitmans M. J. M., Peeters R. L. M., Westra R. L., Volders P.G.A. Noninvasive reconstruction of cardiac electrical activity: update on current methods, applications and challenges // *Netherlands Hear. J.* 2015. Vol. 23. P. 301–311. DOI: 10.1007/s12471-015-0690-9.
29. Yao B., Yang H. Spatiotemporal regularization for inverse ECG modeling // *IIEE Trans. Healthc. Syst. Eng.* 2011. Vol. 11. P. 11–23. DOI: 10.1080/24725579.2020.1823531.
30. Sundnes J., Lines G. T., Cai X. [et al.]. Computing the Electrical Activity in the Heart // *Monographs in Computational Science and Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 332 p. ISBN 10 3-540-33432-7.
31. Mirams G. R., Arthurs C. J., Bernabeu M. O., Bordas R. [et al.]. Chaste: An open source C++ library for computational physiology and biology // *PLoS Comput. Biol.* 2013. Vol. 9 (3). e1002970. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1002970.
32. Pitt-Francis J., Pathmanathan P., Bernabeu M. O., Bordas R. [et al.]. Chaste: a test-driven approach to software development for biological modelling // *Comput. Phys. Commun.* 2009. Vol. 180 (12). P. 2452–2471. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.07.019.
33. Mihalef V., Mansi T., Rapaka S., Passerini T. Implementation of a patient-specific cardiac model // *Artificial Intelligence for Computational Modeling of the Heart*. 2020. P. 43–94. DOI: 10.1016/B978-0-12-817594-1.00012-7.
34. Сорокин А. Б., Баландина О. В., Полевая С. А. [и др.]. Связь спектральных характеристик ЭЭГ с тяжестью аутистических проявлений // *Современные технологии в медицине*. 2019. С. 84–89. DOI: 10.17691/stm2019.11.1.10.
35. Поликанова И. С., Сергеев А. В. Влиятельная длительной когнитивной нагрузки на параметры ЭЭГ // *Национальный Психологический Журнал*. 2014. № 1. С. 86–94.
36. Nagata K., Mizukami M., Araki G. [et al.]. Topographic electroencephalographic study of cerebral infarction using computed mapping of the EEG // *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 1982. Vol. 2 (1). P. 79–88. DOI: 10.1038/jcbfm.1982.9.
37. Гараев В. Р., Скоромец А. П., Любименко В. А. [и др.]. Амплитудно-интегрированная электроэнцефалография в неонатологии // *Педиатрия. Журнал им. Г. Н. Сперанского*. 2008. Т. 87, № 1. С. 10.
38. Majkowski J. Long-term treatment of amyotrophic lateral sclerosis with phthalazinol // *Advances in second messenger and phosphoprotein research*. 1992. Vol. 25. P. 409–416. DOI: 10.1001/archneur.1980.00500540098023.
39. Бокерия Л. А., Филатов А. Г. Картирование аритмий // *Анналы аритмологии*. 2012. Т. 9. № 1. С. 5–13. EDN: PBLUWF.
40. Zhikhareva G. V., Kramm M. N. Reconstruction of current sources of the heart in the inverse ECG problem. Algorithms and their analysis: monograph. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, 2012. 156 p. ISBN 978-3-8473-3278-7.
41. Титомир Л. И. Электрический генератор сердца. Москва: Наука, 1980. 371 с.
42. Mishchenko K V., Avdeeva D. K., Yukhin Y. M., Titkov A. I., Logutenko O. A. Preparation of electroconductive aluminum-silicon oxide ceramic sensors modified with silver and bismuth nanoparticles // *European Journal of Nanomedicine*. 2016. Vol. 8. P. 195–202. DOI: 10.1515/ejnm-2016-0019.
43. Avdeeva D. K., Maksimov I. V., Ivanov M. L., Yuzhakov M. M., Turushev N. V., Rybalka S. A., Batalov R. E., Guo W., Filippova E. B. Results of measurements of the cardiac micropotential energies in the amplitude-time intervals recorded by the nanosensor-based hardware and software complex // *Measurement*. 2020. № 173. 108600. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108600.
44. Avdeeva D. K., Guo W., Nguyen D. Q., Yuzhakov M. M., Ivanov M. L., Turushev N. V., Maksimov I. V., Balakhonova M. V. Results of recording electrophysiological signals by nanosensors during tests on volunteers // *Sensor Review*. 2020. Vol. 40 (3). P. 335–346. 108600. DOI: 10.1108/SR-12-2019-0323.
45. Avdeeva D. K., Ivanov M. L., Yuzhakov M. M., Turushev N. V., Kodermyatov R. E., Maksimov I. V., Zimin I. A. Novel high-resolution nanosensor-based measuring equipment for ECG recording // *Measurement*. 2019. Vol. 146. P. 215–229. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.06.023.
46. Avdeeva D. K., Yuzhakov M. M., Ivanov M. L., Turushev N. V., Maksimov I. V., Kodermyatov R. E., Mazikov S. V., Guo W., Zimin I. A. Advanced features of ECG mapping // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. № 1327. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/1327/1/012027.
47. Avdeeva D. K., Maksimov I., Guo W., Ivanov M., Turushev N., Yuzhakov M., Enshin S., Mazikov S., Marchenko E., Balakhonova M. New Approaches to Stratification of Patients by the Level of Sudden Cardiac Death Risk Using the Data on Energies of Cardiac Micropotentials Obtained by Nanosensor-Based Hardware and Software Complex // *Progress in Material Science and Engineering. Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. Vol. 351. P. 217–236. DOI: 10.1007/978-3-030-68103-6_20.
48. Avdeeva D. K., Maksimov I. V., Ivanov M. L., Yuzhakov M. M., Turushev N. V., Rybalka S. A., Batalov R. E., Guo W., Filippova E. B. Results of measurements of the cardiac micropotential energies in the amplitude-time intervals recorded by the nanosensor-based hardware and software complex // *Measurement*. 2020. 108600. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108600.

КОРНИЕНКО Александр Иванович, аспирант научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 8176-5519

AuthorID (РИНЦ): 1164449

AuthorID (SCOPUS): 24724450700

Адрес для переписки: kai757@mail.ru

АВДЕЕВА Диана Константиновна, доктор технических наук, профессор, заведующая научно-производственной лабораторией «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

AuthorID (РИНЦ): 110323

AuthorID (SCOPUS): 6602380455

ORCID: 0000-0002-4696-3756

ResearcherID: J-6958-2013

Адрес для переписки: diana.avdeeva@mail.ru

ЮЖАКОВ Михаил Михайлович, кандидат технических наук, инженер, заведующий научно-производственной лабораторией «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

ORCID: 0000-0001-9642-602X

ResearcherID: A-5048-2014

SPIN-код: 7316-0080

AuthorID (SCOPUS): 57189381645

AuthorID (РИНЦ): 727556

Адрес для переписки: libra2000@yandex.ru

ИВАНОВ Максим Леонидович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 5036-2071

AuthorID (РИНЦ): 724459

AuthorID (SCOPUS): 56377173300

ORCID: 0000-0002-3039-2805

ResearcherID: G-8445-2013

Адрес для переписки: lydoz@mail.ru

ТУРУШЕВ Никита Владимирович, кандидат технических наук, инженер научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 4405-2762

AuthorID (РИНЦ): 724203

AuthorID (SCOPUS): 56377261600

ORCID: 0000-0003-3804-5979

ResearcherID: A-4767-2014

Адрес для переписки: nvtur90@mail.ru

ЕНЫШИН Степан Игоревич, аспирант научно-производственной лаборатории «Медицинская инженерия» ТПУ, г. Томск.

ORCID: 0000-0001-5645-3322

AuthorID (SCOPUS): 57211792938

Адрес для переписки: stepanomt@mail.ru

Для цитирования

Корниенко А. И., Авдеева Д. К., Южаков М. М., Иванов М. Л., Турушев Н. В., Енышин С. И. Наносенсоры для повышения разрешающей способности аппаратуры для ЭКГ и ЭЭГ картирования // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 122 – 128. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-122-128.

Статья поступила в редакцию 15.01.2023 г.

© А. И. Корниенко, Д. К. Авдеева, М. М. Южаков,
М. Л. Иванов, Н. В. Турушев, С. И. Енышин

CONTENTS

MECHANICAL

A. Yu. Popov, V. A. Prokofev. Improving the accuracy of processing deep holes by Electrical Discharge Machining with a rotating tubular electrode	5
E. V. Vasily'ev, Yu. A. Blokhina, M. M. Lakman. The scheme of shaping back surface of five-sided carbide inserts on CNC machines	10
A. V. Zhdanov. Theoretical studies of the steering hydraulic system of construction and road machines with flow amplifiers	14
A. G. Kisel, D. S. Makashin, D. Yu. Belan, K. V. Averkov. The analysis of the effect of cutting mode and coolant on formation of burrs when drilling aluminum alloy	19
E. V. Lyubchinov, K. L. Panchuk, T. M. Myasoedova. Solution of the inverse problem of modified cyclographic model	25
A. M. Badamshin, S. N. Povoroznyuk, V. V. Akimov, E. A. Rogachev, A. A. Krutko. Modification of metal-cutting plates from tungsten-free hard alloy grade KNT16 by continuous ion beams	31
L. R. Safarova, S. V. Kasyanov, D. T. Safarov. Methodology for finding parameters of cutting transitions in APQP process of preproduction of new automotive components	37
I. A. Loskutov, D. A. Skvortsova, V. G. Iskandarova. Dynamic rationing using agent-based modeling of the assembly process of equipment for nuclear power plants	46
I. A. Loskutov, V. G. Iskandarova. Ecosystem controlling as a solution to complex task of optimizing the technological process of industrial production	53

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

A. A. Belsky, A. I. Zamyatin. The analysis of power curves of wind power plants	58
V. Yu. Karandey, O. B. Popova, B. K. Popov, V. L. Afanasiev. Research of changes in electromagnetic parameters in controlled asynchronous special electric drives	65
E. Yu. Salita, T. V. Kovaleva. Twelve-pulse rectifiers in power supply system of urban electric transport aleva	71
A. E. Savenko, P. S. Savenko. Operation stability of sea vessels onboard electrical power system when changing settings of diesel generator governor	76
G. Yu. Kiselyov, V. M. Trotsenko, E. V. Petrova, V. A. Krivolapov, S. S. Girshin, A. A. Bubenchikov, V. N. Goryunov. Losses of electrical energy in electrical networks	80
N. A. Tereshchenko, K. I. Nikitin, M. A. Kholmov, V. I. Novoselov. Calculation of additional shunt for current sensor of insulators	86
A. V. Simakov, V. V. Kharlamov, M. Yu. Chernev. Development of the mathematical model for operation of digital substations relay protection complexes	93

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

G. N. Anisimov, K. K. Kim, A. A. Tkachuk, A. Yu. Kuzmenko. The method of non-destructive measurement of power thyristor surge current	99
A. A. Valke, V. A. Zakharenko, D. G. Lobov, D. B. Ponomarev, A. G. Shkaev, M. Yu. Nikolaev, S. V. Lukuta. Infrared monitoring of the metal surface temperature of superheater pipes in transient modes	103
M. N. Lyutikova, S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel. Application of chromato-mass spectrometry to determine the acid composition of transformer oil	109
E. V. Leun. Fundamentals of design of jet-drop optical systems for three-coordinate measurements of electric, magnetic and gravitational field strengths by the pendant drop method. Part 1	114
A. I. Korniyenko, D. K. Avdeyeva, M. M. Yuzhakov, M. L. Ivanov, N. V. Turushev, S. I. Enshin. Increasing the resolution of ECG and EEG mapping equipment using nanosensors	122

SUMMARY. KEYWORDS

MECHANICAL

A. Yu. Popov, V. A. Prokofev

Improving the accuracy of processing deep holes by Electrical Discharge Machining with a rotating tubular electrode

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article considers the factors affecting the accuracy of Electrical Discharge Machining. The process of formation of conglomerates resulting from processing is mainly investigated. Based on the literature analysis, the theoretical and real scheme of Electrical Discharge Machining is compared. As a result of the experiments carried out, it is revealed that in the process of deep holes, the electrode deviates from its axis due to the destabilization of the tool due to the non-rigidity of the electrode and the sticking of debris formed in the processing zone. The deviation of the electrode from the axis of rotation leads to uneven pressure from the liquid washing out the debris, which leads to uneven wear on the side of the electrode. During the study, samples of electroerosive debris are collected and studied. A direct relationship between the processing depth and the deviation value is revealed: the greater the processing depth, the greater the deviation value, which leads to distortion of the shape of the hole section and the formation of a cone instead of a cylinder. To improve the accuracy of processing deep holes, it is necessary to minimize the deviation of the electrode from the axis of rotation and protect the side surface of the electrode from the effects of current.

Keywords: EDM, precision hole processing, debris, super drill, deep hole processing, tubular electrode-tool, debris conglomerates.

E. V. Vasily'ev, Yu. A. Blokhina, M. M. Lakman
The scheme of shaping back surface of five-sided carbide inserts on CNC machines

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The methods of grinding the rear surfaces of multifaceted carbide inserts, as well as various schemes for shaping the back surfaces, are considered. The process of shaping the rear surface of a five-sided carbide insert is modeled. An algorithm for the implementation of the kinematic scheme for shaping the rear surface of pentahedral carbide plates using CAD tools has been developed. The processing of a multifaceted carbide inserts on a CNC grinding and grinding machine was carried out using the obtained mathematical dependence.

Keywords: cutting tool restoration, sharpening, carbide inserts, modeling, grinding method, shaping schemes.

A. V. Zhdanov

Theoretical studies of the steering hydraulic system of construction and road machines with flow amplifiers

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

The article presents the results of theoretical studies of the functioning of flow amplifiers, the purpose of which

is to increase the useful power of the hydraulic steering systems of heavy construction and road machines, which is especially important when upgrading existing equipment and designing a new one. Flow amplifiers allow to increase the supply of working fluid to the hydraulic cylinders for turning a multiple of the dosed volume by the dosing pump. A distinctive feature of the study is the consideration of two flow amplifiers of throttling and volumetric types, working in pairs. The design, the principle of operation are described, the main calculated dependencies are presented, on the basis of which mathematical modeling was carried out. To evaluate the qualitative and quantitative characteristics of the amplifiers, graphs of transient processes in the steering hydraulic system, as well as the static characteristics of the flow amplifiers, were obtained. The analysis of the obtained dependencies showed acceptable accuracy and quality of the hydraulic system. The results obtained can be used in the synthesis of such systems.

Keywords: steering hydraulic system, construction and road machines, flow amplifier, gain factor, theoretical studies, transients, static characteristics.

A.G. Kisel^{1,3}, D. S. Makashin^{1,2},
D. Yu. Belan³, K. V. Averkov³**The analysis of the effect of cutting mode and coolant on formation of burrs when drilling aluminum alloy**¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia²Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia³Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Drilling is an extremely important process widely used in the manufacture of fuel control equipment. The sustainable drilling process of aluminum alloy is promising for today's industry, which reduces energy and coolant consumption without compromising the quality of workmanship. This article examines the effect of feed and spindle speed on maximum power input, the height of the burrs generated during drilling, and the resulting deviation in the diameter of the drilled hole.

Keywords: drilling, alloys, aluminum, accuracy, cylindricity, hole, processing.

E. V. Lyubchinov,
K. L. Panchuk, T. M. Myasoedova**Solution of the inverse problem of modified cyclographic model**

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

In cyclographic modeling of a line of three-dimensional space, direct and inverse problems are known. A sufficient number of publications are devoted to the solution of these problems in the scientific literature. The authors of the work, on the basis of studies of the well-known classical cyclographic model, obtained its modification, called the modified cyclographic model. The need for this model caused by the solution of a number of practical problems of geometric modeling, in particular in the field of developing surface forms of roads, where traditionally only the direct problem of geometric modeling is considered, in which it is required to determine the surface shape of the latter along the spatial axis of the road. The authors proposed a

solution to the inverse problem of modeling for a modified cyclographic projection, which makes it possible to restore a curved line of space from its cyclographic image. The paper gives a justification and a solution to the inverse problem of cyclographic modeling, implemented on a numerical example. The results of the work can be used in computer-aided design systems that specialize in the design of general and special roads.

Keywords: geometric modeling, cyclography, modified cyclographic projection, inverse task, road surface form design.

**A. M. Badamshin¹, S. N. Povoroznyuk¹,
V. V. Akimov²,**

E. A. Rogachev¹, A. A. Krutko¹

Modification of metal-cutting plates from tungsten-free hard alloy grade KNT16 by continuous ion beams

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

This work is devoted to the problem of developing technological operations aimed at improving the structure and properties and, as a result expanding the scope of metal-cutting inserts from tungsten-free hard alloys. The search for alternative analogues of traditional tungsten-cobalt hard alloys is an urgent task of modern materials science, due to the high cost and shortage of their components. In this paper, we study the effect of a continuous ion beam on the change in the morphology, mechanical properties, and performance characteristics of metal-cutting inserts made of tungsten-free hard alloy grade KNT16 (TiCN-Ni-Mo). It has been found that the effect of continuous ion beams leads to a significant change in the wear resistance of cutting plates during turning operations on medium-carbon steel 40KhN. A rational composition of the ion beam has been established, in which the cutting plate is subjected to the least wear after completion of the test cycle. Using the methods of scanning electron microscopy and scanning probe microscopy, a study of the microrelief and morphology of the surface of the samples is carried out.

Keywords: tungsten-free hard alloys, continuous ion beam, surface morphology, turning, scanning and atomic force microscopy.

L. R. Safarova,

S. V. Kasyanov, D. T. Safarov

Methodology for finding parameters of cutting transitions in APQP process of preproduction of new automotive components

Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

The article discusses the content of the methodology for assessing the technological state of the machine tool system based on the method of planning experiments for cutting pre-designed and manufactured for special precision characteristics of automotive components of product samples. Using the example of an internal landing hole, the finding of diagnostic components of a special characteristic that are the result of the action of pre-known technological factors is considered. Their finding is designed for the use of both shop and coordinate measuring instruments. The obtained regression models of diagnostic components make it possible at various stages of the APQP process to determine the intervals of the cutting process parameters that provide a predetermined margin of accuracy of a special characteristic, or to conclude that the accuracy of the machine system is

inadequate. The application of the methodology together with statistical methods of quality management allows to ensure the maximum achievable level of stability of special characteristics in cutting operations, starting with the release of the first serial samples of products. The methodology can be used when selecting and evaluating the technological accuracy of newly purchased equipment in the APQP process of preparing the production of a new automotive component, acceptance of existing equipment after modernization or repair, as well as the audit of the technological process by the auditors of the supplier.

Keywords: APQP preproduction process, experiment planning, diagnostics, technical condition, machine system, cutting modes.

I. A. Loskutov¹,

D. A. Skvortsova², V. G. Iskandarova³

Dynamic rationing using agent-based modeling of the assembly process of equipment for nuclear power plants

¹Joint Company «Research and Production Corporation «Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical», Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia

³MMZ Avangard, Moscow, Russia

The work is raised as an agent-based model designed to calculate the time spent on the assembly stage of the manufacturing process for manufacturing equipment for nuclear power plants. The article focuses on the need for development, states the justification for research and development of the field of nuclear energy, with repeated facts. The paper uses various approaches to accounting for labor productivity. The concept of a gradual increase in employee fatigue for the development of the technical process is taken as the base. The agents of the model contain the workers and the technological process. The components of programs implemented in the C# language are shown, descriptions of classes are described, their actions to simulate the behavior of agents of a production system. The class diagram shows the selected classes and the relationships between them in terms of inheritance. There is a study of the use of models of a typical assembly process — the assembly of a cabinet frame, consisting of seven main operations. The paper presents structured, empirically analyzed values of fatigue categories and process time for 85 employees in graphical form by operations. It shows an example of an increase in fatigue for one of the employees and a Gantt chart, which can be used to evaluate how the operations went over time. As the output of the agent-based model, the calculated value of the time spent for the entire stage of the technological process of assembling equipment for nuclear power plants is provided. The accuracy of calculations of data convergence, income on the environment in Matlab Mathworks and Microsoft Excel during manual modeling is argued. The agreements state a slight deviation from the data model of the developed agent-based model of a practical experiment carried out as part of the implementation of the contract for the creation of equipment for a new power unit, a causal analysis is carried out. Also, in the applications, exceptional values of some performance indicators are analyzed and attention is focused on the unjustification of classical average approaches in the analysis of overall performance, using several examples. Information is given on the application of the agent model in possible options.

Keywords: nuclear power plant, dynamic rationing, installation, agent-based modeling, assembly, technical process.

I. A. Loskutov¹,
V. G. Iskandarova²

Ecosystem controlling as a solution to complex task of optimizing the technological process of industrial production

¹Joint Company «Research and Production Corporation «Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical», Moscow, Russia

²MMZ Avangard, Moscow, Russia

The article is devoted to the study of ecosystem controlling and divided into three structural sections. The study is of an overview nature, aimed at popularizing ecosystem approaches in the domestic industry. The main methods of scientific research are systematization and analysis. The introduction provides evidence of the need to search for new solutions to optimize and improve modern domestic industry. The first section analyzes definitions related to the ecosystem. It is considered from the classical (biological) point of view and from the point of view of application in industry. The evidence base of the justification of this approach is given. The second section is devoted to the problems present in industrial ecosystems. The list of the most significant features caused by staff misunderstanding of new approaches is made and the unjustifiability of outdated methods of production organization used everywhere is argued. At the same time, the section focuses on the importance of the manager who is responsible for the functioning of departments and specifies the characteristics required for him. The third section shows the importance of ecosystem controlling as a way to solve the described problems. As evidence, it is divided into two obvious components — technical and human. The direction of the Internet of Things as an integral part of the industrial ecosystem is noted. As a solution to the human component, an example of implementation for little-changing systems is given and recommendations are given for systems of a different nature. In conclusion, the supporting facts of the correctness of the conclusions are given.

Keywords: ecosystem, enterprise, industry, controlling, problems, organization of production.

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

A. A. Belsky, A. I. Zamyatin

The analysis of power curves of wind power plants

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

The use of wind power plants is growing rapidly, despite the continued growth in the extraction of traditional fossil resources. In this paper, the analysis of the power curves of real wind turbine models and the polynomials common among the scientific community describing the dependence of the wind turbine output power on wind is carried out. The article discusses 82 models of wind power plants with a horizontal axis of rotation, rated power up to 100 kW and with a method of limiting the speed of rotation in the operating mode pitch control. The calculation of the potential generation of each wind turbine at an oil and gas field for a period of twenty years with an interval of one hour is carried out, the Installed Capacity Utilization Factor is calculated, after which the values are compared with the results of calculations based on polynomials of other authors. The results obtained can be widely applied in modeling the operating modes of wind power plants

and will improve the accuracy of feasibility studies for the implementation of autonomous power supply systems.

Keywords: power curve, wind power plant, autonomous electrical complex, wind turbine.

V. Yu. Karandey, O. B. Popova,

B. K. Popov, V. L. Afanasiev

**Research of changes in electromagnetic parameters in controlled asynchronous special electric drives
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia**

The article researches the changes in the electromagnetic parameters of controlled asynchronous special electric drives. Special asynchronous electric drives are controlled cascade electric drives of cylindrical and axial designs. The study of the dynamics of parameter changes is carried out on the basis of the method of electromagnetic energy conversion and the theory of electromagnetic circuits. As a result, for new mathematical models of the electromagnetic system of the studied asynchronous electric drives, the parameters of the electromagnetic field of a closed coil of one coil of an electric winding with electric current in a homogeneous medium are determined. The solved problem is spatial, since the distribution of electromagnetic induction in a coil of a given shape of an electromagnetic coil is determined. The obtained conclusions for determining the electromagnetic parameters of cylindrical and axial motors of special electric drives allow us to correctly solve the problems of modeling, designing and improving the efficiency of the studied electric drives and electromechanical energy converters of cylindrical and axial designs. The results of the study are applicable to create a computer-aided design system for the research asynchronous electric drives and solve modeling and design problems. The conducted research allows creating electric drives with optimal weight, size and energy indicators.

Keywords: special electric drive, controlled asynchronous cascade electric drive, energy conversion, mathematical modeling, electromagnetic field, electromagnetic system.

E. Yu. Salita,

T. V. Kovaleva

Twelve-pulse rectifiers in power supply system of urban electric transport

Omsk State Transport University, Omsk, Russia

The introduction of twelve-pulse rectifiers instead of six-pulse ones at traction substations of urban electric transport leads to an increase in technical and economic indicators, energy savings, a decrease in leakage current. These result in electrical safety of passengers, a trolleybus driver and depot maintenance personnel. Twelve-pulse rectifiers can have a serial or parallel connection of six-pulse bridges. With a parallel circuit, it is necessary to have an equalizing reactor. The implementation of a twelve-pulse serial type rectification scheme can be carried out by industrial development by manufacturers of new dry converter transformers with different typical power and new rectifiers (blocks). As part of the new rectifiers, it is necessary to have tablet avalanche valves with coolers based on heat pipes due to their advantages over non-avalanche valves.

Keywords: urban electric transport, traction substation, twelve-pulse rectifier, tablet avalanche valves, leakage current, technical and economic indicators.

A. E. Savenko, P. S. Savenko
Operation stability of sea vessels onboard electrical power system when changing settings of diesel generator governor

Kerch State Maritime Technological University, Republic of Crimea, Kerch, Russia

The article deals with the issue of ensuring the sustainable operation of ship electrical power systems. Experimental oscillograms of power exchange and in-phase oscillations during parallel operation of diesel generator units are presented. The results of mathematical modeling allow us to conclude that it is necessary to limit the change in the values and ratios of the transmission coefficients of the governor. It is proposed to limit the change in the transmission coefficients of the governor when eliminating power exchange oscillations.

Keywords: power exchange oscillations, parallel operation, autonomous electric power complex, stability, generating set, governor settings.

G. Yu. Kiselyov, V. M. Trotsenko, E. V. Petrova, V. A. Krivolapov, S. S. Girshin, A. A. Bubenchikov V. N. Goryunov
Losses of electrical energy in electrical networks

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

This article discusses the relevance of reducing electrical energy losses. The actual values and plans for reducing electric energy losses in PJSC «Rosseti» and the main branches of PJSC «Rosseti Siberia» are given. The existing standards of losses in electrical networks of different voltage levels are presented. Possible ways of reducing electricity losses to achieve the targets set by the «Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035» are considered.

Keywords: electricity consumption, electricity losses, development strategy, loss standards, development program, loss reduction.

N. A. Tereshchenko¹, K. I. Nikitin¹, M. A. Kholmov¹, V. I. Novoselov²
Calculation of additional shunt for current sensor of insulators

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia
²Tobolsk Industrial Institute (branch), Tobolsk, Russia

The purpose of the study is to review the existing devices and methods for diagnosing and monitoring the state of high-voltage insulation, which plays an important role in the criteria for the reliability of the power system. One of the main methods for diagnosing insulators is a visual inspection. At the moment, online methods have become widespread, allowing to fix the process of destruction of insulation under voltage. Despite the existence of various methods and devices, the problem of timely detection of insulation deterioration in the operating mode has not been solved at the moment. This problem is solved by using an additional shunt design. When the task is achieved, the method of calculating the strength analysis of the additional shunt is used, and the simulation of this process is performed in the ANSYS program. Mechanical strength sufficient for operation under voltage. Experimental tests are carried out with the developed sample of the shunt. As a result of the study, a number of experiments are carried out with this design of the shunt, which have confirmed its performance. Due to the presence of the shunt, it is possible to fix leakage currents of the order of several tens

of microamperes. Thus, the authors have proposed the current sensor, which is made in the form of an additional resistive shunt.

Keywords: insulator, AC voltage, leakage current, resistive shunt.

A. V. Simakov^{1,2}, V. V. Kharlamov², M. Yu. Chernev³
Development of the mathematical model for operation of digital substations relay protection complexes

¹Gazpromneft Energoservice, LLC, Omsk, Russia
²Omsk State Technical University, Omsk, Russia
³Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

The issues of introduction of electrical digital substations in the Russian Federation are considered. An existing criteria analysis for assessing the modern relay protection devices efficiency is carried out and an assessment of their sufficiency is made. A mathematical model development of the digital substations relay protection complexes operation has been developed using the queuing theory, the graphs theory and Markov chains. The failure-free operation probability calculated value of the relay protection complexes corresponds to the long-term analysis data. This indicates that the mathematical model is correct. The proposed mathematical model makes it possible to take into account the impact of the maintenance quality on the digital substation relay protection complexes efficiency.

Keywords: digital substation, IEC-61850, relay protection, condition-based maintenance, Markov chain, graph theory.

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

G. N. Anisimov¹, K. K. Kim¹, A. A. Tkachuk¹, A. Yu. Kuzmenko²
The method of non-destructive measurement of power thyristor surge current

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia
²Omsk State Transport University, Omsk, Russia

The article proposes a new method for the non-destructive measurement of one of the most important maximum permissible parameters of surge current power thyristors. The method is based on continuous control at each moment of time of the dynamic capacitance, the changing in the nature of the time dependence of which predicts the destruction of the semiconductor structure.

Keywords: power thyristor, dynamic capacitance, surge current, non-destructive measurement.

A. A. Valke¹, V. A. Zakharenko¹, D. G. Lobov¹, D. B. Ponomarev¹, A. G. Shkaev¹, M. Yu. Nikolaev¹, S. V. Lukuta²
Infrared monitoring of the metal surface temperature of superheater pipes in transient modes

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia
²«TGC-11» JSC, Omsk, Russia

This work is devoted to the problem of infrared monitoring of the metal temperature of the surface of superheater pipes. Monitoring is implemented on the basis of a thermal imager cameras that performs contactless monitoring of the surface temperature of the pipes of the wall superheater.

The results of modeling the temperature distribution along the pipe of a wall-mounted superheater in the presence of contamination and without are presented. The calculation of the number of thermal imager cameras required for infrared monitoring is performed. The developed design solutions for the installation site of thermal imager cameras on a TP-82 type boiler have been confirmed experimentally.

Keywords: superheater, thermal imager camera, superheater pipe metal, boiler unit, temperature visualization, transient mode.

M. N. Lyutikova,

S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel

Application of chromato-mass spectrometry to determine the acid composition of transformer oil

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

This article presents the results of a study of the acid composition of transformer oil from high-voltage transformers that have been in operation for more than 30 years. The acid composition of oils is studied using a new technique based on a highly sensitive and highly selective analysis method — chromato-mass spectrometry. The technique makes it possible to determine the acid composition of the insulating oil in the context of low molecular weight acids (LMA), high molecular weight acids (HMA) and phenolic compounds (PC). The structure of some compounds identified in oil is given. It has been established that during oil aging, among the acid compounds, the following are predominantly formed: HMA (60–95 %) > PC (3–16 %) > LMA (1–6 %). As part of the research, it is found that the share of the most dangerous low molecular weight acids in the total amount of acidic compounds is no more than 12 %. The rest of the acidity of the oil is due to the presence of macromolecular and phenolic compounds, which do not adversely affect the insulating properties of oil and paper in the detected concentrations, and some of them (compounds of a phenolic nature), on the contrary, even improve the stability against oxidation. These extended tests of oil samples from operating high-voltage equipment are of practical value in preventive diagnostics of the condition of its insulation.

Keywords: petroleum-based insulating oil, acid composition, gas chromatography-mass spectrometry, high-voltage transformer.

E. V. Leun

Fundamentals of design of jet-drop optical systems for three-coordinate measurements of electric, magnetic and gravitational field strengths by the pendant drop method. Part 1

Lavochkin Association, Moscow region, Khimki, Russia

The article discusses the principle of operation and the main components of jet-drop optical measuring systems (JDOMS) based on the pendant drop method for monitoring electric field strength (EFS), magnetic field (MFS) and gravitational field (GFS).

To make a pendant drop sensitive to electric or magnetic fields, it is proposed to charge it electrostatically or to create it from a magnetic fluid, and its mass allows you to feel changes in the gravitational field. The use of magnetic fluids as the basis of a pendant drop is the most multifunctional for measurements of EFS, MFS and GFS. The implementation of the zero measurement method using a pendant drop as a comparison device, a null organ that perceives the difference in the effects of the measured and reference field(s) at the level of quasi-zero three-coordinate displacements, is considered. They are measured by high-precision optical measurement methods. Different variants of modern optical measurement systems are analyzed.

Keywords: pendant drop, electric field strength, magnetic field strength, gravitational field strength, magnetic fluid, magnetometer, gravimeter, matrix video recorder.

A. I. Korniyenko, D. K. Avdeyeva, M. M. Yuzhakov, M. L. Ivanov, N. V. Turushev, S. I. Enshin

Increasing the resolution of ECG and EEG mapping equipment using nanosensors

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The problem of a large number of people with cardiovascular diseases and brain diseases is relevant all over the world. The problem of mortality and the consequences of these diseases is particularly acute. Therefore, an important way in medical instrumentation is to improve and increase the amount of information with the help of external methods of diagnosing these diseases. Nanosensors have been developed at Tomsk Polytechnic University to significantly improve the quality of electrophysiological measurements. It is proposed to apply the developed nanosensors for ECG and EEG mapping.

Keywords: nanosensor, EEG, ECG, mapping.

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

включен в **Перечень** рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Адрес редакции и издателя: 644050, Омская обл., г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет, корпус 6, каб. 424;
тел. (3812) 65-32-08; e-mail: onv@omgtu.ru

Адрес типографии: 644050, Омская обл., г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет, корпус 6, каб. 333;
тел. (3812) 65-32-08.
Цена свободная