

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАУЧНЫЙ

2024

№ 1 (189)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издаётся с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 1 (189) 2024

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_omgtu/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgту.ru/general_information/media_omgtu/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 15.02.2024 г.
Дата выхода в свет 26.02.2024 г.

Формат 60x84 1/8. 15,81 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 9
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

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

ЛИ Вэймин, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (АНТИ), Бэньси, Китай

МАЙСТРЕНКО Василий Андреевич, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

МЭН Чжаоцзюнь, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (АНТИ), Бэньси, Китай

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,
Нижегородский государственный университет, г. Нижегородск

СЫЗРАНЦЕВ Владимир Николаевич, д. т. н., профессор,
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, д. 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

ХУАН Чжидун, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (АНТИ), Бэньси, Китай

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



OMSK SCIENTIFIC BULLETIN

Published Since October 1997.
Published 4 times a year

№ 1 (189) 2024

FOUNDER

Federal State
Autonomous Educational Institution
of Higher Education
«Omsk State Technical University»

Federal State Budgetary
Educational Institution
of Higher Education «Omsk State
Transport University»

Identification number
of registered Mass Media
ПМ № ТУ55-00559 from 06.10.2017
issued by the Federal Service for
Supervision of Communications,
Information Technology,
and Mass Media, Omsk region

Journal Website:
<https://journals.omg.tu.ru>

Journal Page on Founder's Website:
[http://www.omg.tu.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omg.tu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_omsk_research_journal/)

Subscription Index
in Federal Agency on Press and Mass
Communications Catalog 83597

Executive Secretary
M. F. Fedorchuk

Editor
T. P. Semina

Computer Page-Proofs
O. N. Chirun

Cover Layout
V. S. Gurinov

© Editorial Board of
«Omsk Scientific Bulletin»,
OmSTU

Signed in Print 15.02.2024
Date of Publication 26.02.2024

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 15,81
Offset Paper

Printed on a Duplicator
at Scientific Publishing Office,
Omsk State Technical University

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 9
Open Price

EDITORIAL STAFF

- KOSYKH Anatoly Vladimirovich (Chief Editor)**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- OVCHARENKO Sergey Mikhaylovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- GALIEV Ilkham Islamovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- AVDEEVA Diana Konstantinovna**, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
- BIRYUKOV Sergey Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- BUBNOV Aleksey Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- VAVILOV Vladimir Platonovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
- GORYUNOV Vladimir Nikolaevich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- GRADOBOEV Alexander Vasilievich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
- KARPOV Valeriy Vasilyevich**, D. Sc. (Economic), Professor,
Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Omsk, Russia
- KOZLOV Aleksandr Gennadyevich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- KUZNETSOV Andrey Albertovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- LI Weimin**, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China
- MAYSTRENKO Vasily Andreevich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- MENG Zhaojun**, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China
- NAUMENKO Alexander Petrovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- NOVIKOV Alexey Alexeevich**, D. Sc. (Technical),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- NOVOZHILOV Aleksandr Nikolayevich**, D. Sc. (Technical), Professor,
S.Toraighyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan
- OSIPOV Dmitry Sergeevich**, D. Sc. (Technical),
Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia
- PANCHUK Konstantin Leonidovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- POLESHCHENKO Konstantin Nikolayevich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia
- POLISHCHUK Vladimir Iosifovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia
- POPOV Andrey Yuryevich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- POPOV Evgeniy Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia
- RAUBA Alexander Aleksandrovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- ROTKOV Sergey Igorevich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia
- SUSHKOV Valery Valentinovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia
- SYZRANTSEV Vladimir Nikolaevich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
- TATEVOSYAN Andrey Alexandrovich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- TOLOK Aleksey Vyacheslavovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia
- FEDOROV Alexey Arkadievich**, Cand. Sc. (Technical),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- KHARLAMOV Victor Vasilievich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia
- KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- HUANG Zhidong**, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China
- CHERNYAVSKY Dmitry Ivanovich**, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- SHALAY Viktor Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- SCHERBA Victor Evgenievich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
- YURKOV Viktor Yuryevich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia
- YAKOVLEVA Elena Vladimirovna**, D. Sc. (Economic), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. А. Кузнецов, В. П. Кулаковская. Определение количественных параметров и координат дефекта сигнала акустико-эмиссионного контроля цилиндрических резервуаров	5
Т. В. Малышева. Разработка алгоритма классификации производств по типу внутризаводского кооперирования основных и вспомогательных процессов методом машинного обучения	12
К. А. Вансович, В. И. Ядров. Упругопластическое моделирование усталостных трещин	20
Я. В. Денисова. Управление качеством процессов производства продукции машиностроения в сети	28
Е. В. Князев, А. М. Бадамшин, Ю. А. Стенькин, Е. А. Рогачев. Исследование влияния термической обработки в атмосфере аргона на физико-химическое состояние титановой фольги	35
О. П. Коржова, Д. С. Макашин, П. Е. Попов, И. Е. Доноага, А. В. Обрывалин. Трансформация оперативного управления эксплуатацией станков, станочных комплексов с помощью «Системы операционного менеджмента»	41
В. П. Кузьменко. Комплексная модель распределения температуры для контроля тепловых характеристик бытовых светодиодных ламп	48
С. В. Петроченко, Ц. Хао, С. Юй, К. Чжао. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков (обзор)	56
Д. А. Блохин, И. С. Михайлов. Исследование динамической податливости стола координатно-расточного станка под нагрузкой	66

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. В. Бубнов, А. М. Дайнович. Особенности применения фильтра нижних частот для демодуляции информационных сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией	73
Ю. В. Москалев. Математическая модель трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки	79
О. С. Парсентьев, Т. А. Мусаев. Обеспечение качества очистки многокомпонентных сред, перемещаемых ленточными конвейерами энергосберегающим импульсным магнитным извлечением	86
Р. М. Петрова, Е. И. Грачева. Алгоритмы оценки основных параметров надежности низковольтного оборудования схем цеховых сетей	93
Н. А. Терещенко. Диагностическое устройство одноэлементных изоляторов воздушной линии электропередачи по температуре	103

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

С. В. Бирюков. Концепция создания измерителя напряженности электрического поля с определением погрешности результата измерений и расстояния до источника поля	110
А. С. Захлебни, М. И. Курячий, В. В. Капустин, А. В. Каменский, А. К. Мовчан. Повышение контраста и точности локализации объектов интереса на ортофотопланах местности, построенных по искаженным изображениям с беспилотного летательного аппарата	119
А. В. Каменский, К. А. Рылов, Н. Бородина. Цифровой сглаживающий трапецеидальный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений с изменяемыми размерами сканирующей многоэлементной апертуры	127

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

A. A. Kuznetsov, V. P. Kulakovskaya. Defining quantitative parameters and coordinates of the defect signal by acoustic-emission control of cylindrical tanks	5
T. V. Malysheva. Development of the algorithm for classifying industries according to the type of intra-factory cooperation of main and auxiliary processes using machine learning	12
K. A. Vansovich, V. I. Yadrov. Elastoplastic modeling of fatigue cracks	20
Ya. V. Denisova. Quality management of production processes of engineering products in the network	28
E. V. Knyazev, A. M. Badamshin, Yu. A. Stenkin, E. A. Rogachev. The analysis of the effect of heat treatment in various atmospheres on the structure of titanium foil	35
O. P. Korzhova, D. S. Makashin, P. E. Popov, I. E. Donoaga, A. V. Obryvalin. Transformation of operational management of machine tools, machine complexes operation with the help of «Operational Management System»	41
V. P. Kuzmenko. Complex temperature distribution model for controlling the thermal performance of household led lamps	48
S. V. Petrochenko, Q. Hao, X. Yu, K. Zhao. Evaluation of the influence of laser quenching mode parameters on the quality of the surface and surface layer of machine parts (overview)	56
D. A. Blokhin, I. S. Mikhailov. The study of the dynamic displacement of the table of a jig boring machine under load	66

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

A. V. Bubnov, A. M. Daynovich. Features of using low-pass filter for small signal demodulation in phase-locking motor drive	73
Yu. V. Moskalev. Mathematical model of a three-phase-multiphase transformer phases converter with a series connection of coils of each phase of secondary winding	79
O. S. Parsentev, T. A. Musaev. Quality assurance multi-component environments moved belt conveyors energy saving pulsed magnetic extraction	86
R. M. Petrova, E. I. Gracheva. Algorithms for estimating the main reliability parameters of low-voltage equipment of shop-floor network schemes	93
N. A. Tereshchenko. Diagnostic device of single-element insulators of overhead transmission line by temperature	103

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

S. V. Biryukov. The concept of creating an electric field strength meter with the determination of the error of the measurement result and the distance to the field source	110
A. S. Zakhlebin, M. I. Kuryachiy, V. V. Kapustin, A. V. Kamenskiy, A. K. Movchan. Increasing the contrast and accuracy of localization of objects of interest on orthophotomaps of the terrain built from distorted images from an unmanned aerial vehicle	119
A. V. Kamenskiy, K. A. Rylov, N. Borodina. Digital anti-aliasing trapezoidal recursively separable image processing filter with resizable scanning multi-element aperture	127

УДК 620.179.1
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-5-11
EDN: SXVIES

А. А. КУЗНЕЦОВ
В. П. КУЛАКОВСКАЯ

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ И КООРДИНАТ ДЕФЕКТА СИГНАЛА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

В статье приведены данные исследования сигналов акустической эмиссии при контроле дефектов поверхности герметичных резервуаров. В ходе проведенных исследований с изменением давления получены данные по изменению параметров сигналов, фиксируемых цифровой акустико-эмиссионной системой контроля СЦАД-16. На основании полученных результатов предложена методика для определения координат дефектов резервуаров с использованием цилиндрической системы координат. Предложенный в статье подход позволяет снизить погрешность определения координат дефектов по сравнению с выражениями в случае прямолинейного распространения волн на плоской поверхности.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, контроль дефектов, активность сигналов, железнодорожная цистерна, неразрушающий контроль, координаты дефектов.

В работе приводится исследование сигналов акустической эмиссии при контроле дефектов поверхности герметичных резервуаров. В работах [1–5] показаны преимущества акустико-эмиссионных методов контроля дефектов металлоконструкций. Для возбуждения сигналов акустической эмиссии необходимо подобрать оптимальное устройство нагружения. Для нагружения резервуаров в работе использовалось избыточное давление, создаваемое компрессором [6–7].

В качестве объекта контроля использовался запасный резервуар грузового вагона Р7-78 (рис. 1). До начала и в процессе проведения эксперимента резервуар находился в горизонтальном положении. Штуцер днища был герметично закрыт, а к штуцеру обечайки был подведен шланг для нагнетания воздуха при помощи компрессора [8].

В зоне штуцера днища присутствуют два дефекта типа трещина, образовавшихся вследствие механических воздействий (ударов) в процессе эксплуатации резервуара (рис. 1). Длина трещин составляет 3 и 7 мм, а ширина раскрытия — не более 0,1 мм.

В рамках проведения эксперимента собрана схема пневматического нагружения (рис. 2). Проведение опыта основывалось на алгоритме:

1. Составление схемы испытания.
2. Установка преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ).
3. Нагнетание воздуха через штуцер обечайки при помощи компрессора до появления первого акустического сигнала, включив при этом секундомер.
4. Фиксация времени и величины давления при появлении первого акустического сигнала.

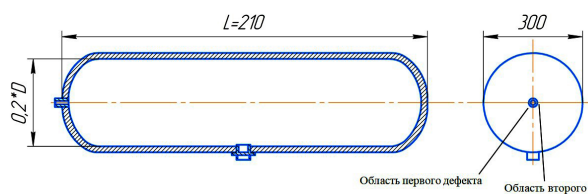


Рис. 1. Объект контроля (запасный резервуар): L — длина; D — наружный диаметр; $0,2 \cdot D$ — внутренний диаметр

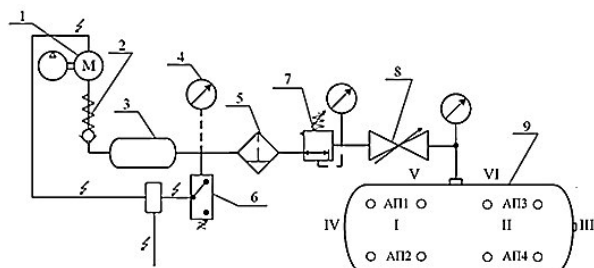


Рис. 2. Схема проведения испытания:

- 1 — вакуумный компрессор; 2 — обратный клапан;
3 — ресивер; 4 — манометр; 5 — фильтр со сбросом конденсата; 6 — реле вакуума; 7 — регулятор давления;
8 — клапан регулирующий; 9 — резервуар

Таблица 1

Результат опыта

Давление, P , атм	Время регистрации сигнала, t , сек
0	0
0,5	45
1,0	53
1,5	66
2,0	77
2,0	100

5. Постепенное увеличение давления воздуха в резервуаре, при этом каждые 0,5 атм должны повторяться операции из п. 4.

В ходе эксперимента проведено четыре статических нагружения. Максимальное создаваемое давление составило 2 атм. Прием, регистрация и оценка параметров сигналов АЭ осуществлялись при помощи акустико-эмиссионной системы типа СЦАД-16. При различных давлениях нагружающего компрессора регистрировалось различное количество сигналов. Оцифровка акустических сигналов производилась с частотой дискретизации 1 МГц.

Нагружение сосуда выполнялось поэтапно, величина нагрузки изменялась от 0,5 до 2 атм в течение 100 секунд. Результаты опыта занесены в табл. 1.

График изменения сигналов за время эксперимента, равного 100 с., представлен на рис. 3. За время эксперимента было зарегистрировано 1280 сигналов акустической эмиссии.

График изменения давления, представленный на рис. 3 (качественно совпадает с изменением количества сигналов во времени), имеет явно выраженные переходные процессы, при которых идет нагнетание давления, и участки, при которых давление поддерживается постоянным. Во время прове-

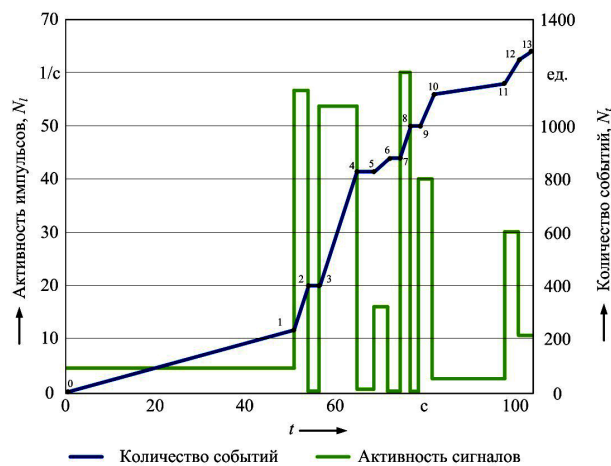


Рис. 3. График проведения испытания

дения экспериментальных исследований давление изменялось с 0 до 2 атм. Изменение проводилось ступенчато, время выдержки и увеличения давления представлено на графике (рис. 3).

Во время процесса изменения давления в цистерне на графике видно значительное увеличение количества сигналов, получаемых с датчиков АЭ, в то время как при выдержке давления и сохранения его на одном уровне количество сигналов снижается. Для определения активности сигналов использовано выражение:

$$N = \frac{t_k - t_n}{N_i}, \quad (1)$$

где t_k, t_n — время начала и конца этапа;
 N_i — количество сигналов.

На представленном графике весь процесс экспериментальных исследований разбит на несколько этапов, границы которых обозначены численными значениями от 0 до 13. За 0 принято время прихода первого сигнала после начала изменения давления.

В начальный момент времени от точки 0 до 1 производилось изменение давление внутри тела цилиндра от 0 до 0,5 атм. В этот период времени наблюдалось незначительное увеличение активности сигналов, что может быть связано с длительностью процедуры изменения давления.

В период от точки 1 до точки 2 наблюдается резкое возрастание активности сигналов, что связано со стабилизацией давления и дальнейшим его увеличением до значения в 1,0 атм.

Изменение давления производилось плавно с небольшой выдержкой на каждом интервале. Интервалам стабилизации давления в объеме цилиндра соответствуют горизонтальные участки, показанные на графике (участки 2-3, 4-5, 6-7, 8-9). На каждом из данных этапов наблюдается снижение активности сигналов, в то время как при интенсивном увеличении давления (участки 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-13) — активность сигналов достигает пиковых значений.

Из анализа графиков по полученным сигналам, получаемых с датчиков АЭ, видно, что ширина импульса будет соответствовать времени изменения давления в цилиндре, а активность импульсов будет увеличиваться по мере увеличения давления. Также во время повышения давления происходит увеличение амплитуды акустических сигналов, в то

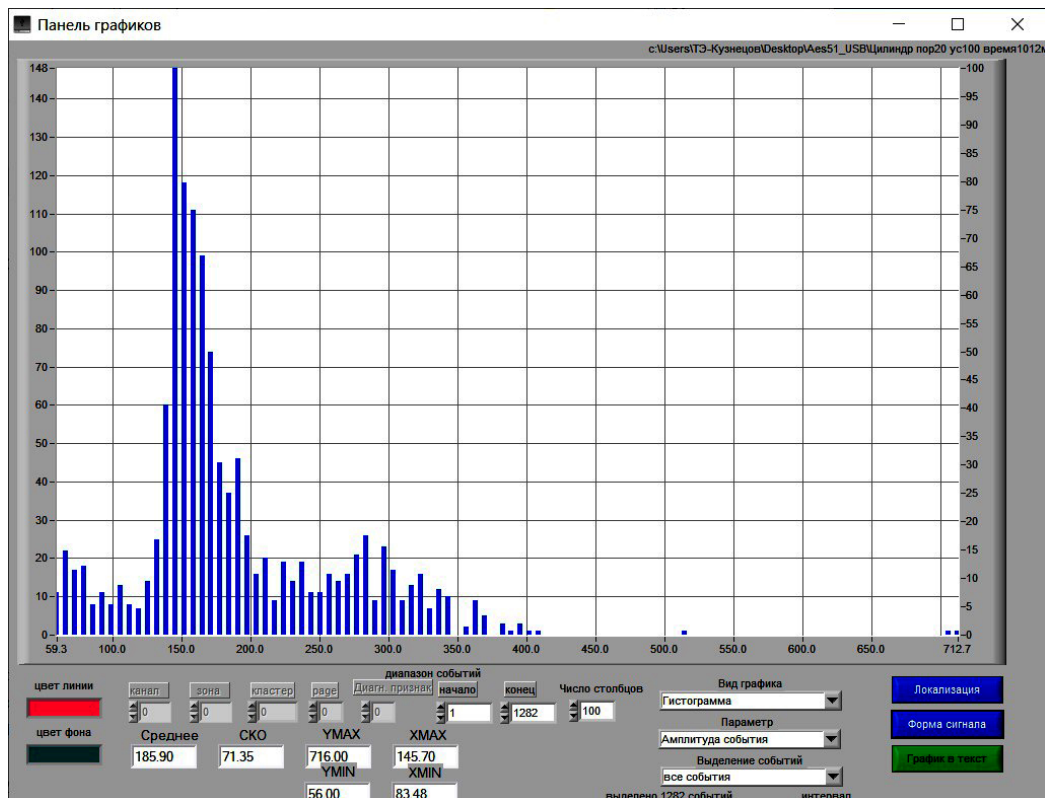


Рис. 4. Гистограмма амплитуд зарегистрированных сигналов

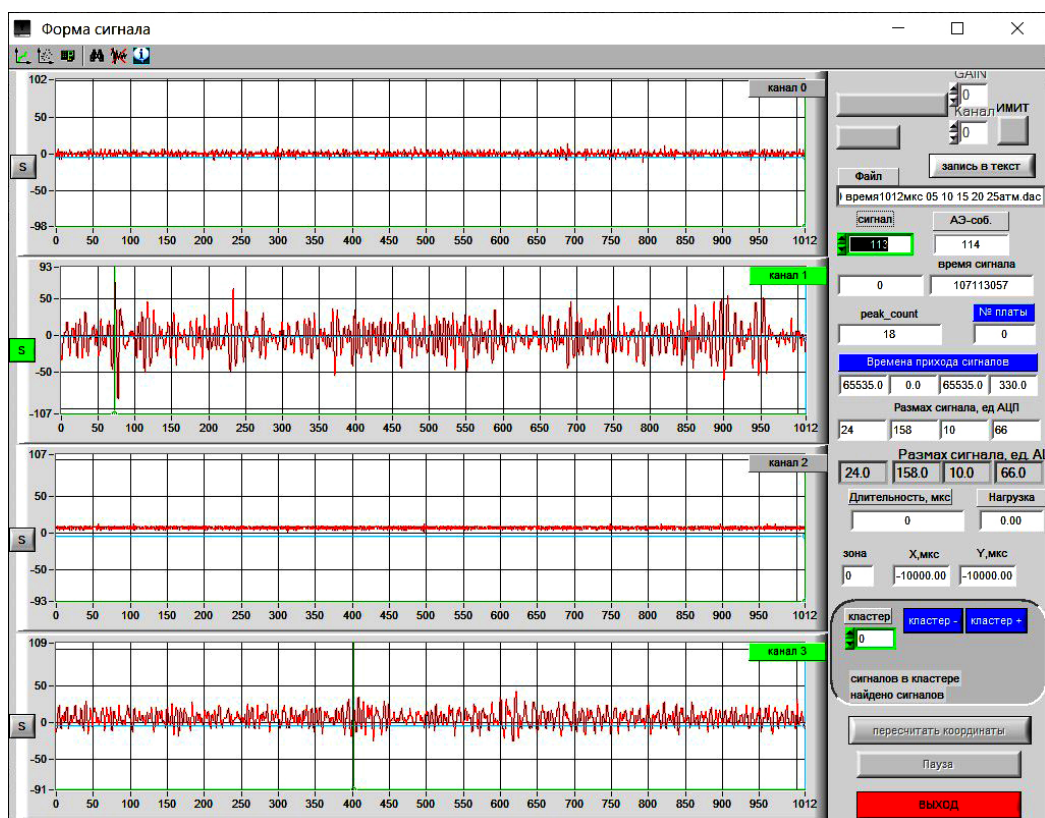


Рис. 5. Окно регистратора на 27-й секунде испытания

время как при постоянном давлении число сигналов и их амплитуда снижаются практически в два-три раза.

На рис. 4 представлена гистограмма распределения амплитуд зарегистрированных сигналов при

испытании цилиндра давлением от 0 до 2,0 атм. По горизонтальной оси отложены амплитуды сигналов (двойной размах), а по вертикальной оси — количество зарегистрированных импульсов. Окна программы приведены при работе программного

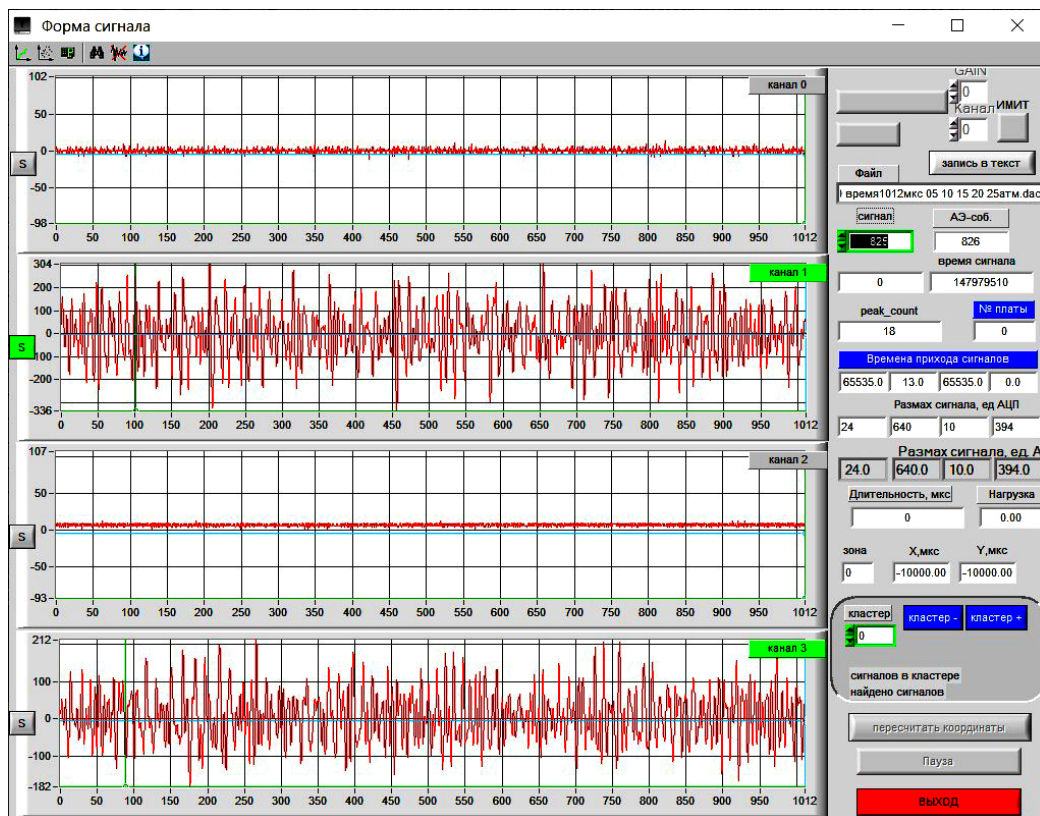


Рис. 6. Окно регистратора на 62-й секунде испытания

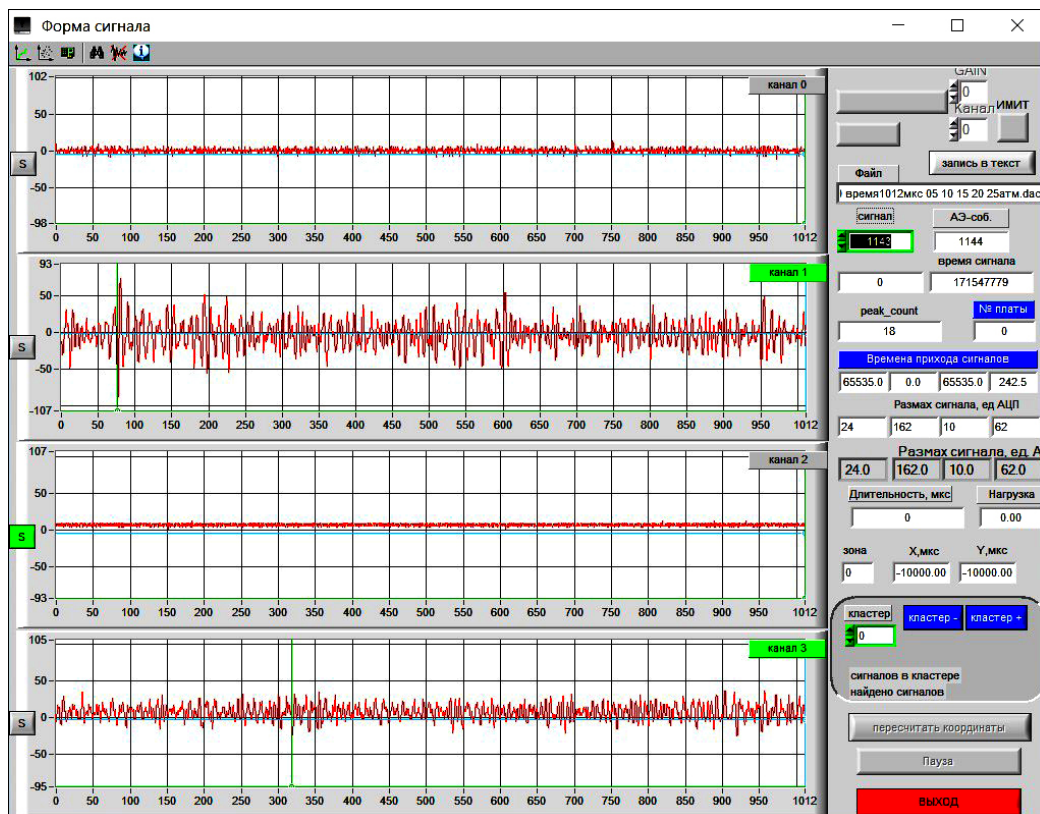


Рис. 7. Окно регистратора на 87-й секунде испытания

обеспечения системы СЦАД-16 с программным обеспечением AES-51.

Окна сигналов в различные интервалы времени с зарегистрированными сигналами показаны на рис. 5–7.

Результирующие значения зарегистрированных сигналов представлены в сводной табл. 2. Из данных табл. 2 можно видеть, что максимальная амплитуда сигнала наблюдалась в точке 5 (рис. 3) при текущем давлении, равном 1,5 атм. Далее амплитуда

Таблица 2

Изменение давления и число зарегистрированных сигналов

Номер точки	Время, с	Давление в начале, атм	Число импульсов	Размах, АЦП
0	0	0,0	0	—
1	45	0,5	220	165
2	50		400	208
3	53	1,0	400	135
4	60		810	234
5	64		810	503
6	66	1,5	830	—
7	70		830	258
8	73		1000	—
9	75		1000	—
10	77	2,0	1120	—
11	95		1150	173
12	97		1250	—
13	100		1280	—

импульсов уменьшается, несмотря на увеличение давления. Это можно объяснить совпадением собственных колебаний берегов трещины при заданном размере дефекта [9–10].

Расчет координат дефектов основывался на определении разности времени прихода (РВП) сигналов АЭ на преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ). Акустические сигналы, генерируемые ПАЭ, пропорциональны расстоянию от места установки датчиков до трещины (L1-L4) и преобразуются пьезопластинами датчиков в электрические сигналы, которые затем усиливаются и оцифровываются в канале АЭ-системы.

Программное обеспечение установки СЦАД-16 позволяет получить данные по активности сигналов и их регистрацию. Примеры окон с сигналами показаны на рис. 5–7.

Расчет координат источника сигналов АЭ осуществляется по РВП на датчики пьезоантенны, а также с использованием вейвлет-анализа, модифицированного двухинтервального метода и метода кластеризаций. За время прихода сигнала АЭ принимается время срабатывания компаратора измерительного канала диагностической АЭ системы. При этом возникают погрешности ΔT в определении времён прихода, связанные с постоянством порогового уровня и невозможностью подстройки порога селекции при изменении шумов в процессе нагружения конструкции.

Расчет координат источника сигналов АЭ на плоскости производится по их РВП на пьезоантенну, представляющую фиксированный набор акустических датчиков. Для локации источника сигнала АЭ используются времена прихода, рассчитываемые по оцифрованной форме, а координаты определяются из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} c^2 T^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2; \\ c^2 (T_c + T)^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2; \\ c^2 (T_c + T_2)^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2, \end{cases} \quad (2)$$

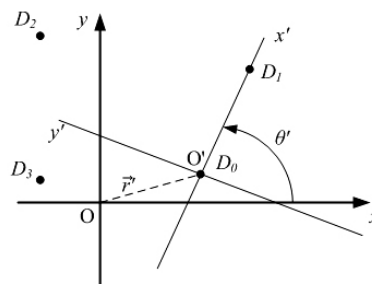


Рис. 8. Перенос системы координат для решения задачи локализации при произвольном расположении ПАЭ

где x, y — неизвестные координаты источника сигналов АЭ;

x_i, y_i — координаты ПАЭ;

T_c — неизвестное время распространения сигнала до момента его регистрации первым датчиком;

T_1, T_2 — времена прихода сигналов на два датчика пьезоантенны.

Для решения задачи локализации при произвольном расположении ПАЭ на плоскости используется перенос системы координат (рис. 8).

После преобразований системы уравнений (2) в координатах, приведенных к первому принявшему сигнал датчику, она принимает вид:

$$\begin{cases} c^2 T_c^2 = x^2 + y^2; \\ x = \frac{x_1^2 - c^2 T_1 (T_1 + 2T_c)}{2x_1}; \\ y = \frac{y_2^2 - c^2 T_2 (T_2 + 2T_c)}{2y_2} + \frac{x_2^2 - c^2 x_2 T_1 (T_1 + 2T_c)}{2x_1 y_2}; \\ x = ((x_{(D)} - x_{0(D)}) \cos \theta + (y_{(D)} - y_{0(D)}) \sin \theta; \\ y = -((x_{(D)} - x_{0(D)}) \sin \theta + (y_{(D)} - y_{0(D)}) \cos \theta, \end{cases} \quad (3)$$

где θ — угол поворота координатных осей;

$x_{(D)}, y_{(D)}$ — исходная ось декартовых координат.

Представленный подход позволяет локализовать координаты на плоскости, что при диагностике цилиндрических резервуаров дает погрешность и увеличивает время. Одним из способов для повышения точности диагностики является использование цилиндрической системы координат.

Цилиндрическая система координат представляет собой трёхмерную систему координат и является обобщением полярной системы координат, которая производится посредством добавления третьей координаты и задаёт смещение произвольной точки M вдоль оси Oz относительно координатной плоскости Oxy [10]. При этом положение точки M в цилиндрической системе координат определяется тройкой чисел ρ, ϕ и z :

ρ — расстояние от точки M до оси Oz ;

ϕ — угол, образованный проекцией радиус-вектора точки M на плоскость Oxy с положительным направлением оси Ox ;

z — проекция точки M на ось Oz .

В качестве примера на рис. 9 представлены положения четырех характерных точек M_1, \dots, M_4 , в которых устанавливаются четыре акустических преобразователя с координатами $z_1, \phi_1, \dots, z_4, \phi_4$, при этом координаты $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = r$.

Поскольку аппликата z точки M в прямоугольной системе координат и аппликата z в цилиндрической

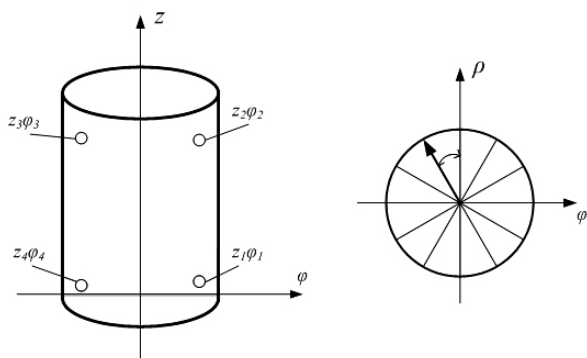


Рис. 9. Цилиндрическая система координат

системе координат совпадают, то формулы, связывающие между собой прямоугольные координаты x, y, z точки M и ее цилиндрические координаты r, φ, z имеют вид:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \varphi; \\ y = r \cdot \sin \varphi; \\ z = z. \end{cases} \quad (4)$$

Формулы перехода (4) позволяют найти прямоугольные координаты по известным цилиндрическим. В то время как обратный переход выполняется по формулам:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2}; \\ \cos \varphi &= \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \\ \sin \varphi &= \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \\ z &= z. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом формул для перехода от декартовой системы координат в цилиндрическую система (3) может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} c^2 T_c^2 &= (r \cos \varphi)^2 + (r \sin \varphi)^2 = r^2; \\ x &= \frac{(r_1 \cos \varphi_1)^2 - c^2 T_1 (T_1 + 2T_c)}{2(r_1 \cdot \cos \varphi_1)}; \\ y &= \frac{(r_2 \sin \varphi_2)^2 - c^2 T_2 (T_2 + 2T_c)}{2(r_2 \sin \varphi_2)} + \frac{(r_2 \cos \varphi_2)^2 - (r_2 \cos \varphi_2)(r_1 \cos \varphi_1)^2 - c^2 (r_2 \cos \varphi_2) T_1 (T_1 + 2T_c)}{2(r_2 \sin \varphi_2)}; \\ z &= z. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для применения метода АЭ для локализации места расположения дефекта (трещины) в случае объекта контроля цилиндрической формы. Необходимым является определение закономерности изменения амплитуды сигнала при постепенном увеличении давления. Проведение дальнейших исследований предполагается провести по определению оптимальных значений давления и времени выдержки, необходимых для регистрации акустических сигналов и локализации места расположения дефекта на поверхности цилиндрической формы (цистерна, технологические цилиндрические емкости).

Полученные в работе выражения позволят уменьшить погрешности определения координат

дефектов по сравнению с выражениями в случае прямолинейного распространения волн на плоской поверхности.

Библиографический список

1. Гусев О. В. Акустическая эмиссия при деформации монокристаллов тугоплавких металлов. Москва: Наука, 1982. 108 с.
2. Мерсон Д. Л. Физическая природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлах и сплавах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Барнаул, 2001. 327 с.
3. Sedlak P., Hirose Y., Khan S. A. [et al.]. New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates // Ultrasonics. 2009. Vol. 49. P. 254–262. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.09.005.
4. Муравьев В. В., Бобров А. Л., Бояркин Е. В. [и др.]. Исследование наплавленных поверхностей литых деталей тележек грузовых вагонов с использованием метода акустической эмиссии // Вестник РГУПС. 2008. № 3. С. 42–47.
5. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Ивлиев В. В. [и др.]. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. Новосибирск: Наука, 2011. 272 с.
6. Martin G., Cacic J., Dimopoulos J. Acoustic Emission for Tank Bottom Monitoring // Advanced Materials Research. 2008. Vol. 41-42. P. 499–506. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.41-42.499.
7. Кутень М. М., Бобров А. Л. Исследование закономерностей акустической эмиссии при гидравлическом испытании сосудов давления // Политранспортные системы: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. (12–13 ноября 2020 г.). Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2020. 965 с.
8. Kuznetsov A. A., Kondratenko E. V., Kulakovskaya V. P. Complex method of railway tanks and reservoirs tightness control // Journal of Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 1901. 012012. 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012012.
9. Calabrese L., Proverbio E. A Review on the Applications of Acoustic Emission Technique in the Study of Stress Corrosion Cracking // Corrosion and Materials Degradation. 2021. Vol. 2 (1). P. 1–30. DOI: 10.3390/cmd2010001.
10. Friedrich L., Colpo A., Maggi A. [et al.]. Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition // Composite Structures. 2021. Vol. 256. 113105. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113105.

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

ResearcherID: A-5017-2017

Адрес для переписки: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

КУЛАКОВСКАЯ Вера Палладиевна, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, Омск.

Адрес для переписки: verakulakovckaya@gmail.com

Для цитирования

Кузнецов А. А., Кулаковская В. П. Определение количественных параметров и координат дефекта сигнала акустико-эмиссионного контроля цилиндрических резервуаров // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 5–11. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-5-11.

Статья поступила в редакцию 05.09.2023 г.

© А. А. Кузнецов, В. П. Кулаковская

DEFINING QUANTITATIVE PARAMETERS AND COORDINATES OF THE DEFECT SIGNAL BY ACOUSTIC-EMISSION CONTROL OF CYLINDRICAL TANKS

In this article there is presented the data obtained by researching the acoustic emission signals when controlling the surface defects of sealed tanks. In the process of studies with pressure changes the data on changes in the parameters of the signals recorded by the digital acoustic-emission control system SCAD-16 have been obtained. On the basis of the obtained results the methodology for determining the coordinates of the defects of the tanks using the cylindrical coordinate system has been proposed. The approach proposed in the article makes it possible to reduce the error of determining the coordinates of defects, as compared to the expressions in the case of rectilinear wave propagation on a flat surface.

Keywords: acoustic emission, defect control, signal activity, railway tank, nondestructive testing, defect coordinates.

References

1. Gusev O. V. Akusticheskaya emissiya pri deformatsii monokristallov tugoplavkikh metallov [Acoustic emission during deformation of single crystals of refractory metals]. Moscow, 1982. 108 p. (In Russ.).
2. Merson D. L. Fizicheskaya priroda akusticheskoy emissii pri deformatsionnykh protsessakh v metallakh i splavakh [Physical nature of acoustic emission during deformation processes in metals and alloys]. Barnaul, 2001. 327 p. (In Russ.).
3. Sedlak P., Hirose Y., Khan S. A. [et al.]. New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates // *Ultrasonics*. 2009. Vol. 49. P. 254–262. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.09.005. (In Engl.).
4. Murav'yev V. V., Bobrov A. L., Boyarkin E. V. [et al.]. Issledovaniye naplavlennykh poverkhnostey litykh detaley telezhek gruzovykh vagonov s ispol'zovaniyem metoda akusticheskoy emissii [Research built-up surfaces of cast parts of freight car bogies with the use of acoustical emission method] // *Vestnik RGUPS. Vestnik RGUPS*. 2008. No. 3. P. 42–47. (In Russ.).
5. Ser'yeznov A. N., Stepanova L. N., Ivliyev V. V. [et al.]. Akustiko-emissionnyy kontrol' zheleznodorozhnykh konstruksiy [Acoustic emission control of railway structures]. Novosibirsk, 2011. 272 p. (In Russ.).
6. Martin G., Cacic J., Dimopoulos J. Acoustic Emission for Tank Bottom Monitoring // *Advanced Materials Research*. 2008. Vol. 41-42. P. 499–506. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.41-42.499. (In Engl.).
7. Kuten' M. M., Bobrov A. L. Issledovaniye zakonomernostey akusticheskoy emissii pri gidravlicheskom ispytanii sosudov davleniya [Study of patterns of acoustic effects under hydraulic pressure in vessels] // *Politransportnyye sistemy. Polytransport Systems*. Novosibirsk, 2020. 965 p. (In Russ.).
8. Kuznetsov A. A., Kondratenko E. V., Kulakovskaya V. P. Complex method of railway tanks and reservoirs tightness control // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2021. Vol. 1901. 012012. 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012012. (In Engl.).
9. Calabrese L., Proverbio E. A Review on the Applications of Acoustic Emission Technique in the Study of Stress Corrosion Cracking // *Corrosion and Materials Degradation*. 2021. Vol. 2 (1). P. 1–30. DOI: 10.3390/cmd2010001. (In Engl.).
10. Friedrich L., Colpo A., Maggi A. [et al.]. Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition // *Composite Structures*. 2021. Vol. 256. 113105. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113105. (In Engl.).

KUZNETSOV Andrey Albertovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.
SPIN-code: 5259-0531
AuthorID (RSCI): 358976
AuthorID (SCOPUS): 56824984500
ResearcherID: A-5017-2017
Correspondence address: kuznetsovaa.omgups@gmail.com
KULAKOVSKAYA Vera Palladiyevna, Graduate Student of Theoretical Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.
Correspondence address: verakulakovckaya@gmail.com

For citations

Kuznetsov A. A., Kulakovskaya V. P. Defining quantitative parameters and coordinates of the defect signal by acoustic-emission control of cylindrical tanks // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 5–11. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-5-11.

Received September 05, 2023.

© A. A. Kuznetsov, V. P. Kulakovskaya

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВ ПО ТИПУ ВНУТРИЗАВОДСКОГО КООПЕРИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Задача рациональной организации вспомогательных процессов на предприятии заключается в снижении их себестоимости путем более глубокой интеграции в основной производственный процесс. Цель статьи заключается в разработке алгоритма классификационного анализа для оценки зависимостей между основными и вспомогательными подразделениями и типологии производственных процессов по уровню внутризаводского кооперирования. В качестве метода определения типа производства предложен метод машинного обучения «Случайный лес» с использованием метаалгоритма обучения машин Бэггинга. Разработаны параметры, описывающие затраты на вспомогательные операции, расходы на ремонтное хозяйство и обслуживание оборудования, уровень технической эффективности производства. Апробация алгоритма на примере химических предприятий позволила выделить три типа производств по характеру внутризаводской кооперации процессов по наиболее информативным параметрам. Для оценки полезности и производительности моделей построены диаграммы кумулятивного подъема, где наиболее продуктивным определен тип со средним уровнем внутризаводского кооперирования. Результаты являются первичной диагностикой организации вспомогательного хозяйства, принятия решений о проведении реинжиниринга процессов с целью усиления внутризаводского кооперирования и снижения уровня затрат.

Ключевые слова: вспомогательное производство, производственные процессы, внутризаводское кооперирование, алгоритм, классификационный анализ, машинное обучение, «Случайный лес».

Введение. Предметом исследования организации производства является организация технического обслуживания основного производственного процесса, осуществляемого силами вспомогательных цехов и участков. От качества проектирования производственной системы во многом зависит ритмичность и бесперебойность технологического процесса, техническая и экономическая эффективность производства продукции. Простой основного производства по причине низкого уровня организации вспомогательных производств приводят к снижению выпуска продукции, перерасходу материальных ресурсов, увеличению себестоимости конечной продукции [1, 2].

В практике проектирования промышленных производств используется термин «кооперирование», характеризующий форму организации производства и предполагающий производственные связи цехов, участков, совместно участвующих в производстве продукции [3, 4]. Внутризаводское кооперирование проявляется в обслуживании основных производственных подразделений вспомо-

гательными. Соответственно, чем выше уровень кооперирования основных и вспомогательных процессов и операций, тем больше степень ритмичности и бесперебойности технологического процесса, рациональнее используются ресурсы производства.

Типологию организации производственных процессов по уровню внутризаводского кооперирования предлагается осуществить на основе классификации объектов по ряду признаков. Адекватным инструментом классификации может быть один из алгоритмов искусственного интеллекта. Достаточно широкое применение в решении прикладных задач классификации находят методы деревьев решений — алгоритмы обучения классификатора «Случайный лес» (Random forest), обладающие гибкостью для решения практически любых проблем в области машинного обучения: классификация, регрессия, поиск выбросов и аномалий [5–7]. В сфере организации производства алгоритмы случайного леса используются для принятия решений по модернизации производственных процессов [8, 9], организации контроллинга и повышению ре-

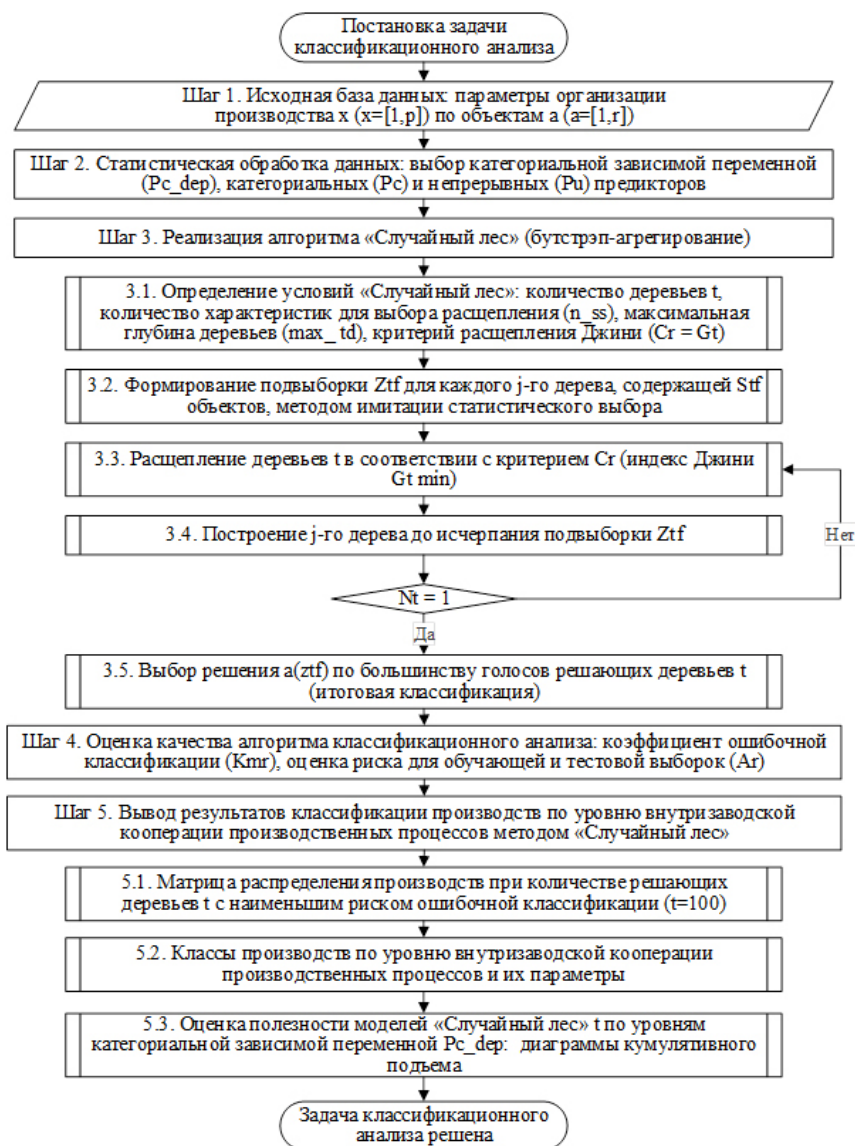


Рис. 1. Алгоритм авторской методики решения задачи классификации производств по уровню внутризаводского кооперирования производственных процессов методом машинного обучения «Случайный лес»

сурсоэффективности промышленных предприятий [10, 11].

Вместе с тем при наличии теоретико-практического материала остаются неизученными отдельные вопросы использования алгоритмов машинного обучения для решения задач моделирования производственных процессов, в частности вопросов организации вспомогательного хозяйства.

Цель исследования. Цель статьи заключается в разработке алгоритма классификационного анализа для оценки зависимостей между основными и вспомогательными подразделениями и типологии производственных процессов по уровню внутризаводского кооперирования.

Методика исследования. Разработана методика и выстроен алгоритм действий, включающий последовательность математических и логических процедур выбора производств по уровню внутризаводского кооперирования (рис. 1). Далее кратко опишем каждый шаг процедур.

Шаг 1. На первом этапе осуществляется постановка задачи классификационного анализа с учетом исходной базы данных x ($x = [1, p]$) по объектам — видам производств a ($a = [1, r]$):

x_1 — доля расходов на вспомогательные производственные операции в общих расходах на производственный процесс, %;

x_2 — расходы на аренду производственного оборудования в расчете на единицу произведенной продукции, рублей;

x_3 — стоимость работ ремонтного хозяйства в расчете на единицу произведенной продукции, рублей;

x_4 — выпуск продукции с единицы ресурсов на реализацию производственного процесса, рублей.

Исследуемый массив данных или объекты классификации — предприятия по производству химической продукции, нефтепродуктов, пластмассовых и резинотехнических изделий и их подвиды ($a = [1, r]$, где $r = 26$).

Шаг 2. Осуществляется верификация данных путем их статистической обработки и выбор переменных: категориальной зависимой переменной (Pc_dep), категориальных (Pc) и непрерывных (Pu) предикторов.

Установим следующее условие для перехода базового показателя (x_1, \dots, x_n) в категорию переменной:

при отклонении дисперсии выборки (Sv) от среднего значения (Av) более чем в 10 раз базовый показатель x_i не может участвовать в классификационном анализе «Случайный лес»:

$$S_y = \sum \frac{(x_i - x_{av}) \cdot 2}{(n - 1)}, \quad (1)$$

$$\text{если } Sv_x / Av_x > 10, \text{ то } x \notin Pc_{dep}, Pc, Pu, \quad (2)$$

где x_{av} — выборочное среднее значение по показателю;

x_i — i -й элемент выборочной совокупности по показателю;

n — размер выборочной совокупности по показателю.

Шаг 3. Реализация алгоритма «Случайный лес» ансамблевым методом бутстрэп-агрегирования включает пять последовательных процедур.

3.1. Определение основных параметров классификации объектов: количество деревьев (t), количество заданных параметров для выбора расщепления (n_{ss}), максимальная глубина деревьев (max_td), критерий расщепления (C_j).

В качестве критерия расщепления вершины дерева используется критерий Джини (G_i):

$$G_i = 1 - \sum_{j=1}^v P^2(Y_h), \quad (3)$$

где $P(Y_h)$ — удельный вес объектов класса Y_h в подвыборке вершины дерева t , $h = [1, v]$.

3.2. Для каждого дерева (t) из обучающей выборки генерируется подвыборка Z_t , содержащая S_t объектов. Формирование подвыборки Z_t осуществляется на основе случайного выбора с возможным повторением объектов.

3.3. Производится расщепление построенных деревьев t . В соответствии с формулой (3) при бинарной классификации показатель качества расщепления оценивается следующим образом:

$$G_t^{split} = \frac{N_1}{N} G_{t1} + \frac{N_2}{N} G_{t2} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где N — число объектов в текущей вершине дерева t (вершина «родитель»);

N_1, N_2 — число объектов в вершинах t_1 и t_2 , соответствующих левому и правому вершинам (вершина «дочь») в случае бинарного дерева.

3.4. На заключительном этапе проводится построение дерева (t) до исчерпания подвыборки Z_t , т.е. до единственного представителя в вершине дерева.

3.5. Итоговый классификатор «Случайный лес» $a(Z_{it})$ выбирает решение по большинству голосов построенных решающих деревьев:

$$a(Z_{it}) = \text{sign} \sum_{j=1}^r b(Z_{it}), \quad (5)$$

где $a(Z_{it})$ — решение итогового классификатора j -го дерева t ($j = 1, t$);

$b(Z_{it})$ — решение базового классификатора j -го дерева ($j = 1, t$);

sign — функция, возвращающая знак своего аргумента.

Шаг 4. Производится оценка качества алгоритма: коэффициент ошибочной классификации (K_m), оценка риска для обучающей и тестовой выборок (A_r):

$$A_r = 1 - \frac{P_{rs}}{P_s}, \quad (6)$$

где A_r — оценка риска ошибки классификации объектов;

P_{rs} — число случаев, правильно классифицированных по деревьям;

P_s — общее число случаев классификации объектов (размер выборки).

Шаг 5. На заключительном этапе производится вывод результатов классификации производств по уровню внутриводского кооперирования:

5.1. Построение матрицы распределения производств при количестве решающих деревьев с наименьшим риском ошибочной классификации.

5.2. Оценка полезности моделей на основе диаграмм кумулятивного подъема.

5.3. Вывод итоговых данных о классах производств по наиболее информативным предикторам по критерию G_i .

На этом задача классификационного анализа считается завершенной.

Таблица 1

Дескриптивная статистика данных для классификационного анализа производств по уровню внутриводского кооперирования

	x_1	x_2	x_3	x_4
Дисперсия выборки (Sv)	24,820	0,0016	0,0001	0,042
Стандартная ошибка (Es)	0,977	0,0079	0,0015	0,040
Стандартное отклонение (Ds)	4,982	0,0401	0,0076	0,205
Среднее (Av)	5,324	0,0191	0,0034	1,041
Экссесс (Ex)	5,584	14,9134	8,3793	0,402
Асимметричность (As)	2,148	3,6810	2,8012	-0,935
Интервал (Int)	22,960	0,1926	0,0324	0,774
Минимум (Min)	0,000	0,0000	0,0000	0,567
Максимум (Max)	22,960	0,1926	0,0324	1,341
Количество объектов (Ra)	26	26	26	26

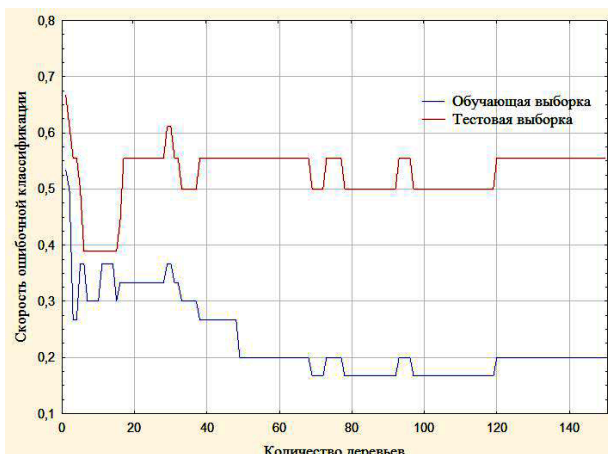


Рис. 2. График коэффициента ошибочной классификации при максимальном количестве решающих деревьев $t_{max} = 150$

Результаты апробации методики. Стоимость организационно-технического обслуживания основного производства можно оценить как отношение затрат на вспомогательные производственные

операции к общим расходам на производственный процесс. Задача рациональной организации вспомогательных процессов на предприятии заключается в снижении их себестоимости до оптимального значения.

Для классификационного анализа нами принята равная для всех категорий цена ошибочной классификации, т.е. матрица стоимости неправильной классификации будет симметричной. Априорное распределение вероятностей величины примем как вероятность того, что объект попадет в один из классов.

Для верификации данных проведен дескриптивный анализ показателей выборки. Статистическая обработка данных показала, что все показатели выборки соответствуют условиям для входных данных ансамблевого метода машинного обучения «Случайный лес» (табл. 1). В качестве зависимой категориальной переменной Pc_dep принят уровень организации основных и вспомогательных производств (текстовая переменная). Независимые категориальные и непрерывные предикторы следующие: $Pc1$ — уровень развития технического аутсорсинга производства (текстовая переменная); $Pu2$ — доля расходов на вспомогательные производственные операции в общих расходах на про-

Таблица 2

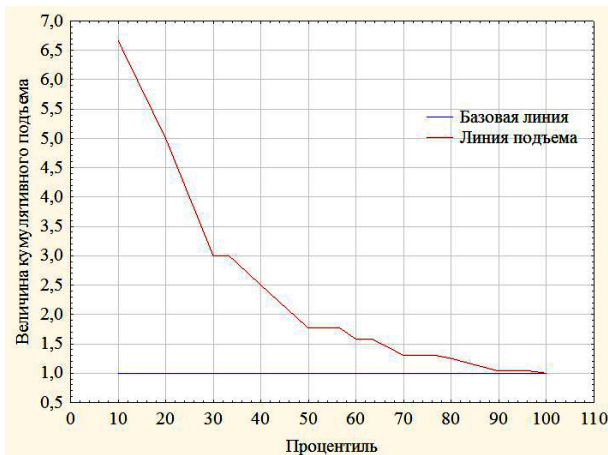
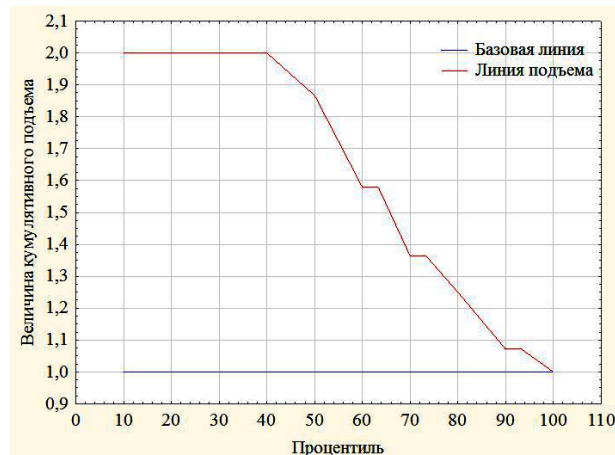
Оценка рисков для обучающей и тестовой выборки при построении случайного леса с разным количеством деревьев

Число деревьев в «Случайном лесу» (t_{max})	Наименование выборки	Оценка риска (A_r)	Стандартная ошибка (E_s)
50	Обучающая выборка	0,083698	0,024870
	Тестовая выборка	0,308521	0,047390
100	Обучающая выборка	0,120413	0,024146
	Тестовая выборка	0,285767	0,047390
150	Обучающая выборка	0,079739	0,020099
	Тестовая выборка	0,305897	0,041889

Таблица 3

Смоделированные классы производств по уровню внутризаводского кооперирования производственных процессов методом «Случайный лес»

Наименование решающих переменных	Тип 1 «Высокий уровень внутризаводского кооперирования, масштабный технический аутсорсинг, высокая техническая эффективность производства»	Тип 2 «Средний уровень внутризаводского кооперирования, частичный технический аутсорсинг, средняя техническая эффективность производства»	Тип 3 «Низкий уровень внутризаводского кооперирования, переход на технический аутсорсинг, низкая техническая эффективность производства»
Pc_dep	$Pc_dep < 5,0$	$5,0 < Pc_dep < 15,0$	$Pc_dep > 15,0$
$Pu3$	0,024	0,011	0,008
$Pu4$	0,0	0,0037	0,0035
$Pu5$	1,238	1,102	1,001
Распределение химических производств	производства: красок и лаков, агрохимических продуктов, изделий из вулканизированной резины и пластмассы, резиновых шин, фотопластинок и фотопленок, парфюмерных и косметических средств, синтетических смол, химических волокон	производства: химических продуктов, пластмассовых изделий для строительства, органических поверхностно-активных веществ, лекарственных препаратов и фармацевтических субстанций, промышленных газов, смазочных материалов, мыла и моющих средств	производство удобрений и азотных соединений

а) Уровень переменной Pc_dep «Тип 1»б) Уровень переменной Pc_dep «Тип 2»Рис. 3. Диаграммы кумулятивного подъема для оценки полезности модели «Случайный лес» по уровням категориальной зависимой переменной (Pc_dep)

изводственный процесс; $Pu3$ — расходы на аренду производственного оборудования в расчете на единицу произведенной продукции; $Pu4$ — стоимость работ ремонтного хозяйства в расчете на единицу произведенной продукции; $Pu5$ — техническая эффективность производства (выпуск продукции с единицы использованных ресурсов).

Далее представлены результаты оценки качества алгоритма классификационного анализа (рис. 2), где показаны коэффициенты ошибочной классификации (Km) по последовательным шагам добавления деревьев для данных обучения и данных тестирования.

В тестовых выборках при вариантах исследуемых множеств решающих деревьев ($t_{max} = 50, 100, 150$) практически в 30 % случаев существует риск неверной классификации деревьев (табл. 2).

Относительно высокое значение риска и существенное отличие вероятности ошибки алгоритма тестовой и обучающей выборки свидетельствует, вероятно, о переобучении алгоритма. Исследователи в области машинного обучения обозначают, что выборки с большим шумом или заданным массивом данных делают модель «Случайный лес» склонной к переобучению [12]. В нашем случае причиной переобучения является высокая сложность модели ввиду стохастической зависимости между предикторами и ответом. В качестве оптимального значения деревьев принимаем $t = 100$ ввиду наименьшей оценки риска ошибочной классификации.

В результате выполнения всех процедур заданная выборка производств классифицирована на три группы (табл. 3):

- тип 1 «Высокий уровень внутризаводского кооперирования, масштабный технический аутсорсинг, высокая техническая эффективность производства»;

- тип 2 «Средний уровень внутризаводского кооперирования, частичный технический аутсорсинг, средняя техническая эффективность производства»;

- тип 3 «Низкий уровень внутризаводского кооперирования, переход на технический аутсорсинг, низкая техническая эффективность производства».

Для подтверждения результатов классификации построены диаграммы кумулятивного подъема по первому и второму типу предприятий, а для

«Типа 3» не выбран ни один случай положительных наблюдений (рис. 3). Наибольший подъем кривой наблюдается при уровнях переменной Pc_dep «Тип 1», где значения оси Y на первых 10 процентах достигают 6,5. Однако данные модели показывают существенный спад кривой подъема после 20–30 % и меньшую вероятность классификации. В графике при уровне переменной Pc_dep «Тип 2» угол линии подъема более приближен к 45°. Соответственно, область между линией подъема и базовой линией наибольшая, что характеризует данную модель как наиболее продуктивную с максимальной вероятностью правильной классификации.

Таким образом, тип 1 включает 17 видов производств и характеризуется долей расходов на вспомогательные производственные операции в общих расходах на производственный процесс менее 5,0 минимальным уровнем технической независимости производства или развитием аутсорсинга технического обслуживания ($Pu3 = 0,024$), отсутствием собственных ремонтных работ, наибольшей технической эффективностью производства $Pu5 = 1,238$.

К типу 2 со средним уровнем внутризаводского кооперирования отнесены 8 видов производств с долей расходов на вспомогательные производственные операции от 5,0 до 15,0 уровнем технической независимости производства $Pu3 = 0,011$ средней стоимостью работ ремонтного хозяйства в расчете на единицу произведенной продукции $Pu4 = 0,0037$ технической эффективностью производства $Pu5 = 1,102$.

Низкий уровень внутризаводского кооперирования основных и вспомогательных производственных процессов (тип 3) наблюдается только в производстве удобрений и азотных соединений: $Pc_dep > 15,0$, $Pu3 = 0,008$, $Pu4 = 0,0035$, $Pu5 = 1,001$.

Заключение. Таким образом, в процессе решения задачи классификации производственных процессов по уровню внутризаводского кооперирования методом алгоритма машинного обучения получены следующие результаты:

1. Предложена авторская методика последовательных действий проведения классификационного анализа для целей выделения объектов с различным уровнем внутризаводского кооперирования основных и вспомогательных производственных

процессов. Методика основана на методе деревьев классификации «Случайный лес» с использованием метаалгоритма композиционного обучения машин Бэггинга. Выбор метода обоснован его наилучшим поведением при большом числе предикторных переменных. Для удобства потенциальных пользователей методика представлена в виде алгоритма из пяти ключевых процедур.

2. Продемонстрирована апробация алгоритма классификационного анализа на примере типологии химических производств по характеру организации вспомогательного хозяйства. Сформирована база данных параметров по 26 видам химических производств, описывающая затраты на вспомогательные операции, расходы на ремонтное хозяйство и обслуживание оборудования, уровень технической эффективности производства. Показана процедура статистической обработки данных на основе дескриптивной аналитики. Проведена оценка качества алгоритма классификационного анализа на основе коэффициентов ошибочной классификации. Установлено оптимальное значение деревьев $t = 100$ ввиду наименьшей оценки риска ошибочной классификации.

3. В результате выполнения всех процедур заданная выборка производств классифицирована на три типа по наиболее информативным переменным. Образованные типы производств характеризуются определенными стандартами значений параметров организации основных и вспомогательных производственных процессов: уровнем внутривзаводской кооперации, развития технического аутсорсинга, технической эффективности производства. Для оценки качества моделей построены диаграммы кумулятивного подъема, где на основе логистической регрессии с максимальной вероятностью правильной классификации определен тип производства 2 «Средний уровень внутривзаводского кооперирования, частичный технический аутсорсинг, средняя техническая эффективность производства».

Полученные данные являются первичной информацией для оценки эффективности организации вспомогательного хозяйства на предприятии, принятия решений о проведении реинжиниринга вспомогательных процессов с целью усиления внутривзаводского кооперирования и снижения уровня затрат.

Библиографический список

1. Травин Г. М., Травин М. М. Системы управления вспомогательным производством промышленных предприятий // Технологии и качество. 2018. № 3 (41). С. 31–35. EDN: YSWYPR.
2. Пигилова Р. Н., Малышева Т. В. Вспомогательное производство: проектирование и эксплуатация систем энергообеспечения // Компетентность. 2022. № 9-10. С. 44–48. DOI: 10.24412/1993-8780-2022-9-44-48. EDN: VBPAUV.
3. Яковлев М. М. Горизонтальная и вертикальная интеграция процессов производства на предприятии // Научный аспект. 2021. Т. 1, № 4. С. 88–92. EDN: FOCHEC.

4. Ключков Ю. С., Конников Е. А. Трансформация структуры производственной себестоимости на промышленном предприятии в процессе интеграции аддитивных технологий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21, № 1 (87). С. 5–10. EDN: WNXXCI.

5. Zhang C., Wang W., Liu L. [et al.]. Three-Branch Random Forest Intrusion Detection Model // Mathematics. 2022. Vol. 10 (23). P. 4460. DOI: 10.3390/math10234460.

6. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Особенности диагностики технических систем с использованием мультиклассовой классификации // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2 (38). С. 45–52. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-2-5. EDN: YXIVPA.

7. Zhao L., Zhu Y., Zhao T. Deep Learning-Based Remaining Useful Life Prediction Method with Transformer Module and Random Forest // Mathematics. 2022. Vol. 10 (16). P. 2921. DOI: 10.3390/math10162921.

8. Пашенко А. Ф., Тордия М. Д., Хижинская Л. Д. Обзор современных подходов к задачам выбора информативных признаков // Датчики и системы. 2020. № 12 (253). С. 16–26. DOI: 10.25728/datsys.2020.12.2. EDN: FFRRGF.

9. Ревина И. В., Бояркин Г. Н. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 230–234. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-230-234. EDN: YSWONV.

10. Лоскутов И. А., Искандарова В. Г. Экосистемный контроллинг 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. EDN: KEAOC.

11. Гайфуллина М. М., Низамова Г. З., Гареева З. А. Формирование эффективной системы контроллинга при реструктуризации вспомогательного производства нефтехимического предприятия // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2018. № 5. С. 109–133. DOI: 10.17122/ogbus-2018-5-109-133. EDN: VKKUZL.

12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. 2nd ed. Springer, 2009. 764 p. ISBN 978-0-387-84857-0.

МАЛЫШЕВА Татьяна Витальевна, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры логистики и управления Казанского национального исследовательского технологического университета, г. Казань.

SPIN-код: 6114-7357

AuthorID (РИНЦ): 769164

ORCID: 0000-0003-4306-0188

AuthorID (SCOPUS): 57190414555

ResearcherID: AAM-2396-2021

Адрес для переписки: tv_malysheva@mail.ru

Для цитирования

Малышева Т. В. Разработка алгоритма классификации производств по типу внутривзаводского кооперирования основных и вспомогательных процессов методом машинного обучения // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 12–19. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-12-19.

Статья поступила в редакцию 10.07.2023 г.

© Т. В. Малышева

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM FOR CLASSIFYING INDUSTRIES ACCORDING TO THE TYPE OF INTRA-FACTORY COOPERATION OF MAIN AND AUXILIARY PROCESSES USING MACHINE LEARNING

The task of rational organization of auxiliary processes at the enterprise is to reduce their cost by deep integration into the main production process. The purpose of the article is to develop a classification analysis algorithm for assessing the dependencies between the main and auxiliary units and the typology of production processes according to the level of intra-factory cooperation. As a method for determining the type of production, the Random Forest machine learning method using the bagging machine learning meta-algorithm is proposed. Parameters have been developed that describe the costs of auxiliary operations, the costs of repair facilities and equipment maintenance, the level of technical efficiency of production. Approbation of the algorithm on the example of chemical enterprises made it possible to distinguish three types of production according to the nature of intra-plant cooperation of processes according to the most informative parameters. To assess the usefulness and performance of the models, cumulative lift diagrams are constructed, where the most productive type is determined with an average level of intra-factory cooperation. The results are the primary diagnostics of the organization of auxiliary facilities, decision-making on the reengineering of processes in order to strengthen intra-factory cooperation and reduce costs.

Keywords: auxiliary production, production processes, intra-factory cooperation, algorithm, classification analysis, machine learning, random forest.

References

1. Travin G. M., Travin M. M. Sistemy upravleniya vspomogatel'nym proizvodstvom promyshlennykh predpriyatii [Production auxiliary process control systems] // *Tekhnologii i kachestvo. Technologies & Quality*. 2018. No. 3 (41). P. 31–35. EDN: YSWYPR. (In Russ.).
2. Pigilova R. N., Malysheva T. V. Vspomogatel'noye proizvodstvo: proyektirovaniye i ekspluatatsiya sistem energoobespecheniya [Auxiliary production: design and operation of energy supply systems] // *Kompetentnost'. Journal Kompetentnost'*. 2022. No. 9–10. P. 44–48. DOI: 10.24412/1993-8780-2022-9-44-48. EDN: VBPAYV. (In Russ.).
3. Yakovlev M. M. Gorizontal'naya i vertikal'naya integratsiya protsessov proizvodstva na predpriyatii [Horizontal and vertical integration of production processes at the enterprise] // *Nauchnyy aspekt. Nauchnyy Aspekt*. 2021. Vol. 1, no. 4. P. 88–92. EDN: FOCHES. (In Russ.).
4. Klochkov Yu. S., Konnikov E. A. Transformatsiya struktury proizvodstvennoy sebestoimosti na promyshlennom predpriyatii v protsesse integratsii additivnykh tekhnologiy [Changes in the structure of production costs at an industrial enterprise while integrating additive technologies] // *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019. Vol. 21, no. 1 (87). P. 5–10. EDN: WNXXCI. (In Russ.).
5. Zhang C., Wang W., Liu L. [et al.]. Three-Branch Random Forest Intrusion Detection Model // *Mathematics*. 2022. Vol. 10 (23). P. 4460. DOI: 10.3390/math10234460. (In Engl.).
6. Klyachkin V. N., Karpunina I. N. Osobennosti diagnostiki tekhnicheskikh sistem s ispol'zovaniem mul'tiklassovoy klassifikatsii [Features of diagnostics of technical systems using multiclass classification] // *Nadezhnost' i Kachestvo Slozhnykh Sistem. Reliability and Quality of Complex Systems*. 2022. No. 2 (38). P. 45–52. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-2-5. EDN: YXIVPA. (In Russ.).
7. Zhao L., Zhu Y., Zhao T. Deep Learning-Based Remaining Useful Life Prediction Method with Transformer Module and Random Forest // *Mathematics*. 2022. Vol. 10 (16). P. 2921. DOI: 10.3390/math10162921. (In Engl.).
8. Pashchenko A. F., Tordiya M. D., Khizhinskaya L. D. Obzor sovremennykh podkhodov k zadacham vybora informativnykh priznakov [Review of modern approaches to the problems of informative features selection] // *Datchiki i Sistemy. Sensors & Systems*. 2020. No. 12 (253). P. 16–26. DOI: 10.25728/datsys.2020.12.2. EDN: FFRRGF. (In Russ.).
9. Revina I. V., Boyarkin G. N. Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennogo protsessa izgotovleniya detaley [Simulation of production process manufacturing parts] // *Omskiy Nauchnyy Vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 6 (162). P. 230–234. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-230-234. EDN: YSWONV. (In Russ.).

10. Loskutov I. A., Iskandarova V. G. Ekosistemnyy kontrolling kak resheniye slozhnoy zadachi optimizatsii tekhnologicheskogo protsessa promyshlennogo proizvodstva [Ecosystem controlling as a solution to complex task of optimizing the technological process of industrial production] // Omskiy Nauchnyy Vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 1 (185). P. 53–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-53-57. EDN: KEAOAC. (In Russ.).

11. Gayfullina M. M., Nizamova G. Z., Gareyeva Z. A. Formirovaniye effektivnoy sistemy kontrollinga pri restrukturizatsii vspomogatel'nogo proizvodstva neftekhimicheskogo predpriyatiya [Formation of effective system of controlling when restructuring auxiliary production of the petrochemical enterprise] // Elektronnyy Nauchnyy Zhurnal Neftegazovoye Delo. *Electronic Scientific Journal Oil and Gas Business*. 2018. No. 5. P. 109–133. DOI: 10.17122/ogbus-2018-5-109-133. EDN: VKKUZI. (In Russ.).

12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. 2nd ed. Springer, 2009. 764 p. ISBN 978-0-387-84857-0. (In Engl.).

MALYSHEVA Tatyana Vitalievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Logistics and

Management Department, Kazan National Research Technological University, Kazan.

SPIN-code: 6114-7357

AuthorID (RSCI): 769164

ORCID: 0000-0003-4306-0188

AuthorID (SCOPUS): 57190414555

ResearcherID: AAM-2396-2021

Correspondence address: tv_malysheva@mail.ru

For citations

Malysheva T. V. Development of the algorithm for classifying industries according to the type of intra-factory cooperation of main and auxiliary processes using machine learning // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 12–19. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-12-19.

Received July 10, 2023.

© T. V. Malysheva

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН

В представленной работе сделан подробный анализ современных подходов в создании упругопластических моделей роста поверхностных трещин, учитывающих влияние вида двухосного нагружения на развитие напряжений и деформаций в вершине трещин и, соответственно, на скорость роста трещин. Обосновывается использование пластического коэффициента интенсивности напряжений в качестве характеристики сопротивления циклическому деформированию и разрушению для условий двухосного нагружения. Предлагаются континуальные модели пластичности для моделирования упругопластического поведения металла численными методами и, в частности, методом конечных элементов.

Ключевые слова: усталостное разрушение, механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, метод конечных элементов, J-интеграл, критерий текучести, упрочнение.

Введение. Циклическая нагруженность элементов конструкций является одной из наиболее распространенных причин усталостных разрушений.

В связи с этим прогнозирование остаточного ресурса металлических конструкций, имеющих несквозные усталостные трещины, позволяет значительно снизить возможный экономический ущерб, кроме того, существенно сократить трудозатраты на восстановление и ремонт.

Подобные исследования проводятся учеными всего мира с целью прогнозирования остаточного ресурса деталей механизмов и элементов конструкций, имеющих поверхностную трещину. Существует много подходов к решению данной проблемы, предлагаются различные методики, некоторые из них рассмотрены в настоящей работе.

Теория. На основе современных научных достижений был сформулирован принцип безопасной контролируемой повреждаемости, который позволил оценивать несущую способность ответственных конструкций, имеющих дефект в виде трещины. Принято считать, что процесс усталостного разрушения проходит две стадии: первая — зарождение трещины, вторая — стабильный рост трещины. Эти стадии по характеру их протекания кардинально отличаются друг от друга. Первая стадия характеризуется тем, что трещина растет очень медленно или ее рост вообще приостанавливается до тех пор, пока размер трещины не достигнет некой критической величины, после чего начнется процесс разрушения.

Наиболее подходящим инструментом исследования роста трещин на первой стадии на сегодняшний день является исследование с позиций механики разрушения, которая включает в себя две основные стороны исследований. Во-первых, это вычисление напряжений, возникающих в конструкции, в зоне трещины и, во-вторых, — проведение эксперимен-

тов с целью определения трещиностойкости материала, из которого она изготовлена.

Решающим моментом в развитии механики разрушения оказалось решение задачи определения поля напряжений в вершине трещины с помощью единственного параметра — коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_I , который определяется как функция номинальных напряжений тела с трещиной и размеров трещины.

Результаты теоретических исследований. Актуальным направлением научных исследований является разработка упругопластических моделей роста поверхностных трещин, учитывающих влияние вида двухосного нагружения на развитие напряжений и деформаций в вершине трещин и, соответственно, на скорость роста трещин.

В работе [1] разработана простая, но достаточно точная методика для определения КИН по фронту краевой полуэллиптической поперечной трещины в растянутой полосе. Данной методикой особенно удобно пользоваться при моделировании роста трещины в случае циклического нагружения. Изложенную методику вычисления КИН можно обобщить и на другие тела с несквозными трещинами, в первую очередь на нагруженные внутренним давлением тонкостенные трубы с продольными краевыми трещинами. Решение такой задачи с помощью метода конечных элементов (МКЭ) затруднительно, так как на каждом шаге требуется генерирование новой конечно-элементной сетки. На рис. 1 сравниваются результаты расчета по предлагаемой методике с численными значениями, полученными в процессе решения задачи методом конечных элементов в программной среде ANSYS, которые позволяют говорить о возможности использования разработанной методики.

В статье [2] рассматриваются теоретические основы применения закона Пэриса к двумерным

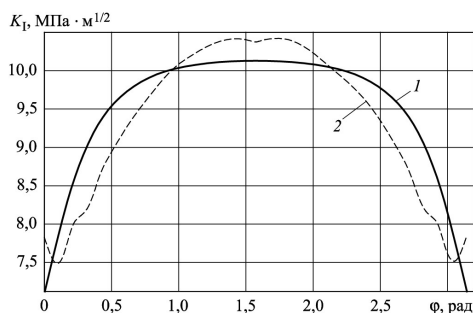


Рис. 1. Распределение КИН по фронту трещины: 1 — метод сечений; 2 — МКЭ

поверхностным трещинам. Вследствие неоднородности значений коэффициента интенсивности напряжений вдоль фронта трещины возникают трудности в расчетах, позволяющих прогнозировать скорость роста трещин. В связи с этим авторами предложен относительно простой, но мощный метод представления двумерного роста трещины в сложных геометриях и системах напряжений: *среднеквадратичный коэффициент интенсивности напряжений* (RMS SIF).

Группой ученых из Японии и Таиланда [3] для анализа трещин в изотропном линейно-упругом полупространстве установлена численная методика, основанная на методе слабо-сингулярных граничных интегральных уравнений.

Американские ученые М. У. Не из калифорнийского университета и J. W. Hutchinson из Гарварда [4] в своих исследованиях успешно используют 3D моделирование роста полуэллиптической трещины. Трехмерный анализ для расчета скорости высвобождения энергии деформации и распределения коэффициентов интенсивности напряжений вдоль фронта поверхностной трещины проводился с помощью конечно-элементного моделирования. При этом с целью повышения точности расчетов, конечно-элементная сетка подвергалась модификации.

Работа корейского автора [5] также посвящена трехмерному моделированию. В работе описывается автоматическая трехмерная программа генерации конечно-элементной сетки, созданная для повышения точности расчетов напряженно-деформированного состояния в вершине полуэллиптической поверхностной трещины в трубе.

Аналогичные задачи были изучены и малазийскими учеными в работе [6]. В своем исследовании они предложили эффективную схему построения сетки и моделирования полуэллиптической трещины, которая была впервые разработана с использованием простой стратегии развертки.

Наиболее распространенным инструментом 3D моделирования роста трещины считается программный комплекс ANSYS, который позволяет выполнять расчеты НДС в вершине трещины, принимая в качестве условия разрушения один из параметров: коэффициент интенсивности напряжений, J -интеграл или раскрытие трещины.

Авторами работы [7] была разработана программа-макрос *crack_sf.mac* с использованием языка APDL. Суть данного подхода состоит в преобразовании при помощи формулы Гаусса — Остроградского двумерного контурного J -интеграла в интеграл по площади, ограниченной контуром, и трёхмерного поверхностного J -интеграла в интеграл по объему, ограниченному поверхностью.

Моделированию развития угловых четвертьэллиптических усталостных трещин от начального дефекта посвящены работы [8, 9]. Результаты, полученные при конечно-элементном моделировании роста усталостных трещин с учетом накопления повреждений, сравнивались с обобщенной кривой, полученной при экспериментальном нагружении образца по одной оси. При моделировании развития трещины использовался деформационный критерий разрушения. Для повышения точности результатов исследования был принят во внимание фактор раскрытия трещины.

Авторами работы [10] представлен обзор разработок, направленных на решение проблемы аварий сосудов под давлением. В статье говорится о том, что обычно при анализе аварий сосудов применяется линейная механика разрушения (ЛУМР), несмотря на то, что диапазон применяемых материалов для изготовления подобных сосудов довольно большой. Иногда невозможно установить четкие границы между хрупким и пластичным материалом. Один и тот же материал при определенных обстоятельствах может вести себя как хрупкий, а при других условиях — как пластичный. Поскольку пластическая деформация в вершине поверхностной трещины оказывает большое влияние на скорость ее роста, целесообразно при подобных расчетах использовать инструменты упругопластической механики разрушения. При исследовании поверхностных трещин в элементах конструкций под действием двухосного циклического нагружения возникают проблемы, связанные с трудностями анализа упругопластического состояния вдоль фронта трещин.

Авторами работы [11] обосновывается использование пластического коэффициента интенсивности напряжений в качестве характеристики сопротивления циклическому деформированию и разрушению для условий двухосного нагружения.

Концепция пластического коэффициента интенсивности напряжений, положенная в основу современного подхода к решению задач вычислительной и экспериментальной механики разрушения, рассмотрены в работе [12].

В работе показано, что область вершины трещины находится в сложном напряженном состоянии, что значительно затрудняет расчеты с учетом двухосности нагружения, стеснения материала, вызванного пластической деформацией и вязко-хрупкими особенностями материала конструкции.

Использование пластического коэффициента интенсивности напряжений, характеризующего параметр сопротивления разрушению материалов, позволяет достаточно точно учитывать кинетические характеристики в вершине трещины.

Работы, посвященные исследованию трещиностойкости, содержат различные методики и подходы к оценке остаточного ресурса элементов конструкций, имеющих несквозные усталостные трещины.

Малоцикловый критерий разрушения Коффина был положен в основу исследований роста полуэллиптической трещины китайскими учеными [13].

В расчетах была использована оценка накопления повреждений. Исследование распространения трещин базировалось на методе конечных элементов, с помощью которого производилось моделирование накопления повреждений. При этом учитывался фактор двумерности формы полуэллиптических трещин, поэтому расчеты проводились

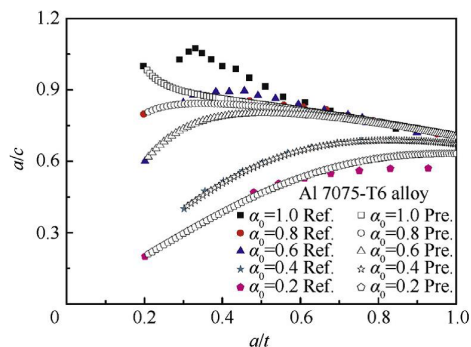


Рис. 2. Сравнение изменения формы фронта эллиптической трещины

по двум осям, вдоль которых прилагались основные нагрузки. По результатам исследований получено много экспериментальных данных, в том числе по изменению формы фронта трещины в зависимости от ее размеров a и c , а также толщины образца t (рис. 2). Используя данную методику, удалось проводить исследование трещины, даже при неустановившемся ее фронте. Кроме того, даже при наличии значительной пластической деформации учет деформационного критерия позволяет изучать распространение трещины.

И, наконец, при использовании этой методики стало возможным учитывать накопление повреждений в вершине трещины с учетом изменяющихся размеров и формы зоны пластической деформации.

Результаты практических исследований. Авторами данной статьи проводилось исследование напряженно-деформированного состояния в вершине сквозной усталостной трещины методом моделирования в программном комплексе ANSYS. Для примера рассмотрен анализ напряжений в вершине трещины в упругопластической постановке. Моделирование выполнено в программе ANSYS Workbench.

В препроцессор программы были введены механические свойства стали 20, при этом была использована билинейная изотропная модель упрочнения стали (рис. 3). В разделе свойств материала задан предел текучести стали σ_T и касательный модуль E_T , определенные по диаграмме растяжения.

В начальной стадии нагружения металлы находятся в упругой области, деформации при этом пропорциональны прикладываемой нагрузке. Затем, при достижении предела текучести σ_T , возникают необратимые пластические деформации. Для исследования поведения металлов в этой области необходимо применять моделирование их пластических

свойств [14]. После снятия нагрузки упругая часть деформаций восстанавливается, а в металле остаются лишь пластические деформации.

При моделировании упругопластических свойств металла используются численные методы. Наиболее распространен метод конечных элементов, который предлагает различные континуальные модели пластичности. При выборе нужной модели деформирования учитываются результаты экспериментальных испытаний, которые необходимы для определения физических констант материала.

В процессе моделирования упругопластических свойств материала необходимо разложить полную деформацию на две части: упругую и пластическую. Затем смоделировать поведение материала для каждой модели в отдельности [15].

При этом следует учитывать, что переход к пластической модели характеризуется следующими основными параметрами:

- условие появления пластических деформаций при сложном напряженном состоянии;
- зависимость развития пластических деформаций в исследуемом материале от изменения внешней нагрузки;
- связь между критерием пластичности и законом упрочнения материала.

Критерий текучести металла можно выразить некоторой зависимостью от тензора напряжений и механических характеристик:

$$f(\sigma, \xi) = 0, \quad (1)$$

где ξ — величина, зависящая от способа нагружения испытываемого образца и физических характеристик строения металла.

Зависимость (1) может быть применена для описания различных моделей пластичности. По форме она описывает поверхность в трехмерных координатах напряжений. Если исследуемое напряженное состояние принадлежит точке внутри поверхности текучести $f(\sigma, \xi) < 0$, значит, реализовано упругое состояние материала. Если точка, характеризующая напряженное состояние, находится на поверхности текучести, то в этом случае возникают пластические деформации.

Форма поверхности текучести должна изменяться так, чтобы точки, описывающие трехмерное напряженное состояние, находились внутри неё или на её поверхности.

Изменение пластических деформаций можно описать следующей зависимостью:

$$d\varepsilon^{pl} = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma}, \quad (2)$$

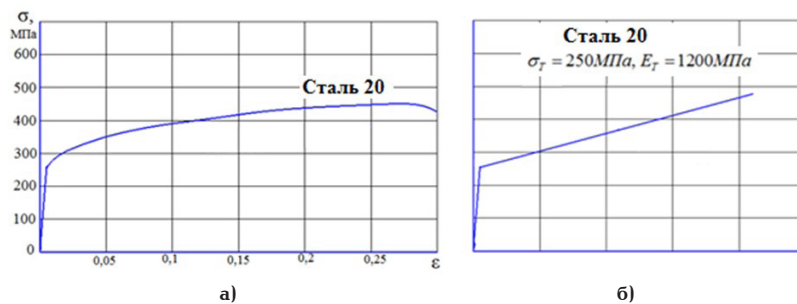


Рис. 3. Диаграммы деформирования металлов:
а) результаты испытаний образца на растяжение;
б) билинейная изотропная упругопластическая модель

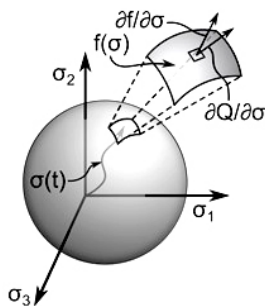


Рис. 4. Правило течения пластических деформаций

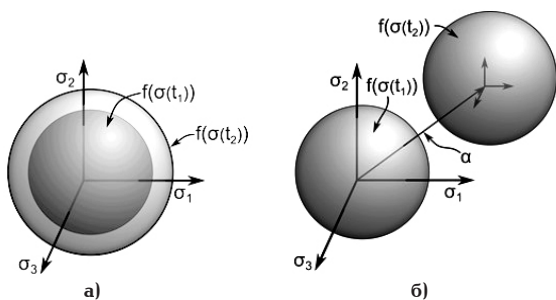


Рис. 5. Упрочнение поверхности текучести:
а) изотропное;
б) кинематическое

где d_λ — изменение пластической деформации от приращения напряжений;

Q — вектор изменения поверхности текучести.

В соответствии с уравнением (2), рост пластической деформации реализуется нормально существующей поверхности текучести (рис. 4).

После стадии упругих деформаций металла наступает стадия упрочнения металла, характеризующаяся повышением предела текучести. На практике для конструкционных материалов чаще применяются изотропное и кинематическое упрочнение. Уравнение (3) описывает изотропное упрочнение металла

$$F(\sigma) - \sigma_y(\xi) = 0, \quad (3)$$

где $F(\sigma)$ — функция напряжений.

Для изотропной модели упрочнения изменение нагрузок от состояния $\sigma(t_1)$ к состоянию $\sigma(t_2)$ приводит к повышению предела текучести и равномерному изменению поверхности текучести (рис. 5а).

Уравнение (4) описывает кинематическое упрочнение поверхности текучести

$$f(\sigma - \alpha, \xi) = 0, \quad (4)$$

где α — тензор обратных напряжений.

Тензор обратных напряжений определяет центр поверхности текучести, а изменение нагрузки от состояния $\sigma(t_1)$ к состоянию $\sigma(t_2)$ приводит к изменению обратных напряжений и смещению поверхности текучести (рис. 5б).

Программный комплекс ANSYS реализует три изотропных модели упрочнения: билинейную, полилинейную и нелинейную. В этих моделях используется критерий текучести Мизеса, который можно записать в следующем виде:

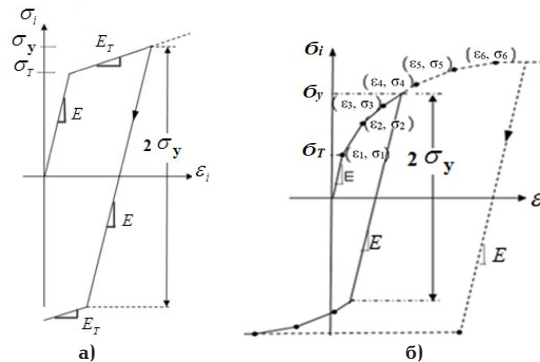


Рис. 6. Диаграмма $\sigma_i - \varepsilon_i$;
а) для билинейного изотропного упрочнения;
б) для полилинейного изотропного упрочнения

$$f(\sigma, \sigma_y) = \sigma_e - \sigma_T = 0, \quad (5)$$

где σ_e — эквивалентные напряжения Мизеса;

$$\sigma_T = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}, \quad (6)$$

где σ_T — предел текучести, полученный при одноосных испытаниях;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — напряжения на координатных площадках;

J_2 — второй инвариант девиатора напряжений.

В программе ANSYS пользователем задается диаграмма $\sigma_i - \varepsilon_i$ билинейного изотропного упрочнения (рис. 6а). Первый прямолинейный участок диаграммы задается модулем упругости применяемого металла E , который заканчивается при достижении эквивалентными напряжениями предела текучести $\sigma_e = \sigma_T$.

На втором прямолинейном участке развивается упругая и пластическая деформация и наклон прямой, определяемый характеристиками упрочнения металла, задается касательным модулем E_T .

Изотропное упрочнение можно также задать полилинейной диаграммой, на которой второй участок имеет кусочно-линейную форму, заданную табличным способом (рис. 6б).

На рис. 7 показаны результаты вычисления размеров и формы зоны пластической деформации в вершине трещины. Следует отметить, что в вершине трещины величины напряжений, определенные в упругопластической постановке задачи, кардинально отличаются от напряжений и деформаций для упругой задачи. Важным итогом такого анализа является определение размеров и формы зоны охрупчивания 1 в вершине трещины.

При исследовании зоны вершины трещины установлено, что при разгрузке твердого тела в упругопластической постановке напряжения (зона А) меняют знак и становятся сжимающими (зона Б) (рис. 8). Наличие такого эффекта позволило установить зависимость скорости роста трещины от разности растягивающих и сжимающих напряжений в вершине трещины в процессе нагружения и последующей разгрузки исследуемого тела [16].

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K_{\sigma_0})^m, \quad (7)$$

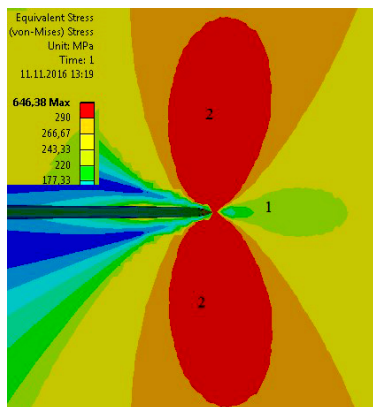


Рис. 7. Зоны деформаций в вершине трещины, сталь 20:
1 — зона охрупчивания материала;
2 — зона больших пластических деформаций

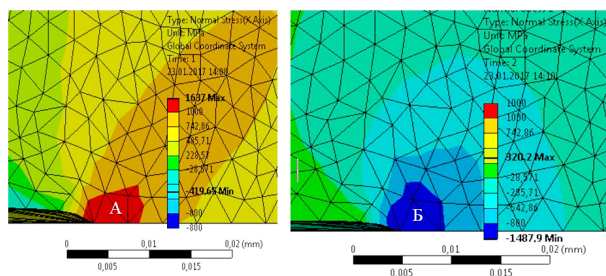


Рис. 8. Сталь 20. Поле нормальных напряжений σ_x в вершине трещины:
а) нагрузка $\sigma = 180$ МПа;
б) разгрузка $\sigma = 0$

где C_1 и n_1 — механические характеристики материала (константы).

В предложенной формуле (7) коэффициент изменения средних напряжений за цикл нагружения ΔK_{σ_0} зависит от разности средних напряжений за цикл нагружения $\Delta\sigma_0$ на расстоянии r впереди фронта трещины.

$$\Delta K_{\sigma_0} = \Delta\sigma_0 \sqrt{2\pi r}$$

Наряду с широко применяемым для исследования напряженно-деформированного состояния в вершине трещины программным обеспечением ANSYS современными учеными используются и другие языки программирования. Так, в статье [17] авторы предлагают автоматизированные программы с использованием приложения Abaqus / CAE, в которое встроена программа Python и интерпретатор API для линейно-упругого анализа трехмерных полуэллиптических трещин.

Заключение. В статье сделан анализ публикаций на тему исследования напряженно-деформированного состояния в вершине трещины с позиций механики разрушения. Рассмотрены варианты моделирования упругопластических свойств исследуемого материала в программе ANSYS Workbench. Предложен пример вычисления напряжений в вершине трещины для случая развития пластических деформаций при нагружении исследуемого тела и при его разгрузке. Установлено, что анализ пластических деформаций в вершине трещины позволяет определить её скорость роста в условиях реального напряженно-деформированного состоя-

Обозначение основных физических параметров

Символ	Физический параметр	Единица измерения
σ	Нормальное напряжение	Н/м ² (Па)
ϵ	Деформация	б/р
E	Модуль упругости	Н/м ² (Па)
ζ	Величина, зависящая от способа нагружения испытываемого образца и физических характеристик металла	Параметр задается инструментом ANSYS

ния в телах с трещинами. Такой подход позволяет решать задачи по оценке остаточного ресурса металлических конструкций, работающих в условиях циклических нагрузок.

Библиографический список

1. Покровский А. М., Дубовицкий Е. И. Применение метода сечений для определения коэффициента интенсивности напряжений по фронту полуэллиптической поперечной краевой трещины в растянутой полосе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 3 (87). С. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-3-1861.
2. Chahardehi A., Brennan F. P., Han S. K. Surface Crack Shape Evolution Modelling using an RMS SIF approach // International Journal of Fatigue. 2010. Vol. 32, Issue 2. P. 297–301.
3. Pham T. N., Rungamornrat J., Pansuk W. [et al.]. Analysis of Cracks in Isotropic Linear Elastic Half-space Under Various Boundary Conditions by Weakly Singular SGBEM. 2015. URL: http://www.i-asem.org/publication_conf/asem15/1.ISEM15/21/T3B.8.SM106_1772F1.pdf (дата обращения: 01.06.2020).
4. He M. Y., Hutchinson J. W. Surface crack subject to mixed mode loading // Engineering Fracture Mechanics. 2000. Vol. 65, № 1. P. 1–14. DOI: 10.1016/S0013-7944(99)00129-0.
5. Lee H. The 3D surface crack-front constraints in bimaterial joints // Nuclear Engineering and Design. 2003. № 226 (2). P. 107–118. DOI: 10.1016/S0029-5493(03)00188-2.
6. Ariatedja J. B., Mamat O. A Semi-elliptical Crack Modeling and Fracture Constraint on Failure Diagram // Journal of Applied Sciences. 2011. Vol. 11. P. 2006–2011. DOI: 10.3923/jas.2011.2006.2011.
7. Скворцов Ю. В., Глушков С. В. Моделирование несквозных поверхностных трещин в тонкостенных конструкциях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3 (27). С. 187–191. EDN: OWYQXP.
8. Гучинский Р. В., Петин С. В. Прогнозирование развития четвертьэллиптической трещины усталости с помощью конечно-элементного моделирования накопления повреждений // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8, № 7. С. 890–900. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-7-890-900.
9. Гучинский Р. В., Петин С. В. Численное моделирование распространения полуэллиптической трещины усталости на основании оценки накопления повреждений // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8, № 4. С. 376–385. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.4.32.
10. Mutava J., Muvengei O., Njoroge K. [et al.]. Solutions to Pressure Vessel Failures: A Review // International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). 2017. Vol. 6, Issue 2. P. 201–207.
11. Shlyannikov V., Zakharov A., Lyagova A. Surface and through thickness crack growth in cruciform specimens subjected

to biaxial loading // *Procedia Structural Integrity*. 2016. Vol. 2. P. 3248–3255. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.405.

12. Захаров А. П., Шлянников В. Н., Иштыряков И. С. Пластический коэффициент интенсивности напряжений в задачах механики разрушения // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2019. № 2. С. 100–115. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.08.

13. Shi K., Cai L., Chen L. [et al.] A theoretical model of semi-elliptic surface crack growth // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014. Vol. 27, no. 3. P. 730–734. DOI:10.1016/j.cja.2014.04.012.

14. Колмогоров В. Л., Богатов А. А., Мигачев Б. А. [и др.]. Пластичность и разрушение / под науч. ред. В. Л. Колмогорова. Москва: Металлургия, 1977. 336 с.

15. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1975. 399 с.

16. Вансович К. А. Упругопластическая модель роста усталостных поверхностных трещин в толстостенных конструкциях при двухосном нагружении // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2017. № 3. С. 1–16.

17. Sobotka J. C., McClung R. C. Automatic 3D Crack Placement using the Python API in Abaqus CAE. URL: https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/SIMULIA/Resources-center/PDF/2018-SAoE-Automatic_3D_Crack_Placement_using_the_Python_API_in_Abaqus_CAE.pdf (дата обращения: 01.06.2020).

ВАНСОВИЧ Константин Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5083-9579

AuthorID (РИНЦ): 685945

Адрес для переписки: vansovichka@mail.ru

ЯДРОВ Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент Военного учебного центра ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5500-7943

AuthorID (РИНЦ): 891137

Адрес для переписки: ja-vi@mail.ru

Для цитирования

Вансович К. А., Ядров В. И. Упругопластическое моделирование усталостных трещин // *Омский научный вестник*. 2024. № 1 (189). С. 20–27. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-20-27.

Статья поступила в редакцию 11.09.2023 г.

© К. А. Вансович, В. И. Ядров

ELASTOPLASTIC MODELING OF FATIGUE CRACKS

The presented work provides a detailed analysis of modern approaches to creating elastoplastic models of surface crack growth that take into account the influence of the type of biaxial loading on the development of stresses and strains at the crack tip and, accordingly, on the crack growth rate. The use of the plastic stress intensity factor as a characteristic of resistance to cyclic deformation and fracture for biaxial loading conditions is substantiated. Continuum plasticity models are proposed to simulate the elastoplastic behavior of metal using numerical methods and, in particular, the finite element method.

Keywords: fatigue failure, fracture mechanics, stress intensity coefficient, finite element method, J-integral, yield criterion, hardening.

References

1. Pokrovskiy A. M., Dubovitskiy E. I. Primeneniye metoda secheniy dlya opredeleniya koeffitsiyenta intensivnosti napryazheniy po frontu poluellipticheskoy poperechnoy krayevoy treshchiny v rastyanutoy polose [Sectioning method application to determine stress intensity factor along the front of a semi-elliptical transverse edge crack in a stretched flat bar] // *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. Engineering Journal: Science and Innovation*. 2019. No. 3 (87). P. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-3-1861. (In Russ.).
2. Chahardehi A., Brennan F. P., Han S. K. Surface Crack Shape Evolution Modelling using an RMS SIF approach // *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32, Issue 2. P. 297–301. (In Engl.).
3. Pham T. N., Rungamornrat J., Pansuk W. [et al.]. Analysis of Cracks in Isotropic Linear Elastic Half-space Under Various Boundary Conditions by Weakly Singular SGBEM. 2015. URL: http://www.i-asem.org/publication_conf/asem15/1.ISEM15/2t/T3B.8.SM106_1772F1.pdf (accessed: 01.06.2020). (In Engl.).
4. He M. Y., Hutchinson J. W. Surface crack subject to mixed mode loading // *Engineering Fracture Mechanics*. 2000. Vol. 65, no. 1. P. 1–14. DOI: 10.1016/S0013-7944(99)00129-0. (In Engl.).
5. Lee H. The 3D surface crack-front constraints in bimaterial joints // *Nuclear Engineering and Design*. 2003. No. 226 (2). P. 107–118. DOI: 10.1016/S0029-5493(03)00188-2. (In Engl.).
6. Ariatedja J. B., Mamat O. A Semi-elliptical Crack Modeling and Fracture Constraint on Failure Diagram // *Journal of Applied Sciences*. 2011. Vol. 11. P. 2006–2011. DOI:10.3923/jas.2011.2006.2011. (In Engl.).
7. Skvortsov Yu. V., Glushkov S. V. Modelirovaniye neskvoznykh poverkhnostnykh treshchin v tonkostennykh konstruksiyakh [Modeling non-through surface cracks in the thin-walled structures] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. Bulletin of Samara State Aerospace University*. 2011. No. 3 (27). P. 187–191. EDN: OWYQXP. (In Russ.).
8. Guchinskiy R. V., Petinov S. V. Prognozirovaniye razvitiya chetvert'ellipticheskoy treshchiny ustalosti s pomoshch'yu konechno-elementnogo modelirovaniya nakopleniya povrezhdeniy [Surface fatigue crack growth simulation based on the finite-element aided damage accumulation procedure] // *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: tekhnika i tekhnologii. Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology*. 2015. Vol. 8, no. 7. P. 890–900. DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-7-890-900. (In Russ.).
9. Guchinskiy R. V., Petinov S. V. Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya poluellipticheskoy treshchiny ustalosti na osnovanii otsenki nakopleniya povrezhdeniy [Numerical modeling of the semi-elliptical fatigue crack growth using damage accumulation approach] // *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. Computational Continuum Mechanics*. 2015. Vol. 8, no. 4. P. 376–385. DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.4.32. (In Russ.).
10. Mutava J., Muvengei O., Njoroge K. [et al.]. Solutions to Pressure Vessel Failures: A Review // *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*. 2017. Vol. 6, Issue 2. P. 201–207. (In Engl.).
11. Shlyannikov V., Zakharov A., Lyagova A. Surface and through thickness crack growth in cruciform specimens subjected to biaxial loading // *Procedia Structural Integrity*. 2016. Vol. 2. P. 3248–3255. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.405. (In Engl.).
12. Zakharov A. P., Shlyannikov V. N., Ishtyryakov I. S. Plasticheskiy koeffitsiyent intensivnosti napryazheniy v zadachakh mekhaniki razrusheniya [Plastic stress intensity factor in fracture mechanics] // *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019. No. 2. P. 100–115. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.2.08. (In Russ.).
13. Shi K., Cai L., Chen L. [et al.]. A theoretical model of semi-elliptical surface crack growth // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014. Vol. 27, no. 3. P. 730–734. DOI:10.1016/j.cja.2014.04.012. (In Engl.).
14. Kolmogorov V. L., Bogatov A. A., Migachev B. A. [et al.]. *Plastichnost' i razrusheniye [Plasticity and destruction]* / Ed. by V. L. Kolmogorova. Moscow, 1977. 336 p. (In Russ.).
15. Malinin N. N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep]*. 2nd ed., reprint. and additional. Moscow, 1975. 399 p. (In Russ.).
16. Vansovich K. A. Uprugoplasticheskaya model' rosta ustalostnykh poverkhnostnykh treshchin v tolstostennykh konstruksiyakh pri dvukhosnom nagruzhении [Elastic-plastic model of fatigue crack growth in the surface of thick-walled structures under biaxial loading] // *Engineering Journal: Science*

and Innovation. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2017. No. 3. P. 1–16. (In Russ.).

17. Sobotka J. C., McClung R. C. Automatic 3D Crack Placement using the Python API in Abaqus CAE. URL: https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/SIMULIA/Resources-center/PDF/2018-SAoE-Automatic_3D_Crack_Placement_using_the_Python_API_in_Abaqus_CAE.pdf (accessed: 01.06.2020). (In Engl.).

VANSOVICH Konstantin Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 5083-9579

AuthorID (RSCI): 685945

Correspondence address: vansovichka@mail.ru

YADROV Viktor Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Military Training Centre, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 5500-7943

AuthorID (RSCI): 891137

Correspondence address: ja-vi@mail.ru

For citations

Vansovich K. A., Yadrov V. I. Elastoplastic modeling of fatigue cracks // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 20–27. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-20-27.

Received September 11, 2023.

© K. A. Vansovich, V. I. Yadrov

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ В СЕТИ

Постановка задачи (актуальность работы): в статье обозначены основные преимущества использования сети для повышения качества процессов производства продукции машиностроения, что особенно актуально в условиях формирования технологического суверенитета.

Цель статьи заключается в систематизации и анализе моделей управления качеством продукции машиностроительной отрасли и разработке на их основе межотраслевой модели системы управления качеством в сети.

Используемые методы: в статье использованы общенаучные методы познания, а именно метод описания, обобщения, критического анализа, визуализации. В качестве теоретической базы исследования применялись теории процессного и сетевого управления в промышленном комплексе.

Новизна: обобщение и систематизация теоретических подходов к управлению качеством в машиностроении позволили спроектировать межотраслевую модель системы управления качеством в сети, использование которой даст возможность создать и укрепить технологический суверенитет.

В результате проведения исследования по анализу моделей управления качеством процесса производства были определены их отличительные характеристики применительно к сети, ядром которой является машиностроительное предприятие, что позволило разработать межотраслевую модель системы управления качеством, использование которой позволяет получать такие сетевые эффекты, как достижение интегрированной поддержки производства на всех этапах жизненного цикла; сокращение транзакционных издержек, повышение гибкости процессов проектирования и выпуска новых наукоемких и высокотехнологичных изделий, что дает возможность повысить уровень технологического суверенитета отрасли за счет усиления кооперационных связей.

Практическая значимость: содержащиеся в статье выводы и результаты могут быть использованы при разработке стратегий формирования и укрепления технологического суверенитета как в машиностроительной отрасли, так и в промышленном комплексе в целом.

Ключевые слова: управление качеством, сеть, отрасль машиностроения, процессный подход к управлению, цикл PDCA, система менеджмента качества, технологический суверенитет.

Введение. Нынешний этап развития машиностроительного комплекса характеризуется увеличением уровня сложности и наукоемкости. Кроме того, повышается значимость и актуальность такого важного элемента в среде взаимодействия машиностроительных предприятий, как рост их сложности, что обуславливается нарастанием кооперационных связей не только внутри отрасли, но и в смежных, межсекторальных областях, одной из которых является среда высших учебных заведений, выступающая, с одной стороны, как поставщик интеллектуальных активов в машиностроительный комплекс — кадров разного уровня для обеспечения производства требуемыми человеческими ресурсами, обладающих определенным набором знаний и компетенций; с другой стороны — как генератор

знаний и инноваций для инновационного развития отрасли в целом, а также ее отдельных предприятий и их цепочек поставок.

Обеспечение высокого уровня качества процессов производства и надежности функционирования машиностроительных предприятий является актуальной и значимой проблемой с научной и технической точек зрения. В современных условиях ведения производственно-хозяйственной деятельности, характеризующейся нарастанием экономической напряженности и необходимостью сохранения промышленной безопасности, обеспечения технологического суверенитета, стратегическая линия решения данных вопросов требует дальнейшего развития научных основ повышения эффективности процессов производства, повышения их качества, внедрения

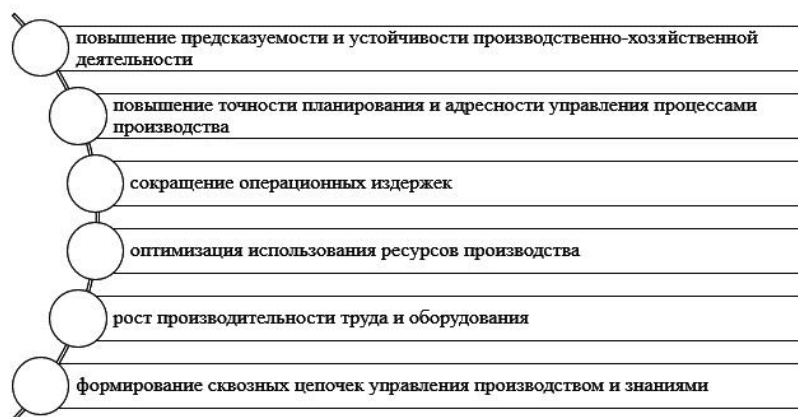


Рис. 1. Преимущества процессного подхода к управлению в сети

ния перспективных технологий проектирования и управления производством машиностроительной продукции на всех этапах ее жизненного цикла с использованием внутреннего потенциала отрасли не только силами и средствами машиностроительного комплекса, но и в сетях, формирующихся на их базе, включая высшие учебные заведения и другие промышленные предприятия.

В этой связи полагаем, что уместно говорить о проблематике оценки изучения специфики процессов управления в сети, одним из элементов которой является предприятие машиностроительной отрасли.

Постановка задачи. Основу управления качеством процессов производства продукции в сети «вуз – предприятия машиностроения» для обеспечения технологического суверенитета отрасли составляет государственный стандарт ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [1]. Его ключевым ядром к управлению качеством производства на отдельных предприятиях, а также в сети составляет процессный подход к управлению.

Целевой результат достигается эффективнее, когда производственной деятельностью и требуемыми для нее ресурсами управляют как процессом. Использование на промышленных предприятиях системы процессов вместе с их идентификацией и взаимодействием, а также управление процессами основаны на процессном подходе, который реализуется согласно стандартам серии ISO.

Цель статьи заключается в систематизации и анализе моделей управления качеством продукции машиностроительной отрасли и разработке на их основе межотраслевой модели системы управления качеством в сети. Исходя из цели, задачами статьи являются:

- 1) раскрыть преимущества процессного подхода к управлению в сети;
- 2) структурировать основные элементы управления качеством процесса производства в сети в отрасли машиностроения;
- 3) построить межотраслевую модель системы управления качеством в сети.

Теория. В современной отечественной научной литературе присутствует достаточное количество работ, подчеркивающих значимость и актуальность управления качеством процессов производства продукции машиностроения в сети: менеджмент качества и устойчивое развитие [2], быстрое реагирующее производство [3], моделирование производственных процессов [4], управление затратами в системе менеджмента качества [5], имитацион-



Рис. 2. Цикл PDCA в процессном подходе

ные модели [6], оптимизация производства [7], ресурсосберегающие технологии [8, 9], автоматизация и эффективность производства [10] и другие работы.

Основные преимущества процессного подхода к управлению сетью (в данном случае под сетью мы будем понимать совокупность предприятий и учреждений разной сферы деятельности, объединенных между собой по каналам потоков для достижения общей цели) можно свести к следующим положениям, состав которых отражен на рис. 1.

Ко всем процессам управления целесообразно применять цикл Шухарта – Деминга «Plan – Do – Check – Act» (PDCA), который включает следующие элементы, взаимосвязанные друг с другом:

- планирование (plan) — разработка целей и процессов, которые необходимы для достижения конечного результата;
- выполнение (do) — внедрение процессов в производство и управление;
- контроль (check) — непрерывный мониторинг и контроль процессов производства и установление на предмет оценки достижения результата;
- действие (act) — система непрерывного улучшения и постоянного совершенствования (рис. 2).

Согласно государственному стандарту в области менеджмента качества, модель системы менеджмента качества, основанную на процессном подходе, можно представить в виде блок-схемы, ключевой составляющей которой являются процессы, добавляющие ценность на основе взаимодей-

ствия материальных и информационных потоков с использованием цикла PDCA, что на выходе позволяет получать продукцию требуемого качества.

Результаты экспериментов. В условиях повышения значимости кооперационных связей промышленных предприятий с учреждениями образования и науки растет актуальность управления качеством сетей. Формирование сетей машиностроительных предприятий и высших учебных заведений имеет ряд стратегически значимых организационных, экономических и технико-технологических целей, направленных на поддержание технологического суверенитета, конкурентоспособности и эффективности машиностроительного комплекса. Среди них следует особо выделить следующие:

- развитие серии кооперационных связей и партнерских отношений науки и производства;
- укрепление позиций отечественных машиностроительных предприятий при формировании заказа на определенные научные исследования и разработки, реализацию инновационных проектов полного жизненного цикла, проведение инжиниринговых и проектно-изыскательных работ;
- развитие фундаментальной научно-исследовательской базы в приоритетных областях исследований и технологий в сфере машиностроения;
- организация системы мероприятий по кадровому обеспечению машиностроительного комплекса, в том числе профессиональная переподготовка, повышение квалификации кадрового состава машиностроительных предприятий.

Ключевой целью формирования сетей научно-образовательных организаций и машиностроительных предприятий является объединение данных организационных структур в целях повышения эффективности организации процессов проектирования и выпуска конкурентоспособной машино-

строительной продукции в современных макроэкономических реалиях, ориентируясь на сохранение и преумножение уровня технологического суверенитета отрасли. Тематически данная сеть ориентирована на организационно-технологические аспекты машиностроительного производства.

Среди основных задач сети научно-образовательных учреждений и предприятий машиностроения наиболее стратегически значимыми являются следующие:

- рост качества «жестких» и «мягких» компетенций кадров в сфере машиностроения;
- формирование каналов движения информационных и материальных потоков, связанных с обеспечением производственных процессов наукоемкими технологиями, инновационными проектами, проектами ресурсосбережения и ресурсоэффективности, которые обеспечивают сквозную интеграцию потоков создания стоимости на всех этапах жизненного цикла продукции машиностроительной отрасли;
- научно-техническая, инжиниринговая и кадровая поддержка в адаптации к переходу на выпуск импортозамещающей продукции в машиностроительном комплексе, на диверсификацию производства и рост его конкурентоспособности;
- подготовка кадров для машиностроительной отрасли.

Качество производственного процесса является одним из важнейших факторов, обеспечивающих конкурентоспособность предприятия и достижение технологического суверенитета отрасли в целом. В рамках системы менеджмента качества промышленное предприятие или сеть выполняют набор действий, целью которых является достижение состояния процессов и продукции соответствию государственным и международным стандартам, вклю-

Таблица 1

Основные элементы управления качеством процесса производства в сети в отрасли машиностроения

Элемент управления качеством процесса производства в сети	Характеристики элементов
Субъекты управления	Машиностроительное предприятие сети (ядро сети), вуз, научно-исследовательские организации, подрядчики, поставщики, инжиниринговые центры
Объекты управления стратегического уровня	Темпы роста производства, конкурентоспособность, наукоемкость, ресурсоэффективность, инновационный потенциал, стратегия промышленного развития
Объекты управления операционного уровня	Сырье, технология, инструменты, оборудование, логистика, рецептура, труд, система мониторинга
Стадии жизненного цикла продукции	Проектирование и производственный дизайн; разработка продукта и создание его опытного образца; подготовка к процессу производства; материально-техническое снабжение, заготовительные работы, тестирование; производство продукции; проведение испытательных работ и контрольных операций; упаковывание и обеспечение хранения; использование и утилизация (рециклинг)
Потоки процессов производства	Материальные (сырье, материалы, объекты интеллектуальной деятельности); информационные (заказы, результаты НИОКР); финансовые (оплата результатов НИОКР, расчеты с поставщиками и подрядчиками)
Модели оценки системы менеджмента качества	Модель всеобщего управления качеством процессов и выпускаемой продукции — TQM; модель быстрого реагирования (QR); локальные показатели системы менеджмента качества; система сбалансированных показателей; ключевые показатели эффективности производства
Результирующие индикаторы системы менеджмента качества	Рост добавленной стоимости; рост наукоемкости и технологичности производства; усиление кооперационных связей науки и производства; повышение уровня технологического суверенитета отрасли за счет усиления кооперационных связей
Эффекты сетевого взаимодействия	Интегрированная поддержка производства на всех этапах жизненного цикла; процессный подход к управлению; научно-технологическое и кадровое обеспечение производства; сокращение транзакционных издержек; повышение гибкости процессов проектирования и выпуска новых наукоемких и высокотехнологичных изделий

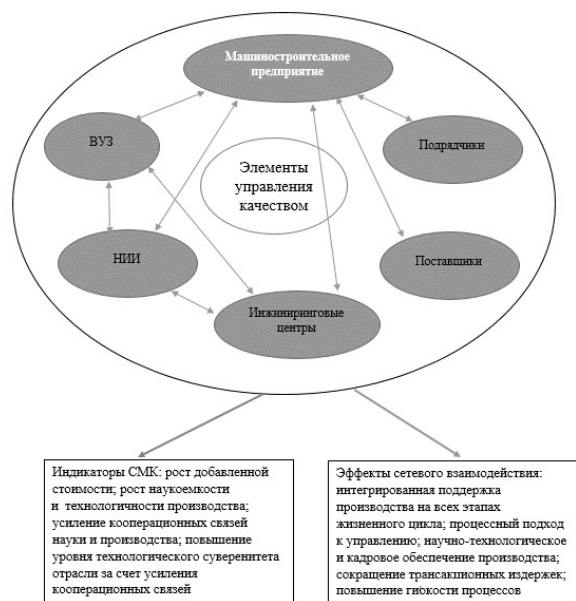


Рис. 3. Межотраслевая модель системы управления качеством в сети

чая качество сырья, технологического процесса, оборудования, рецептур, труда, транспортировки и хранения и т.п.

Система менеджмента качества распространяется на все этапы жизненного цикла выпускаемой продукции машиностроительного предприятия. Так, к процессу производства причисляются такие фазы жизненного цикла продукции, как:

- разработка продукта и создание его опытного образца;
- подготовка к процессу производства;
- материально-техническое снабжение, заготовительные работы, тестирование;
- производство продукции;
- проведение испытательных работ и контрольных операций;
- упаковывание и обеспечение хранения.

Каждая из указанных фаз жизненного цикла производства продукции вносит вклад в обеспечение требуемого уровня качества выпускаемой продукции на машиностроительных предприятиях.

Обсуждение экспериментов. Таким образом, можно выделить основные элементы управления качеством процесса производства в сети: субъекты, объекты управления стратегического и операционного уровня, стадии жизненного цикла продукции, потоки процессов производства, модели оценки системы менеджмента качества (табл. 1).

Структурирование элементов управления качеством процесса производства в сети в отрасли машиностроения позволило представить межотраслевую модель системы управления качеством, использование которой позволяет получать такие сетевые эффекты, как достижение интегрированной поддержки производства на всех этапах жизненного цикла; научно-технологическое и кадровое обеспечение производства; сокращение транзакционных издержек, связанных с поиском партнеров для реализации определенных процессов, в т.ч. снабжения, проведение научно-исследовательских работ, подбор кадров и т.п.; повышение гибкости процессов проектирования и выпуска новых наукоемких и высокотехнологичных изделий, что дает возмож-

ность повысить уровень технологического суверенитета отрасли за счет усиления кооперационных связей (рис. 3).

Заключение. Таким образом, в результате проведения исследования по анализу моделей управления качеством процесса производства были определены их отличительные характеристики применительно к сети, ядром которой является машиностроительное предприятие, что позволило разработать межотраслевую модель системы управления качеством, использование которой позволяет получать такие сетевые эффекты, как достижение интегрированной поддержки производства на всех этапах жизненного цикла; сокращение транзакционных издержек, повышение гибкости процессов проектирования и выпуска новых наукоемких и высокотехнологичных изделий, что дает возможность повысить уровень технологического суверенитета отрасли за счет усиления кооперационных связей.

Практическая значимость исследования заключается в том, что содержащиеся в статье выводы и результаты могут быть использованы при разработке стратегий формирования и укрепления технологического суверенитета как в машиностроительной отрасли, так и в промышленном комплексе в целом.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2015–11–01. Москва: Стандартинформ, 2015. 23 с.
2. Королева М. А. Система менеджмента качества как основа устойчивого развития // Газовая промышленность. 2021. № 2 (812). С. 117. EDN: BNTAHW.
3. Мамонов В. И., Полуэктов В. А., Якутин Е. М. Некоторые аспекты концепции быстро реагирующего производства // Сибирская финансовая школа. 2014. № 5 (106). С. 49–52. EDN: SZSKXZ.
4. Меркулов А. С., Николенко С. Д., Сазонов С. А. Моделирование процессов, влияющих на качество бетонных покрытий дорог // Моделирование систем и процессов. 2021. Т. 14, № 1. С. 38–44. DOI: 10.12737/2219-0767-2021-14-1-38-44. EDN: EWOPLA.
5. Пономарева М. А. Система менеджмента качества на предприятии — эффективное управление затратами // Самоуправление. 2020. № 3 (120). С. 353–357. EDN: UCCYH.
6. Попова Д. Д., Попов Д. А., Самойленко Н. А. Исследование влияния параметров сеточной модели и модели турбулентности на качество моделирования аэродинамических процессов в области радиального зазора рабочих лопаток турбины // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2021. № 66. С. 67–78. DOI: 10.15593/2224-9982/2021.66.07. EDN: WZFDIT.
7. Соловьева И. П., Асаева Т. А., Игнатъев А. И. Организационные основы оптимизации затрат промышленных предприятий // Экономика и управление в машиностроении. 2012. № 3. С. 47–50. EDN: PWBJLV.
8. Кудрявцева С. С., Шинкевич М. В. Оценка эффективности ресурсосберегающих технологий в машиностроительной промышленности // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 14–20. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-14-20. EDN: ZPXSER.
9. Краснова О. М., Кудрявцева С. С. Транспортный комплекс в экономике Республики Татарстан // Экономический вестник Республики Татарстан. 2014. № 1. С. 27–37. EDN: RYIJDX.

10. Шинкевич А. И., Барсегян Н. В. Пути повышения эффективности организации производственных процессов на нефтехимических предприятиях за счёт применения систем автоматизации // Русский инженер. 2019. № 4 (65). С. 48–51. EDN: BXIVBC.

ДЕНИСОВА Яна Владимировна, кандидат экономических наук, доцент кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества Казанского национального исследовательского технологического университета, г. Казань.
SPIN-код: 3706-5320

AuthorID (РИНЦ): 973897
ORCID: 0000-0003-1242-6909
Адрес для переписки: yana-denisova@inbox.ru

Для цитирования

Денисова Я. В. Управление качеством процессов производства продукции машиностроения в сети // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-28-34.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023 г.
© Я. В. Денисова

QUALITY MANAGEMENT OF PRODUCTION PROCESSES OF ENGINEERING PRODUCTS IN THE NETWORK

Statement of the problem (relevance of the work): the article outlines the main advantages of using the network to improve the quality of the production processes of engineering products, which is especially important in the context of the formation of technological sovereignty. **The purpose of the work:** the purpose of the article is to systematize and analyze the models of product quality management in the engineering industry and develop, on their basis, an intersectoral model of a quality management system in a network.

Methods used: the article uses general scientific methods of cognition, namely, the method of description, generalization, critical analysis, visualization. As a theoretical basis for the study, theories of process and network management in the industrial complex are used.

Novelty: generalization and systematization of theoretical approaches to quality management in mechanical engineering made it possible to design an intersectoral model of a quality management system in a network, the use of which will make it possible to create and strengthen technological sovereignty.

Result: as a result of a study on the analysis of quality management models of the production process, their distinctive characteristics are determined in relation to the network, the core of which is a machine-building enterprise, which made it possible to develop an intersectoral model of a quality management system, the use of which allows obtaining such network effects as the achievement of integrated production support at all stages of the life cycle; reducing transaction costs, increasing the flexibility of the design and production of new science-intensive and high-tech products, which makes it possible to increase the level of technological sovereignty of the industry by strengthening cooperation ties.

Practical significance: the conclusions and results contained in the article can be used in the development of strategies for the formation and strengthening of technological sovereignty both in the machine-building industry and in the industrial complex as a whole.

Keywords: quality management, network, engineering industry, process approach to management, PDCA cycle, quality management system, technological sovereignty.

References

1. GOST R ISO 9001-2015. Sistemy Menedzhmenta Kachestva. Trebovaniya. [Quality Management Systems. Requirements]. Moscow, 2015. 23 p. (In Russ.).
2. Koroleva M. A. Sistema menedzhmenta kachestva kak osnova ustoychivogo razvitiya [Quality management system as the basis of sustainable development] // *Gazovaya Promyshlennost'. GAS Industry of Russia*. 2021. No. 2 (812). P. 117. EDN: BNTAHW. (In Russ.).
3. Mamonov V. I., Poluektov V. A., Yakutin E. M. Nekotoryye aspekty kontseptsii bystroreagiruyushchego proizvodstva [Some elements of quick response manufacturing conception] // *Sibirskaya Finansovaya Shkola. Sibirskaya Finansovaya Shkola*. 2014. No. 5 (106). P. 49–52. EDN: SZSKXZ. (In Russ.).
4. Merkulov A. S., Nikolenko S. D., Sazonov S. A. Modelirovaniye protsessov, vliyayushchikh na kachestvo betonnykh pokrytiy dorog [Modeling of processes affecting the quality of concrete road surfaces] // *Modelirovaniye Sistem i Protessov. Modeling of Systems and Processes*. 2021. Vol. 14, no. 1. P. 38–44. DOI: 10.12737/2219-0767-2021-14-1-38-44. EDN: EWOPLA. (In Russ.).
5. Ponomareva M. A. Sistema menedzhmenta kachestva na predpriyatii — effektivnoye upravleniye zatratami [Quality management system at the enterprise — effective cost management] // *Samoupravleniye. Samoupravlenie*. 2020. No. 3 (120). P. 353–357. EDN: IJCCYH. (In Russ.).
6. Popova D. D., Popov D. A., Samoylenko N. A. Issledovaniye vliyaniya parametrov setochnoy modeli i modeli turbulentsnosti na kachestvo modelirovaniya aerodinamicheskikh protsessov v oblasti radial'nogo zazora rabochikh lopatok turbiny [Investigation of the grid model and turbulence model parameters influence on quality of turbine rotor blade tip clearance area aerodynamic processes modeling] // *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politehnicheskogo Universiteta. Aerokosmicheskaya Tekhnika. Bulletin of Perm State Technical University. Aerospace Engineering*. 2021. No. 66. P. 67–78. DOI: 10.15593/2224-9982/2021.66.07. EDN: WZFDIT. (In Russ.).
7. Solov'yeva I. P., Asayeva T. A., Ignat'yev A. I. Organizatsionnyye osnovy optimizatsii zatrat promyshlennykh

predpriyatiy [Organizational basis for cost optimization of industrial enterprises] // *Ekonomika i upravleniye v Mashinostroyenii. Ekonomika i Upravlenie v Mashinostroyenii*. 2012. No. 3. P. 47–50. EDN: PWBJLV. (In Russ.).

8. Kudryavtseva S. S., Shinkevich M. V. Otsenka effektivnosti resursoberegayushchikh tekhnologiy v mashinostroitel'noy promyshlennosti [Evaluation of effectiveness of resource-saving technologies in machine-building industry] // *Omskiy Nauchnyy Vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2020. No. 3 (171). P. 14–20. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-14-20. EDN: ZPXSER. (In Russ.).

9. Krasnova O. M., Kudryavtseva S. S. Transportnyy kompleks v ekonomike Respubliki Tatarstan [Transport complex in economy in the Republic of Tatarstan] // *Ekonomicheskiy Vestnik Respubliki Tatarstan. Economic Bulletin of the Republic of Tatarstan*. 2014. No. 1. P. 27–37. EDN: RYJDX. (In Russ.).

10. Shinkevich A. I., Barsegyan N. V. Puti povysheniya effektivnosti organizatsii proizvodstvennykh protsessov na neftekhimicheskikh predpriyatiyakh za schet primeneniya sistem avtomatizatsii [Ways to improve the organization of production processes in the petrochemical industry through the application of automation systems] // *Russkiy Inzhener. Russian Engineer*. 2019. No. 4 (65). P. 48–51. EDN: BXIVBC. (In Russ.).

DENISOVA Yana Vladimirovna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management Department, Kazan National Research Technological University, Kazan.

SPIN-code: 3706-5320

AuthorID (RSCI): 973897

ORCID: 0000-0003-1242-6909

Correspondence address: yana-denisova@inbox.ru

For citations

Denisova Ya. V. Quality management of production processes of engineering products in the network // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-28-34.

Received July 17, 2023.

© Ya. V. Denisova

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В АТМОСФЕРЕ АРГОНА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ТИТАНОВОЙ ФОЛЬГИ

Методами оптической микроскопии, энергодисперсионного анализа исследована структура и элементный состав титановой фольги, прошедшей отжиг в инертной атмосфере в присутствии углеводородов. Проведенные термические обработки моделировали процесс синтеза многостенных углеродных нанотрубок. В результате обработок существенно снижается пластичность исследуемого материала. Показано, что в результате отжига изменяется структура фольги. С увеличением температуры отжига наблюдается рост концентраций углерода и кислорода, а также существенно увеличивается твердость материала, что, вероятно, связано с формированием в структуре фольги оксида титана и карбида титана.

Ключевые слова: титан, термическая обработка, оптическая микроскопия, энергодисперсионный анализ, механические свойства.

В настоящее время весьма активно развивается отрасль литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов [1, 2]. Перспективным направлением развития отрасли химических источников тока является разработка гибких устройств накопления энергии [3]. В качестве электродного материала зачастую используются углеродные наноматериалы, например, многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), которые обеспечивают высокие значения электрической проводимости и удельной площади поверхности [4]. Применение титановой фольги в качестве основы для создания электродов суперконденсаторов обусловлено электрохимической стабильностью, стойкостью к коррозии, а также высокой электрической проводимостью титана [5]. К проблемам создания гибких электродов суперконденсаторов можно отнести слабую адгезию электродного материала к подложке, что приводит к разрушению электродов при деформациях. Одним из вариантов решения этой проблемы является синтез углеродных материалов непосредственно на электроде. Такая конфигурация электрода позволит создавать гибкие устройства с низким электрическим сопротивлением и развитой поверхностью, что обеспечивает высокие емкостные свойства готовых устройств. Одним из наиболее часто используемых способов получения МУНТ является

метод CVD (chemical vapor deposition). Данный метод синтеза основан на пиролизе углеводородов в присутствии катализаторов роста. При таком методе синтеза титановая основа подвергается нагреву до 900 °С в атмосфере, насыщенной углеводородами [6]. Подобные режимы термической обработки титановых сплавов в литературе описаны недостаточно и требуют дополнительных исследований. Целью данной работы является исследование структурных характеристик титановой фольги после температурных обработок в среде, насыщенной углеводородами.

Методика эксперимента. Объектом исследования в работе являлась фольга из технической чистого титана марки ВТ1-0, толщиной 50 мкм. Термическая обработка образцов проводилась в трубчатой печи при температурах 700, 750, 800, 850, 900 °С, время выдержки составляло 30 минут. Процесс проходил следующим образом: в зону печи помещались образцы титановой фольги, после чего проводилась откачка рабочего объема до остаточного давления 20 Па с последующим заполнением рабочего объема камеры аргоном высокой чистоты до атмосферного давления. Нагрев образцов проходил совместно с печью со скоростью 30 К/мин. После выхода печи на рабочую температуру в объем камеры подавался ацетонитрил (CH_3CN) в качестве углеводород-

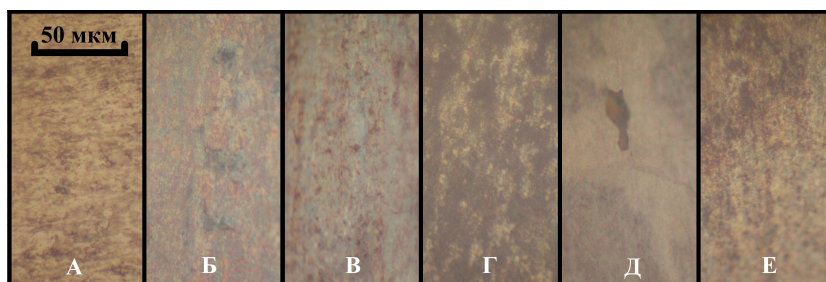


Рис. 1. Поверхность титановой фольги до и после отжига в среде ацетонитрила:

А — до отжига; Б — температура отжига 700 °С;
 В — температура отжига 750 °С; Г — температура отжига 800 °С;
 Д — температура отжига 850 °С; Е — температура отжига 900 °С

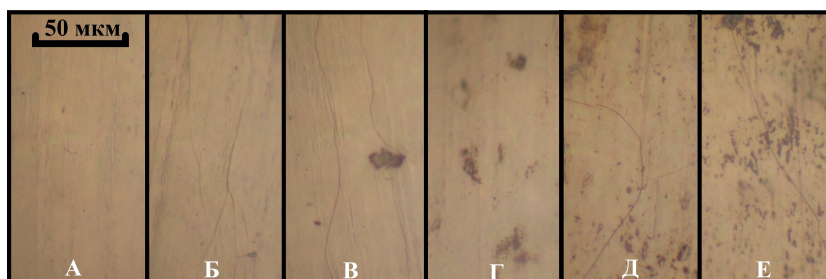


Рис. 2. Структура титановой фольги до и после отжига в среде ацетонитрила:

А — до отжига; Б — температура отжига 700 °С; В — температура отжига 750 °С;
 Г — температура отжига 800 °С; Д — температура отжига 850 °С;
 Е — температура отжига 900 °С

ного сырья со скоростью 50 мл/мин. Охлаждение до комнатной температуры проводилось с печью. Данный режим термообработки позволяет экспериментально смоделировать условия, возникающие при синтезе углеродных нанотрубок.

Удаление приповерхностных окисленных слоев образцов проводилось методом ионной полировки поверхности ионами аргона (Ar^+) с ускоряющим напряжением 5 кВ и током ионов 2 мА в течение трех часов.

Изменение структуры и элементного состава титановой фольги в результате термической обработки исследовалось методами оптической микроскопии на микроскопе Альтами МЕТ-3С. Исследование элементного состава образцов проводилось методом энергодисперсионного анализа (ЭДА), реализованным в растровом электронном микроскопе Jeol JSM-5700, оснащенный энергодисперсионным анализатором jed-2300 (Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск). Глубина поверхностного слоя, анализируемого методом энергодисперсионного анализа (ЭДА) для исследуемых сплавов составляет ~ 0,5 мкм. Изменение твердости образцов в результате термической обработки определялось по методу Викерса на микротвердомере Shimadzu HNV-2 при нагрузке на индентор 245,2 мН.

Экспериментальные результаты. При отжиге в воздушной среде при указанных температурах протекают процессы рекристаллизации и восстановления равноосной структуры титана после проката. Помимо рекристаллизации на поверхности титановой фольги формируется оксидная пленка, защищающая от проникновения газов в структуру материала. При этом термообработка титана и его сплавов в воздушной среде не должна оказывать негативных последствий на эксплуатационные свойства материала, в частности на пластичность

[7, 8]. Однако в результате проведенных в работе термических обработок наблюдается существенное ухудшение пластичности и охрупчивание фольги.

На рис. 1 представлены микрофотографии титановой фольги при различных режимах термической обработки. Из полученных результатов видно, что в результате отжига на поверхности образцов формируются множественные очаги коррозии и включения карбида титана (TiC), маскирующие поверхность титановой фольги. Видно, что с увеличением температуры отжига несколько изменяется цвет поверхности, что может быть обусловлено различной толщиной оксидной пленки на поверхности образцов. Формирование оксидной пленки не позволяет оценить изменение структуры фольги после различных режимов отжига.

Для исследования изменения структуры титановой фольги в результате термической обработки поверхность образцов полировалась пучком ионов аргона для удаления окисленного слоя (рис. 2). На изображениях оптической микроскопии титановой фольги до термообработок (рис. 2А) не наблюдается зерен α -фазы титана, что может быть связано с наличием субмикронных зерен, не разрешающихся в оптической микроскопии. Такая структура может быть сформирована в результате высокой степени деформации при холодной прокатке [9].

На рис. 2 видно, что в результате термических обработок формируются нитевидные структуры, напоминающие границы зерен, преимущественно вдоль направления проката. При этом непосредственно равноосной зеренной структуры, характерной для титана и α -титановых сплавов после отжига, не наблюдается [10]. Так же на изображениях включения, предположительно оксида титана и карбида титана. С увеличением температуры количество включений и их размеры увеличиваются (рис. 2В – Е).

Таблица 1

Данные количественного элементного состава титановой фольги до и после различных режимов отжига. Все результаты в весовых процентах

Образец	[C]	[O]	[Ti]
Исходный	2,02	2,18	95,8
Отжиг 700 °С	3,05	6,4	90,55
Отжиг 900 °С	5,11	11,9	82,99

Таблица 2

Результаты измерения твердости

Образец	Исходный	700 °С	750 °С	800 °С	850 °С	900 °С
Твердость, HV	286	445	499	833	916	1112

Проведенные исследования методом энергодисперсионного анализа показали изменения в элементном составе титановой фольги при увеличении температуры отжига (табл. 1).

Данные элементного анализа указывают на увеличение концентрации кислорода и углерода после отжига. Полученный результат коррелирует с данными микроскопии. Увеличение концентрации кислорода в составе образцов обусловлено присутствием остаточной атмосферы при вакуумировании и, вероятно, образованием оксида титана и карбида титана в результате отжигов.

Отжиги оказывают существенное влияние на структуру и элементный состав титановой фольги, что сказывается и на механических свойствах исследуемых образцов. Проведенные исследования твердости титановой фольги (табл. 2) показали, что с увеличением температуры отжига наблюдается увеличение твердости титановой фольги.

Исходя из полученных данных, твердость титановой фольги после отжигов увеличивается более чем в три раза, при этом существенно снижается пластичность.

Обсуждение. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. В результате отжигов в инертной среде в присутствии углеводородов происходит насыщение поверхности фольги как углеродом, так и кислородом. На это указывают изображения, полученные методом оптической микроскопии, а также данные ЭДА анализа. Особенностью проведения операций отжига титана в присутствии малых концентраций кислорода является невозможность формирования сплошной пленки оксида титана, пассивирующей поверхность и предотвращающей диффузию кислорода и в глубь материала. В результате в течение отжига формируются окисленные газонасыщенные слои с высоким содержанием кислорода (до 14 % в α -фазе титана) [11]. В работе термическая обработка проводилась в среде аргона в присутствии ацетонитрила. При этом в печи при данных температурах происходит пиролиз ацетонитрила с выделением цианистого водорода (HCN), метана (CH₄) и цианометила (C₂H₅NCN) [12], а также кислорода, входящего в состав остаточной атмосферы после вакуумирования; следует ожидать, что приповерхностные слои также насыщаются водородом. Авторы работ [13, 14] указывают на возможность формирования карбида

титана при термической обработке титана в непосредственном взаимодействии с источником углерода. Условия проведения отжига в данной работе, а именно температура и углеродная среда также способствуют науглероживанию поверхности образца и формированию карбида титана в структуре фольги. При этом результаты ЭДА анализа указывают на увеличение концентрации углерода и кислорода с увеличением температуры отжига, в то же время на изображениях оптической микроскопии также наблюдается увеличение количества включений в структуре титана. Вероятно, в структуре титана в процессе отжига происходит формирование оксидов и карбидов титана. Также увеличение содержания карбида и оксида титана в структуре фольги приводит к росту твердости материала, однако это существенно снижает эксплуатационные свойства титановой фольги в качестве электродов суперконденсаторов, поскольку снижает пластичность материала.

Заключение. Проведенные в работе исследования показали существенные структурные изменения титановой фольги в результате отжига в инертной атмосфере в присутствии углеводородов. Рост концентраций кислорода и углерода в образцах после отжига и анализ литературных источников позволяют предположить формирование включений оксида титана и карбида титана в структуре титановой фольги. С увеличением температуры отжига количество включений увеличивается. Структурные изменения сопровождаются существенным ростом твердости фольги. Поскольку режимы термической обработки и состав рабочей атмосферы подбирались с учетом возможного синтеза слоя углеродных нанотрубок на поверхности фольги, наиболее предпочтительным режимом синтеза вертикально ориентированных углеродных нанотрубок на поверхности титановой фольги является пиролиз при 700 °С, поскольку позволяет сохранить удовлетворительные эксплуатационные свойства титановой основы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках программы «Приоритет 2030». В работе использовано оборудование научно-образовательного ресурсного центра ОмГТУ «Нанотехнологии».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

1. Михеев К. Г., Сюгаев А. В., Зонов Р. Г. [и др.]. Лазерно-индуцированный графен и его модификация полипирролом для увеличения емкости микросуперконденсатора // Физика твердого тела. 2023. Т. 65, № 2. С. 353–360. DOI: 10.21883/FTT.2023.02.54313.529.
2. Muzaffar A., Ahamed M. B., Deshmukh K. [et al.]. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 101. P. 123–145. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.026.
3. Palchoudhury S., Ramasamy K., Ram K. Gupta [et al.]. Flexible Supercapacitors: A Materials Perspective // Frontiers in Materials. 2019. Vol. 5. 83. DOI: 10.3389/fmats.2018.00083.
4. Лобов И. А., Давлеткильдеев Н. А., Несов С. Н. [et al.]. Структура межфазной границы полианилин-углеродная нанотрубка // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48, № 12. С. 7–10. DOI: 10.21883/PJTF.2022.12.52670.19193.
5. Lu X., Li F., Steimecke M. [et al.]. Titanium as a Substrate for Three-Dimensional Hybrid Electrodes for Vanadium Redox Flow Battery Applications // ChemElectroChem. 2020. Vol. 7. P. 737–744. DOI: 10.1002/celec.201901896.
6. Szaby A., Andricevic P., Pбра Z. [et al.]. Growth of CNT Forests on Titanium Based Layers, Detailed Study of Catalysts // Frontiers in Materials. 2018. Vol. 6. 593. DOI: 10.3389/fchem.2018.00593.
7. Казаченко М. С., Панин А. В., Иванов Ю. Ф. [и др.]. Влияние термического отжига на механическое поведение технического титана ВТ1-0, имеющего субмикроструктурную структуру в поверхностном слое или в объеме материала // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 4. С. 37–47.
8. Спивак Л. В., Щепина Н. Е. Особенности полиморфного превращения в титане // Журнал технической физики. 2021. Т. 91, № 8. С. 1233–1238. DOI: 10.21883/JTF.2021.08.51096.53-21s.
9. Лопатин Н. В., Дьяконов Г. С., Жеребцов С. В. [и др.]. Структура и механические свойства наноструктурного листа из титана ВТ1-0, полученного холодной прокаткой // Научные ведомости. Серия: Математика. Физика. 2010. Т. 82, № 11. С. 69–77.
10. Грязнов М. Ю., Шотин С. В., Чувиладель В. Н. [и др.]. Улучшение физико-механических характеристик нелегированного титана ВТ1-0 и исследование влияния на них режимов селективного лазерного сплавления // Журнал технической физики. 2023. Т. 93, № 2. С. 241–248. DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54499.209-22.
11. Булков А. Б., Пешков В. В., Селиванов В. Ф. [и др.]. Кинетика роста газонасыщенных (охрупченных) слоев на титане при вакуумном отжиге // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16, № 2. С. 142–148. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.2.019.
12. Youngprasert B., Poochinda K., Ngamprasertsith S. Treatment of Acetonitrile by Catalytic Supercritical Water Oxidation in Compact-Sized Reactor // J. Water Resource and Protection. 2010. Vol. 2. P. 222–226. DOI: 10.4236/jwarp.2010.23025.
13. Tan Y., Xu L., Xu Z. [et al.]. Effects of Ti foil thickness on microstructures and mechanical properties of in situ synthesized micro-laminated TiC/Ti composites // Materials Science & Engineering A. 2019. Vol. 767. 138296. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138296.
14. Wang N., Choi Y., Oue K. [et al.]. Fabrication of in-situ rod-like TiC particles dispersed Ti matrix composite using graphite power sheet // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. 19154. DOI: 10.1038/s41598-022-23796-4.

КНЯЗЕВ Егор Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник Омского научного центра СО РАН, г. Омск; доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2980-1947

AuthorID (РИНЦ): 666119

ORCID: 0000-0001-6450-5364

AuthorID (SCOPUS): 55657278600

ResearcherID: AAU-4486-2020

Адрес для переписки: knyazevyegor@mail.ru

БАДАМШИН Артем Маратович, старший преподаватель кафедры «Машиностроение и материаловедение» Машиностроительного института ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3531-5945

AuthorID (РИНЦ): 1032513

AuthorID (SCOPUS): 57211271253

ResearcherID: AAA-3846-2019

Адрес для переписки: artembadamschin@mail.ru

СТЕНЬКИН Юрий Алексеевич, кандидат химических наук, научный сотрудник Омского научного центра СО РАН, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 150801

ORCID: 0000-0003-0840-9137

AuthorID (SCOPUS): 19639375100

ResearcherID: AAN-1001-2021

Адрес для переписки: sten@obisp.oscsbras.ru

РОГАЧЕВ Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), директор научно-образовательного ресурсного центра нанотехнологий «Наноцентр», доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1373-4622

AuthorID (РИНЦ): 670217

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

Адрес для переписки: evg.rogachev@yandex.ru

Для цитирования

Князев Е. В., Бадамшин А. М., Стенькин Ю. А., Рогачев Е. А. Исследование влияния термической обработки в атмосфере аргона на физико-химическое состояние титановой фольги // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 35–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-35-40.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.

© Е. В. Князев, А. М. Бадамшин,

Ю. А. Стенькин, Е. А. Рогачев

THE ANALYSIS OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT IN VARIOUS ATMOSPHERES ON THE STRUCTURE OF TITANIUM FOIL

The structure and elemental composition of titanium foil annealed in an inert ambient in the presence of hydrocarbons are studied by optical microscopy and scanning electron microscopy. The heat treatments carried out are simulated the synthesis process of multi-walled carbon nanotubes. As a result of the treatments, the plasticity of the material under study is significantly reduced. It is shown that the structure of the foil changes as a result of annealing. With an increase in the annealing temperature, an increase in carbon and oxygen concentrations is observed, and the hardness of the material increases significantly, which is probably due to the formation of titanium oxide and titanium carbide in the foil structure.

Keywords: titanium, heat treatment, optical microscopy, energy dispersion analysis, mechanical properties.

Acknowledgments

The work is carried out within the framework of the «Priority 2030» program. The equipment of the Scientific and Educational Resource Centre of Omsk State Technical University «Nanotechnologies» is used in the work.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

1. Mikheyev K. G., Syugayev A. V., Zonov R. G. [et al.]. Lazerno-indutsirovanny grafen i ego modifikatsiya polipirrolom dlya uvelicheniya emkosti mikrosuperkondensatora [Laser-induced graphene and its modification with polypyrrole for increasing microsupercapacitor capacitance] // Fizika tverdogo tela. *Physics of the Solid State*. 2023. Vol. 65, no. 2. P. 347–354. DOI: 10.21883/FTT.2023.02.54313.529. (In Russ.).
2. Muzaffar A., Ahamed M. B., Deshmukh K. [et al.]. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 101. P. 123–145. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.026. (In Engl.).
3. Palchoudhury S., Ramasamy K., Ram K. Gupta [et al.]. Flexible Supercapacitors: A Materials Perspective // Frontiers in Materials. 2019. Vol. 5. 83. DOI: 10.3389/fmats.2018.00083. (In Engl.).
4. Lobov I. A., Davletkil'deyev N. A., Nesov S. N. [et al.]. Struktura mezhfaznoy granitsy polianilin-uglerodnaya nanotrubka [Structure of the polyaniline-carbon nanotube interface] // Pis'ma v ZhTF. *Technical Physics Letters*. 2022. Vol. 48, no. 12. P. 7–10. DOI: 10.21883/PJTF.2022.12.52670.19193. (In Russ.).
5. Lu X., Li F., Steimecke M. [et al.]. Titanium as a Substrate for Three-Dimensional Hybrid Electrodes for Vanadium Redox Flow Battery Applications // ChemElectroChem. 2020. Vol. 7. P. 737–744. DOI: 10.1002/celc.201901896. (In Engl.).
6. Szabó A., Andricevic P., Pápa Z. [et al.]. Growth of CNT Forests on Titanium Based Layers, Detailed Study of Catalysts // Frontiers in Materials. 2018. Vol. 6. 593. DOI: 10.3389/fchem.2018.00593. (In Engl.).
7. Kazachenok M. S., Panin A. V., Ivanov Yu. F. [i dr.]. Vliyaniye termicheskogo otzhiga na mekhanicheskoye povedeniye tekhnicheskogo titana VT1-0, imeyushchego submikrokristallicheskuyu strukturu v poverkhnostnom sloye ili v ob'yeme materiala [Effect of thermal annealing on the mechanical behavior on commercial titanium VT1-0 with submicrocrystalline structure in the surface layer or material bulk] // Fizicheskaya mezomekhanika. *Physical Mesomechanics*. 2005. Vol. 8, no. 4. P. 37–47. (In Russ.).
8. Spivak L. V., Shchepina N. E. Osobennosti polimorfnoy prevrashcheniya v titane [Features of polymorphic transformation in titanium] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. *Technical Physics*. 2021. Vol. 91, no. 8. P. 1233–1238. DOI: 10.21883/JTF.2021.08.51096.53-21s. (In Russ.).

9. Lopatin N. V., D'yakonov G. S., Zherebtsov S. V. [et al.]. Struktura i mekhanicheskiye svoystva nanostrukturnogo lista iz titana VT1-0, poluchennogo kholodnoy prokatkoy [Structure and mechanical properties of nanostructured sheet of titanium VT1-0 produced by cold rolling] // Nauchnyye vedomosti. Seriya Matematika. Fizika. *Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics.* 2010. Vol. 82, no. 11. P. 69–77. (In Russ.).

10. Gryaznov M. Yu., Shotin S. V., Chuvil'deyev V. N. [et al.]. Uluchsheniye fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik nelegirovannogo titana VT1-0 i issledovaniye vliyaniya na nikh rezhimov selektivnogo lazernogo splavljeniya [Improving the physical and mechanical characteristics of unalloyed titanium VT1-0 and studying the effect of selective laser melting parameters] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. *Technical Physics.* 2023. Vol. 93, no. 2. P. 241–248. DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54499.209-22. (In Russ.).

11. Bulkov A. B., Peshkov V. V., Selivanov V. F. [et al.]. Kinetika rosta gazonasyschennykh (okhrupchennykh) slojev na titane pri vakuumnom otzhige [Kinetics of growth of gas-saturated (embroken) layers on titanium at vacuum annealing] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Bulletin of Voronezh State Technical University.* 2020. Vol. 16, no. 2. P. 142–148. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.2.019. (In Russ.).

12. Youngprasert B., Poochinda K., Ngamprasertsith S. Treatment of Acetonitrile by Catalytic Supercritical Water Oxidation in Compact-Sized Reactor // *J. Water Resource and Protection.* 2010. Vol. 2. P. 222–226. DOI: 10.4236/jwarp.2010.23025. (In Engl.).

13. Tan Y., Xu L., Xu Z. [et al.]. Effects of Ti foil thickness on microstructures and mechanical properties of in situ synthesized micro-laminated TiC/Ti composites // *Materials Science & Engineering A.* 2019. Vol. 767. 138296. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138296. (In Engl.).

14. Wang N., Choi Y., Oue K. [et al.]. Fabrication of in-situ rod-like TiC particles dispersed Ti matrix composite using graphite power sheet // *Scientific Reports.* 2022. Vol. 12. 19154. DOI: 10.1038/s41598-022-23796-4. (In Engl.).

KNYAZEV Egor Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Researcher of Omsk Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Science, Omsk; Associate Professor of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Mechanical Engineering Institute, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2980-1947

AuthorID (RSCI): 666119

ORCID: 0000-0001-6450-5364

AuthorID (SCOPUS): 55657278600

ResearcherID: AAU-4486-2020

Correspondence address: knyazevyegor@mail.ru

BADAMSHIN Artem Maratovich, Senior Lecturer of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Mechanical Engineering Institute, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3531-5945

AuthorID (RSCI): 1032513

AuthorID (SCOPUS): 57211271253

ResearcherID: AAA-3846-2019

Correspondence address: artembadamschin@mail.ru

STENKIN Yuriy Alekseyevich, Candidate of Chemical Sciences, Researcher of Omsk Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Science, Omsk.

AuthorID (RSCI): 150801

ORCID: 0000-0003-0840-9137

AuthorID (SCOPUS): 19639375100

ResearcherID: AAN-1001-2021

Correspondence address: sten@obisp.oscsbras.ru

ROGACHEV Evgeniy Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Resource Centre for Nanotechnologies «Nanocentre», Associate Professor of Physics Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1373-4622

AuthorID (RSCI): 670217

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

Correspondence address: evg.rogachev@yandex.ru

For citations

Knyazev E. V., Badamshin A. M., Stenkin Yu. A., Rogachev E. A. The analysis of the effect of heat treatment in various atmospheres on the structure of titanium foil // *Omsk Scientific Bulletin.* 2024. No. 1 (189). P. 35–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-35-40.

Received September 1, 2023.

© E. V. Knyazev, A. M. Badamshin,

Yu. A. Stenkin, E. A. Rogachev

ТРАНСФОРМАЦИЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ СТАНКОВ, СТАНОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПОМОЩЬЮ «СИСТЕМЫ ОПЕРАЦИОННОГО МЕНЕДЖМЕНТА»

Статья посвящена исследованию возможностей внедрения цифровой системы управления SFM в производство. Для более корректного внедрения dSFM системы в производство, были выявлены ее сильные и слабые стороны. Статья оценивает и подробно раскрывает причины успеха внедрения системы dSFM в производство. Была рассмотрена классическая система бережливого производства Lean и аналоговая система SFM, а также цифровая версия SFM. Была рассмотрена модель взаимодействия сотрудников с «Системой операционного менеджмента» с целью улучшения интеграции ее в производство и повышения производительности работников.

Ключевые слова: система планирования, SFM, dSFM, производство, обработка, цифровизация.

Введение. В наше время компании все чаще стремятся прибегать в бережливому производству (Lean) [1]. Данная система производства позволяет деталям изготавливаться в точном соответствии с запросами заказчиков, а также с меньшим числом дефектов и брака, в сравнении с продукцией, произведенной по технологиям серийного производства без использования бережливого производства. Для оптимизации данного метода производства была создана система операционного менеджмента (SFM), которая основана на принципах Lean [2]. Хотя система SFM и не может полностью заменить систему Lean, однако она предлагает различные способы по выведению этой системы на новый уровень совершенства. Таким образом, любая цифровизация должна устранять потери при производстве и сокращать их более эффективно, чем это мог бы сделать более классический бережливый подход [2, 3]. Несмотря на то, что этот подход и является более удобным, существует пробел, который связан со сложностью перехода к цифровой версии dSFM. Тем не менее данный переход необходим для решения «проблем связи промышленной автоматизации систем с оперативным управлением станками». Использование dSFM должно быть полностью ин-

тегрировано в системы производства и являться неотъемлемой частью при производстве [4, 5].

Крупные компании заявляют, что уже продвинулись в интеграции SFM, однако только пятая часть компаний заявляют, что уже полностью интегрировали ее в текущую производственную систему с переходом к цифровой версии dSFM [6, 7]. Это означает, что производители не понимают плюсы интегрирования dSFM системы в производство, которые упростили бы работу цеха, или не хотят переходить к ней, считая, что процесс перехода будет слишком затратным и не будет оправдывать ожидания, а также не покроет расходы, затраченные на внедрение этой системы. Интеграция данных систем оперативного управления станками с ЧПУ позволяет более доступно и быстро получать различные производственные данные, видеть риски при переводе или увольнении сотрудников [8, 9]. Однако большая часть компаний все так же продолжает использовать SFM и не переходят к системе dSFM из-за отсутствия проверенного, а также систематического подхода к цифровизации системы SFM [10].

Постановка задачи. Рассмотреть системы для рационализации производства и выявить их силь-



Рис. 1. Целевое состояние dSFM: как цифровизация может улучшить SFM

ные и слабые стороны. Определить плюсы и минусы внедрения dSFM системы в производство, обозначить способы ее внедрения, этапы внедрения. А также сферы, в которых нужно провести исследование для улучшения внедрения данных систем в производство.

Теория. Lean — это концепция рационализации бизнес-процессов. Она позволяет более быстро их рационализировать, а также сглаживать с помощью выявления процессов, которые не влияют на качество деталей, однако являются причиной финансовых потерь компании. SFM — это подход к управлению, помогающий сотрудникам выявлять отклонения при производстве деталей и запускать процессы решения проблем. Благодаря SFM руководитель всегда хорошо информирован о состоянии оснащения технологической оснасткой, необходимой для выполнения операций, работе станков и о возникающих сбоях и проблемах. Одним из требований отлаженной цифровой поддержки управления является понимание руководителем своей роли модератора, а не оптимизатора [11]. Ключевым элементом SFM является измерение эффективности с помощью подходящих ключевых показателей производства:

1. Получение готовой детали в соответствии с конструкторской документацией.
2. Построение отказоустойчивой и доступной сети.
3. Запись и хранение данных технологического процесса изготовления деталей.
4. Построение способа анализа данных, полученных при производстве деталей.

Большинство преимуществ этой системы, например более улучшенная обработка данных, были подтверждены экспертами [12, 13]. Несмотря на преимущества, данная система имеет свои минусы и риски. Самый главный риск заключается в том, что из-за автоматизации обработка производственных данных может привести к отдалению работников от управления эффективностью процессов [14]. Также через программу могут быть записаны неверные данные, может быть получена неверная интерпретация данных, что в итоге выдаст неверное отображение производственных процессов [15].

Внедрение системы dSFM. dSFM — это цифровая система, помогающая в производстве и логистике на предприятии. Она характеризуется как систе-

ма, которую сложно внедрить, но при удачном ее внедрении она будет нести большую пользу при автоматизации процессов контроля за производством деталей. Она служит для сбора и обработки данных, для получения мер по оптимизации и принятию решений [16, 17].

Различие между SFM и dSFM системами заключается в том, что цифровое управление цехом (dSFM) может улучшить аналоговое SFM за счет более быстрого отклика или лучшей доступности данных [18].

С технической точки зрения, системы dSFM должны будут сосредоточиться на таких аспектах, как обработка данных, и на управлении знаниями, чтобы были задействованы все преимущества данной системы. Способы по визуализации обработки данных должны быть адаптированы к конкретным потребностям пользователей. Поскольку литературы по dSFM еще достаточно мало, то необходимо проводить дальнейшие исследования для более эффективной адаптации алгоритмов, например, механизмов [19, 20].

Переход от системы SFM к системе dSFM улучшает получение обратной связи [21]. Алгоритм перехода от системы SFM к системе dSFM представлен на рис. 1.

При рассмотрении достоинств и недостатков цифрового управления при производстве деталей (табл. 1), можно сказать, что цифровизация системы SFM имеет больше преимуществ, чем недостатков. Так, например, одним из сильных достоинств данной системы можно выделить упрощение работы руководителя в принятии верных решений с помощью анализа методов и алгоритмов больших баз данных, которые система анализирует и помогает при принятии решения. Если рассматривать систему dSFM, как помощника для руководителя в управлении и решении проблем (табл. 2), то недостатков и достоинств одинаковое количество, однако достоинств, которые вносят весомый вклад в упрощение по управлению производством, больше. Так, например, проблемы могут быть обнаружены раньше благодаря большей прозрачности производственных процессов, а также помогают сотрудникам в решении проблем, возникающих при производстве, и заставляют правильно документировать всю конструкторскую и технологическую документацию. Подводя итоги по недостаткам и достоинствам данных сфер деятельности, заня-

Достоинства и недостатки цифрового управления в цехе

Достоинства	Недостатки
Руководитель быстрее реагирует на отклонения благодаря данным в режиме реального времени	Руководитель проводит слишком мало времени в производственных помещениях
Руководителю помогают в принятии решений с помощью методов и алгоритмов больших данных	Цифровое SFM может рассматриваться сотрудниками как инструмент контроля управления
Коммуникационный каскад становится проще	Руководители, как правило, слишком остро реагируют на отклонения и пытаются решать проблемы сами, вместо того чтобы руководить своими сотрудниками
Руководитель будет выполнять меньше рутинных задач в SFM	Программное обеспечение берет на себя задачи ведущего руководителя
Руководитель ведет встречи с помощью удаленного инструмента коммуникации	Свободное время менеджеров может быть поставлено под угрозу

Таблица 2

Достоинства и недостатки цифрового управления решением проблем

Достоинства	Недостатки
Проблемы могут быть обнаружены раньше благодаря большей прозрачности производственных процессов	Отсутствуют компетенции по распознаванию и решению проблем в сложных CPS
Решенные проблемы документируются в системе управления данными	Документирование отклонений на собрании SF может занять больше времени
Цифровое решение проблем и управление данными могут обеспечить сетевое взаимодействие между производственными группами и цехами	Меньше используются и снижаются компетенции управления по решению проблем при изготовлении деталей
Сотрудникам помогают в решении проблем и стандартизируют все процессы, связанные с производством и управлением	Сотрудникам трудно взаимодействовать с программным обеспечением

Таблица 3

Достоинства и недостатки системы dSFM

Достоинства	Недостатки
Автоматизированный сбор производственных данных экономит время сотрудников и руководителя	Через систему могут быть записаны неверные данные
Объединение информации становится менее сложным	Неправильная интерпретация записанных данных дает неправильную картину производственных процессов
Информация доступна в большем объеме	Риск отслеживания слишком большого количества KPI обусловлен высокой доступностью данных
Информация обновляется автоматически	Автоматический сбор и объединение данных может привести к тому, что сотрудники больше не будут идентифицировать себя с производственным процессом изготовления деталей
Разнообразные возможности оценки данных	
Данные могут быть предварительно обработаны в зависимости от различных целевых групп	

тие которыми упрощается благодаря dSFM, была составлена таблица (табл. 3), в которой выделены основные достоинства, которые имеют численное преимущество перед недостатками. С помощью данной системы данные могут быть предварительно обработаны в зависимости от различных целевых групп; информация обновляется автоматически, а также она доступна в большем объеме, нежели в аналоговой системе SFM, объединение информации становится менее сложным. Из всего этого можно сделать вывод, что внедрение системы dSFM поможет в управлении производством, а также минимизирует возникновение проблем при производстве из-за человеческого фактора.

Модель принятия dSFM сотрудниками. Важным фактором при внесении изменений в способы управления производством является готовность сотрудников к переходу от одной системы управления к другой. Так, были выявлены факторы, по которым выяснялась готовность сотрудников к переходу на dSFM.

Первый фактор — это готовность сотрудников к изменениям. В этом факторе рассматриваются отношения и представления сотрудников о необходимости изменений. Организация должна доказать сотрудникам необходимость внедрения этой системы. Сотрудники могут иметь разную степень готовности к изменениям, а также мотивацию адаптиро-

ваться к ним, поэтому должен быть разработан план по повышению этой готовности.

Второй фактор — это понятность изменений и их открытость. Сотрудники должны видеть, как происходит внедрение цифрового управления производством, чтобы им была понятна сама суть этой системы. Также должен быть налажен взаимный процесс обучения между сотрудниками, чтобы они могли обмениваться информацией друг с другом с целью улучшения качества выполняемой работы.

Третий фактор — это пользовательский опыт. Чтобы рабочий имел высокую производительность, ему должно быть комфортно взаимодействовать с системой.

Соответственно, систему нужно сделать простой в освоении, эффективной и интуитивно понятной. Так, например, чтобы пользователь больше доверял компании, она должна сделать все данные прозрачными, чтобы он мог все видеть.

Также компания должна гарантировать ему безопасность программного обеспечения для укрепления доверительных взаимоотношений между ними [22].

Четвертый фактор — это социальный климат в коллективе на производстве. Важно поддерживать сплоченность сотрудников между собой, чтобы они выполняли задачи более качественно и быстро. При не регулировании климата в коллективе он станет разобщенным, что ухудшит показатели эффективности отдела и впоследствии самого предприятия, что сильно скажется на доходности, репутации, а также поставит под вопрос дальнейшее существование предприятия с данным составом сотрудников. Для сплочения коллектива потребуется командная работа. Нужно ставить общие цели и добиваться их выполнения. Структурирование задач. Одну большую задачу следует разбивать на несколько малых, чтобы человек видел прогресс и имел мотивацию продолжать выполнение работы поэтапно. Это основные способы, которые помогут сплотить коллектив и выстроить хорошие взаимоотношения между людьми для поднятия уровня готовности к внедрению изменений на производстве.

Выводы. В рамках данной статьи был проведен обзор различных систем по оперативному управлению станками. Была рассмотрена классическая система бережливого производства Lean и аналоговая система SFM, помогающая измерять эффективность с помощью подходящих ключевых показателей эффективности, а также цифровая версия SFM (dSFM), которая обрабатывает данные и управляет производством независимо от человека. Статья оценивает и подробно раскрывает причины успеха внедрения системы dSFM в производство. Успех внедрения цифрового управления цехом заключается в принятии ее стандартов сотрудниками. Нужно выявить степень принятия и готовности сотрудников взаимодействовать со службой качества в части оцифровки процессов оперативного управления производством.

Также успех внедрения зависит и от пользовательского опыта сотрудников. Пользователь должен интуитивно понимать данные, с которыми он работает с целью облегчения взаимодействия с программными обеспечениями, а также это нужно, чтобы не вызвать у пользователя неприязнь из-за непонятного ему интерфейса. Были рассмотрены 4 фактора, влияющие на то, как сделать внедрение dSFM более успешным и подготовить сотрудников к изменениям.

Библиографический список

1. Вейдер М. Инструменты бережливого производства. Часть I. Аттестация на соответствие принципам бережливого производства // Управление качеством. 2020. № 3. С. 32–39. EDN: XPPFUJ.
2. Петунина А. А., Яковлева В. Е., Каримова С. А. Применение системы SFM в производственном процессе // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 20-летию филиала КузГТУ в г. Междуреченске. Междуреченск: Изд-во КузГТУ, 2018. С. 247–249. EDN: VKPZBW.
3. Вейдер М. Lean Manufacturing на предприятиях инфраструктурной отрасли // Управление качеством. 2019. № 10. С. 24–29. EDN: KIJNZM.
4. Zhou H., Zhang Sh., Wang Z. Multi-objective optimization of process parameters in plastic injection molding using a differential sensitivity fusion method // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 114, № 1. P. 423–449. DOI: 10.1007/s00170-021-06762-8.
5. Хазуев А. И. Моделирование параметров промышленной политики в условиях отраслевых диспропорций // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 2 (18). С. 79–89. EDN: WFLZXX.
6. Попов В. А. Внедрение концепции «Бережливое производство» на предприятиях // Экономика и предпринимательство. 2015. № 4–1 (57). С. 515–518. EDN: TRSZCN.
7. Henaou R., Sarache W., Gomez I. Lean Manufacturing and Sustainable Performance: Trends and Future Challenges // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 208. P. 99–116. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.116.
8. Разуев Н. О., Макашин Д. С. Стратегия внедрения цифровизации на заводах // Проблемы машиноведения: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 16–17 мая 2023. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2023. С. 37–40. EDN: HAZKPU.
9. Глухова Т. В., Бирюкова Л. И., Палькина Ю. Р. Внедрение концепции бережливого производства в целях повышения устойчивости интегрированной системы менеджмента предприятия // Инновационное развитие экономики. 2022. № 6 (72). С. 39–44. DOI: 10.51832/222379842022639. EDN: ROBFER.
10. Братченко С. А. Бережливое производство в России в теории и на практике // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. 2018. № 3. С. 146–158. DOI: 10.38050/01300105201838. EDN: OVQXEV.
11. Кусмарцева Е. В. Инструментарий методологии Lean (бережливое производство) в системе управления безопасностью труда // Техногенная и природная безопасность: материалы VI Всерос. науч.-практ. конф., Саратов, 27–28 октября 2021. Саратов: ООО Центр социальных агроинноваций СГАУ, 2021. С. 33–37. EDN RXIVMC.
12. Müller M., Alexandi E., Mettermich J. Digital shop floor management enhanced by natural language processing // Procedia CIRP. 2021. Vol. 96. P. 21–26. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.046.
13. Kandler M. [et al.]. Shopfloor Management Acceptance in Global Manufacturing // Procedia CIRP. 2022. Vol. 115. P. 190–195. DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.072.
14. Маев Д. В. Развитие бережливого управления процессами на предприятиях социальной сферы // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2021. Т. 31, № 5. С. 820–826. DOI: 10.35634/2412-9593-2021-31-5-820-826. EDN: LDGBTB.
15. Векшина А. А. Концепция бережливого производства как способ оптимизации затрат: принципы, инструменты и опыт внедрения // Международный бухгалтерский учет. 2021. Т. 24, № 11 (485). С. 1243–1261. DOI: 10.24891/ia.24.11.1243. EDN: XWDDVT.
16. Ципина Д. Д. Применение инструментов бережливого производства на промышленных предприятиях // Промышленное развитие России: проблемы, перспективы: сб. ст. по

материалам XVIII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Нижний Новгород: Изд-во НГПУ им. К. Минина, 2021. Т. 1. С. 136–139. EDN: XVWJNS.

17. Гордеева Е. В., Кукса Д. В. Бережливое производство как современная концепция управления: принципы и инструменты // *Sochi Journal of Economy*. 2020. Т. 14, № 4. С. 360–367. EDN: PFIZOD.

18. Авдеева И. А., Бадиков А. А. Leap-технологии как инструмент повышения эффективности производственной деятельности предприятия // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2019. Т. 7, № 2 (45). С. 7–13. EDN: QCYBET.

19. Данилов И. Д., Пузанова И. А. Логистические концепции как источник повышения прибыльности предприятия // *Актуальные направления повышения доходности бизнеса: проблемы, методы, решения-2019: сб. науч. тр. по материалам 1-й Всерос. науч.-практ. конф., Москва, 20 апреля 2019*. Москва: Изд-во ГУУ, 2019. С. 46–50. EDN: GHHGGW.

20. Ваганова О. В., Кумаргей А. С. Повышение качества образовательных услуг на основе внедрения технологий бережливого производства в НИУ «БелГУ» // *Научный результат. Экономические исследования*. 2019. Т. 5, № 1. С. 3–10. DOI: 10.18413/2409-1634-2019-5-1-0-1. EDN: RKBFOX.

21. Бельш К. В. Комплексный подход к внедрению и оценке эффективности проектов по бережливому производству на промышленном предприятии // *Вопросы инновационной экономики*. 2018. Т. 8, № 3. С. 513–530. DOI: 10.18334/vines.8.3.39364. EDN: YNASCT.

22. Чертков В. А. Повышение эффективности работы предприятий энергетической сферы на примере внедрения системы 5S как инструмента бережливого производства // *Наукосфера*. 2021. № 6–2. С. 138–145. DOI: 10.5281/zenodo.5036401. EDN: GPUKVU.

КОРЖОВА Ольга Павловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8253-8670

ORCID: 0000-0002-3711-340X

AuthorID (РИНЦ): 762156

AuthorID (SCOPUS): 57200720669

МАКАШИН Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие

станки и инструменты» Машиностроительного института ОмГТУ, г. Омск; доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск. SPIN-код: 1763-1883

ORCID: 0000-0002-8297-5551

AuthorID (РИНЦ): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

Адрес для переписки: dima.makashin@gmail.com

ПОПОВ Петр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9919-9442

AuthorID (РИНЦ): 518315

AuthorID (SCOPUS): 57200731661

ORCID: 0009-0005-4504-3308

ДОНОАГА Илья Евгеньевич, студент гр. ИСТ-223 факультета информационных технологий и компьютерных систем ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2926-8133

AuthorID (РИНЦ): 1205554

ORCID: 0009-0000-3345-092X

Адрес для переписки: idonoaga@bk.ru

ОБРЫВАЛИН Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 4056-8545

AuthorID (РИНЦ): 540179

ORCID: 0000-0002-0635-9140

Адрес для переписки: av.obr@yandex.ru

Для цитирования

Коржова О. П., Макашин Д. С., Попов П. Е., Доноага И. Е., Обрывалин А. В. Трансформация оперативного управления эксплуатацией станков, станочных комплексов с помощью «Системы операционного менеджмента» // *Омский научный вестник*. 2024. № 1 (189). С. 41–47. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-41-47.

Статья поступила в редакцию 11.07.2023 г.

© О. П. Коржова, Д. С. Макашин, П. Е. Попов,

И. Е. Доноага, А. В. Обрывалин



TRANSFORMATION OF OPERATIONAL MANAGEMENT OF MACHINE TOOLS, MACHINE COMPLEXES OPERATION WITH THE HELP OF «OPERATIONAL MANAGEMENT SYSTEM»

The article focuses on the potential integration of the SFM digital control system into production. To achieve a more accurate implementation of the dSFM system, the article identifies its strengths and weaknesses. It evaluates and outlines the factors contributing to the successful implementation of the dSFM system in production. The article also analyses the traditional Lean manufacturing system, the analogue SFM system and its digital version. The study scrutinised the manner in which workers interact with the «System of Operations Management» with the purpose of refining its assimilation into manufacturing processes and enhancing employee output.

Keywords: planning system, SFM, dSFM, production, machining, digitalization.

References

1. Veyder M. Instrumenty berezhlivogo proizvodstva. Chast' I. Attestatsiya na sootvetstviye printsipam berezhlivogo proizvodstva [Lean manufacturing tools. Part I. Certification for compliance with lean manufacturing principles] // Upravleniye Kachestvom. *Quality Management*. 2020. No. 3. P. 32–39. EDN: XPPFUJ. (In Russ.).
2. Petunina A. A., Yakovleva V. E., Karimova S. A. Primeneniye sistemy SFM v proizvodstvennom protsesse [Application of the SFM system in the production process] // Sovremennyye Tendentsii i Innovatsii v Nauke i Proizvodstve. *Modern Trends and Innovations in Science and Production*. Mezhdurechensk, 2018. P. 247–249. EDN: VKPZBW. (In Russ.).
3. Veyder M. Lean Manufacturing na predpriyatiyakh infrastrukturnoy otrasli [Lean Manufacturing at enterprises in the infrastructure industry] // Upravleniye Kachestvom. *Quality Management*. 2019. No. 10. P. 24–29. EDN: KIJNZM. (In Russ.).
4. Zhou H., Zhang Sh., Wang Z. Multi-objective optimization of process parameters in plastic injection molding using a differential sensitivity fusion method // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 114, no. 1. P. 423–449. DOI: 10.1007/s00170-021-06762-8. (In Engl.).
5. Khazuyev A. I. Modelirovaniye parametrov promyshlennoy politiki v usloviyakh otraslevykh disproportsiy [Modeling industrial policy parameters in the context of sectoral imbalances] // Modeli, Sistemy, Seti v Ekonomike, Tekhnike, Prirode i Obshchestve. *Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*. 2016. No. 2 (18). P. 79–89. EDN: WFLZXX. (In Russ.).
6. Popov V. L. Vnedreniye kontseptsii «Berezhlivoye proizvodstvo» na predpriyatiyakh [Implementation of a «Lean production» conception at enterprises] // *Ekonomika i Predprinimatel'stvo. Economy and Entrepreneurship*. 2015. No. 4–1 (57). P. 515–518. EDN: TRSZCN. (In Russ.).
7. Henao R., Sarache W., Gomez I. Lean Manufacturing and Sustainable Performance: Trends and Future Challenges // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 208. P. 99–116. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.116. (In Engl.).
8. Razuyev N. O., Makashin D. S. Strategiya vnedreniya tsifrovizatsii na zavodakh [Strategy for the implementation of digitalization in factories] // *Problemy Mashinovedeniya. Mechanical Science Problems*. Omsk, 2023. P. 37–40. EDN: HAZKPU. (In Russ.).
9. Glukhova T. V., Biryukova L. I., Pal'kina Yu. R. Vnedreniye kontseptsii berezhlivogo proizvodstva v tselyakh povysheniya ustoychivosti integrirovannoy sistemy menedzhmenta predpriyatiya [Implementation of lean manufacturing concept to improve the sustainability of the enterprise integrated management system] // *Innovatsionnoye Razvitiye Ekonomiki. Innovative Development of Economy*. 2022. No. 6 (72). P. 39–44. DOI: 10.51832/222379842022639. EDN: ROBFER. (In Russ.).
10. Bratchenko S. A. Berezhlivoye proizvodstvo v Rossii v teorii i na praktike [Lean production in russia: theory and practice] // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 6: Ekonomika. Moscow University Economics Bulletin*. 2018. No. 3. P. 146–158. DOI: 10.38050/01300105201838. EDN: OVQXEV. (In Russ.).
11. Kusmartseva E. V. Instrumentariy metodologii Lean (berezhlivoye proizvodstvo) v sisteme upravleniya bezopasnost'yu

- truda [Lean toolkit in occupational safety management system] // *Tekhnogennaya i prirodnyaya bezopasnost'. Technogenic and Natural Safety*. Saratov, 2021. P. 33–37. EDN RXIVMC. (In Russ.).
12. Müller M., Alexandi E., Metternich J. Digital shop floor management enhanced by natural language processing // *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 96. P. 21–26. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.046. (In Engl.).
13. Kandler M. [et al.]. Shopfloor Management Acceptance in Global Manufacturing // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 115. P. 190–195. DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.072. (In Engl.).
14. Mayev D. V. Razvitiye berezhlivogo upravleniya protsessami na predpriyatiyakh sotsial'noy sfery [Development of lean process management at enterprises of social sphere] // *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Seriya «Ekonomika i Pravo». Bulletin of Udmurt University. Series Economics and Law*. 2021. Vol. 31, no. 5. P. 820–826. DOI: 10.35634/2412-9593-2021-31-5-820-826. EDN: LDGBTS. (In Russ.).
15. Vekshina A. A. Kontseptsiya berezhlivogo proizvodstva kak sposob optimizatsii zatrat: printsipy, instrumenty i opyt vnedreniya [Lean manufacturing as a way to optimize costs: principles, tools, and implementation practices] // *Mezhdunarodnyy Bukhgalterskiy Uchet. International Accounting*. 2021. Vol. 24, no. 11 (485). P. 1243–1261. DOI: 10.24891/ia.24.11.1243. EDN: XWDDVT. (In Russ.).
16. Tshipina D. D. Primeneniye instrumentov berezhlivogo proizvodstva na promyshlennyykh predpriyatiyakh [Applying lean tools production at industrial enterprises] // *Promyshlennoye Razvitiye Rossii: Problemy, Perspektivy. Industrial Development of Russia: Problems, Prospects*. Nizhny Novgorod, 2021. Vol. I. P. 136–139. EDN: XVWJNS. (In Russ.).
17. Gordeyeva E. V., Kuksa D. V. Berezhlivoye proizvodstvo kak sovremennaya kontseptsiya upravleniya: printsipy i instrumenty [Lean manufacturing as a modern management concept: principles and tools] // *Sochi Journal of Economy. Sochi Journal of Economy*. 2020. Vol. 14, no. 4. P. 360–367. EDN: PFIZOD. (In Russ.).
18. Avdeyeva I. A., Badikov A. A. Lean-tehnologii kak instrument povysheniya effektivnosti proizvodstvennoy deyatel'nosti predpriyatiya [Lean-technologies as a tool to improve the efficiency of production activity of the enterprise] // *Aktual'nyye Napravleniya Nauchnykh Issledovaniy XXI Veka: Teoriya i Praktika. Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2019. Vol. 7, no. 2 (45). P. 7–13. EDN: QCYBET. (In Russ.).
19. Danilov I. D., Puzanova I. A. Logisticheskiye kontseptsii kak istochnik povysheniya pribyl'nosti predpriyatiya [Logistics concepts as a source of increasing enterprise profitability] // *Aktual'nyye Napravleniya Povysheniya Dokhodnosti Biznesa: Problemy, Metody, Resheniya. Current Directions for Increasing Business Profitability: Problems, Methods, Solutions*. Moscow, 2019. P. 46–50. EDN: GIHGGW. (In Russ.).
20. Vaganova O. V., Kumargey A. S. Povysheniye kachestva obrazovatel'nykh uslug na osnove vnedreniya tekhnologii berezhlivogo proizvodstva v NIU «BelGU» [Improving the quality of educational services through the introduction of lean production techniques in «BelSU»] // *Nauchnyy Rezul'tat. Ekonomicheskiye Issledovaniya. Research Result. Economic Research*. 2019. Vol. 5, no. 1. P. 3–10. DOI: 10.18413/2409-1634-2019-5-1-0-1. EDN: RKBFOX. (In Russ.).
21. Belysh K. V. Kompleksnyy podkhod k vnedreniyu i otsenke effektivnosti proyektov po berezhlivomu proizvodstvu na promyshlennom predpriyatii [Multipurpose approach to implementation and evaluation the efficiency of the projects on lean production in industrial enterprises] // *Voprosy Innovatsionnoy Ekonomiki. Voprosy Innovatsionnoy Ekonomiki*. 2018. Vol. 8, no. 3. P. 513–530. DOI: 10.18334/vinec.8.3.39364. EDN: YNASCT. (In Russ.).

22. Chertkov V. A. Povysheniye effektivnosti raboty predpriyatiy energeticheskoy sfery na primere vnedreniya sistemy 5S kak instrumenta berezhlivogo proizvodstva [Energy effectiveness of warning in the energy sphere for the basis of line technologies] // *Naukosfera. Naukosfera*. 2021. No. 6–2. P. 138–145. DOI: 10.5281/zenodo.5036401. EDN: GPUKVU. (In Russ.).

KORZHOVA Olga Pavlovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal-cutting Machines and Tools Department, Mechanical Engineering Institute, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 8253-8670

AuthorID (RSCI): 762156

AuthorID (SCOPUS): 57200720669

ORCID: 0000-0002-3711-340X

MAKASHIN Dmitry Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal-cutting Machines and Tools Department, Mechanical Engineering Institute, OmSTU, Omsk; Associate Professor of Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 1763-1883

AuthorID (RSCI): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

ORCID: 0000-0002-8297-5551

Correspondence address: dima.makashin@gmail.com

POPOV Peter Evgenyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal-cutting Machines and Tools Department, Mechanical Engineering Institute, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9919-9442

AuthorID (RSCI): 518315

AuthorID (SCOPUS): 57200731661

ORCID: 0009-0005-4504-3308

DONOAGA Ilya Evgenyevich, Student of gr. IST-223 of Information Technologies and Computer Systems Faculty, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2926-8133

AuthorID (RSCI): 1205554

ORCID: 0009-0000-3345-092X

Correspondence address: idonoaga@bk.ru

OBRYVALIN Alexey Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 4056-8545

AuthorID (RSCI): 540179

ORCID: 0000-0002-0635-9140

Correspondence address: av.obr@yandex.ru

For citations

Korzhova O. P., Makashin D. S., Popov P. E., Donoaga I. E., Obryvalin A. V. Transformation of operational management of machine tools, machine complexes operation with the help of «Operational Management System» // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 41–47. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-41-47.

Received July 11, 2023.

© O. P. Korzhova, D. S. Makashin, P. E. Popov,
I. E. Donoaga, A. V. Obryvalin



КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЫТОВЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

В работе рассматривается вопрос динамики передачи тепла в бытовой светодиодной лампе и сценарии упрощения моделирования теплового распределения, включающие учет теплопроводности, конвекцию и влияние нескольких светодиодных источников света. Представлен комплексный анализ процессов распределения тепла в бытовых светодиодных лампах и разработка математической модели теплового излучения светодиодного источника света с использованием метода конечных разностей. Разработанная модель учитывает геометрию лампы, свойства материалов и условия окружающей среды. Особое внимание уделяется влиянию расположения светодиодов в системе лампы. Анализ процессов распределения тепла сопровождается формулированием математической модели теплового излучения, исходящего от светодиодного источника света, с использованием метода конечных разностей. Новизна исследования заключается в том, что в математическую модель включены объемная геометрия лампы и источника света, сценарии учета различных параметров модели. Верификация модели показала точность до 93 %. Исследование направлено на создание более реалистичного и точного метода моделирования и анализа теплового управления в многосветодиодных осветительных приборах бытового назначения.

Ключевые слова: моделирование теплового излучения, тепловая модель светодиодной лампы, качество светодиодных осветительных приборов, тепловой менеджмент светодиодных ламп.

Растущая популярность светодиодных осветительных приборов, в силу гибкости их управления и значительной энергетической эффективности в различных областях применения, включая бытовое освещение, использование в технологиях проектирования дисплеев и промышленное использование, вызывает рост требований к качеству и эффективности данных источников света. Эффективное управление тепловым распределением в данных изделиях имеет решающее значение для светодиодных осветительных приборов (СОП), поскольку оно напрямую влияет на качество и световую эффективность светодиодов [1].

Исследования распределения тепла в СОП все чаще проводятся с помощью численного моделирования, которое предлагает экономичный и эффективный способ анализа и оптимизации процесса теплового менеджмента в системе осветительного прибора. Методы конечных разностей (МКР) стали особенно популярным инструментом благодаря своей точности и универсальности. Широкий спектр исследований использования МКР для численного анализа распределения тепла в электрических приборах, в том числе осветительных устройствах, показывает актуальность и эффективность приме-

нения данных методов для решения моделей теплового распределения. Однако для СОП все еще существует необходимость оптимизации моделей теплового распределения и разработки различных сценариев построения и решения данных моделей [2, 3].

Существуют исследования, представляющие 2D-модели на основе МКР для изучения распределения тепла в одиночных светодиодных системах [4]. Они показывают исследование и анализ влияния различных коэффициентов проводимости и конвекции на тепловые характеристики светодиодов, аналогичным образом развитие данных моделей получило в разработке и построении данного подхода на 3D-модели, чтобы лучше описать пространственное распределение тепла внутри СОП [5]. Эти исследования, хотя и носят всеобъемлющий характер, в основном сосредоточены на сценариях с одним светодиодом.

Представленная работа направлена на расширение существующего объема исследований путем моделирования и симуляции теплового излучения СОП в сценариях с несколькими светодиодами для более точного приближения к реальной светодиодной системе. В качестве объекта моделиро-

вания была выбрана бытовая светодиодная лампа типа E27, так как данное устройство подвержено значительному температурному воздействию и нуждается в дополнительных инструментах теплового моделирования для осуществления теплового менеджмента. Для решения разработанной модели и анализа распределения тепла в описанном СОП использовались инструменты MATLAB.

1. Разработка модели теплового излучения светодиода в системе бытовой светодиодной лампы.

Эффективным методом теплового моделирования является оптическое моделирование распространения радиационного тепла с учетом теплового моделирования теплопередачи и геометрического анализа. Оптическая модель использует концепцию коэффициентов отражения для описания обмена излучаемым теплом между светодиодным источником света и внутренними поверхностями лампы. Поэтому для построения модели будем использовать концепцию коэффициентов отражения.

На основании приведенного во введении анализа существующих тепловых моделей рассмотрим и выделим основные характеристики, которые должна учитывать разрабатываемая модель, чтобы улучшать существующие решения [6, 7].

Во-первых, необходимо учитывать, насколько эффективно светодиодная лампа излучает тепло по сравнению с идеальным излучателем черного цвета, этого можно добиться через ввод в модель коэффициента излучения $\varepsilon(T)$. Это позволяет модели учитывать изменения эффективности теплового излучения лампы при изменении температуры [8].

В типовых моделях уравнение адвекции-диффузии обычно предполагает, что удельная теплоемкость C_p , плотность ρ и теплопроводность k являются постоянными. Это предположение может привести к неточностям в модели, особенно при более высоких температурах, когда эти свойства могут значительно изменяться [9, 10]. Поэтому в разрабатываемой модели необходимо данные параметры рассматривать как зависящие от температуры, то есть они должны быть представлены в виде $C_p(T)$, $\rho(T)$ и $k(T)$. Это дополнение позволяет сделать модель более точной в различных условиях эксплуатации. Аналогичным образом коэффициент конвективной теплопередачи h , который в типовых моделях принимается постоянной величиной, обычно является функцией температуры, поэтому целесообразно введение зависящих от температуры граничных условий в виде $h(T)$.

Также типовые модели, как правило, не учитывают снижение эффективности светодиодов с повышением температуры. Этот эффект может привести к тому, что большая часть электрической энергии преобразуется в тепло, увеличивая тепловую нагрузку на лампу [6]. Разрабатываемая модель будет учитывать этот эффект за счет введения зависящей от температуры функции максимальной мощности $P_{\max}(T)$.

Для построения модели необходимо ввести обозначения конкретного рассматриваемого теплового элемента подложки в многомерном массиве, для этого введем индексы i , j , k и l .

Индексы i и j используются для обозначения конкретной светодиодной матрицы. В системе с несколькими светодиодами каждый отдельный светодиод будет идентифицироваться как уникальная пара координат (i, j) .

Аналогично индексы k и l используются для обозначения конкретного рассматриваемого элемента

подложки. В системе с несколькими элементами подложки каждый отдельный элемент будет идентифицирован уникальной парой координат (k, l) .

По сути, индексы (i, j, k, l) позволяют конкретно привязать каждый отдельный светодиод и элемент подложки в системе, что позволит детально рассчитать теплопередачу излучения между ними.

Это становится особенно важным при работе со сложными системами, включающими множество светодиодов и элементов подложки, где теплопередача излучения может значительно варьироваться между различными элементами.

Данный подход позволяет вычислить входную энергию излучения $dQ_{i,j,k,l}$ для площади поверхности, учитывая зависящую от температуры излучательную способность $\varepsilon(T)$, интенсивность источника $u_{i,j}$, максимальную мощность P_{\max} и коэффициенты обзора:

$$dQ_{i,j,k,l} = \varepsilon(T)u_{i,j}P_{\max}F_{1 \rightarrow 2}dA_{k,l}.$$

Включение данного уравнения в модель для всех соответствующих пар элементов светодиод-подложка позволит более точно рассчитать входную энергию излучения, учитывая свойства, зависящие от температуры, и геометрические факторы.

Так как светодиоды преобразуют электрическую энергию в свет и тепло и доля электрической энергии, преобразуемой в тепло, зависит от эффективности светодиода, которая имеет тенденцию снижаться с повышением температуры, то уравнение входной энергии излучения представлено в модели с зависящей от температуры функцией максимальной мощности $P_{\max}(T)$.

Модель должна учитывать дифференциальную энергию излучения $dQ_{i,j,k,l}$ для каждой отдельной пары светодиод-подложка, а затем суммарный тепловой поток и поглощенная освещенность получают путем суммирования этих вкладов для всех соответствующих пар.

Тогда суммарный тепловой поток $q_{k,l}$ и поглощенную освещенность $E_{k,l}$ на каждой поверхности можно рассчитать следующим образом:

$$E_{k,l} = q_{k,l} = \sum_i \sum_j \varepsilon(T)u_{i,j}P_{\max}F_{1 \rightarrow 2}dA_{k,l}.$$

Данное уравнение представляет собой суммарную поглощенную освещенность или тепловой поток на каждом элементе поверхности (k, l) с учетом всех соответствующих пар светодиод-подложки (i, j) .

Следует отметить, что при численном расчете необходимо перебрать все комбинации (i, j) и рассчитать вклад каждого светодиода в тепловой поток и поглощенную освещенность на соответствующем элементе подложки (k, l) . Сумма по i и j в уравнении отражает это суммирование для всех светодиодов.

Тепловое моделирование описывает распространение тепла через лампу.

Принимая уравнение адвекции-диффузии, которое учитывает зависящие от температуры свойства материала, такие как удельная теплоемкость $C_p(T)$, плотность $\rho(T)$ и теплопроводность $k(T)$, получаем:

$$\begin{aligned} C_p(T)\rho(T)v_x \frac{\partial T}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

где $C_p(T)$ — удельная теплоемкость, зависящая от температуры;

$\rho(T)$ — плотность, зависящая от температуры;

v_x — скорость в направлении x (при учете конвективных эффектов);

T — температура;

x, y, z — пространственные размеры;

$k_x(T), k_y(T), k_z(T)$ — зависящие от температуры теплопроводности в направлениях x, y и z соответственно.

Уравнение уравнивает накопление тепла за счет конвекции (левая часть) с его пространственной диффузией (правая часть).

Конвективный теплообмен на внешней и излучаемой поверхности лампы регулируется двумя уравнениями. Для внешней границы лампы уравнение представляет конвективный теплообмен на внешней границе лампы. Левая часть представляет собой теплопроводность из лампы, а правая часть — теплопередачу за счет конвекции:

$$-k(T)\frac{\partial T}{\partial n} = h(T)(T - T_{\text{окр}}),$$

аналогично для теплообмена на излучаемой поверхности:

$$-k(T)\frac{\partial T}{\partial n} = E + h(T)(T - T_{\text{окр}}),$$

где E — представляет собой радиационный теплообмен;

$k(T)$ — теплопроводность в зависимости от температуры;

$\frac{\partial T}{\partial n}$ — градиент температуры по нормали к поверхности,

где n обозначает направление, нормальное к граничной поверхности;

$h(T)$ — коэффициент конвективного теплообмена;

$T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды.

Далее необходимо учесть уравнение радиационного теплообмена:

$$-\nabla \cdot q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{окр}}^4),$$

уравнение трехмерной теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T),$$

Объединяя уравнения, получаем:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot q_{\text{рад}},$$

где $q_{\text{рад}}$ — вектор радиационного теплового потока, который является функцией уравнения радиационного теплообмена.

Дополнительно можно ввести в модель число Пекле — безразмерный параметр, который дает представление о доминирующем механизме теплопередачи.

Если число Пекле определяется как:

$$Pe = \frac{l v}{a},$$

l — характерная длина (часто характерный размер системы);

v — характеристическая скорость жидкости (или материала);

a — теплопроводность материала, задаваемая формулой:

$$a = \frac{k}{\rho C_p},$$

где k — теплопроводность материала,

ρ — плотность материала,

C_p — удельная теплоемкость материала.

По сути, число Пекле сравнивает скорость тепловой конвекции (за счет движения жидкости) со скоростью теплопроводности (за счет градиента температуры). Низкое число Пекле указывает на преобладание теплопроводности, а высокое число Пекле — на преобладание конвекции.

В контексте тепловой модели светодиодной лампы введение числа Пекле может дать представление о том, насколько важны кондукция и конвекция в процессе теплопередачи. Оно поможет понять, оказывает ли движение воздуха (или любой другой среды) вокруг лампы существенное влияние на общий теплообмен по сравнению с кондуктивным теплообменом внутри материалов лампы.

Рассчитав и проанализировав число Пекле для различных условий эксплуатации, можно получить лучшее представление об относительной важности кондукции и конвекции в системе. Эта информация может послужить руководством при выборе конструкции и помочь оптимизировать тепловые характеристики лампы.

Тогда полная система уравнений модели будет выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p(T)\rho(T)v_x \frac{\partial T}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - \nabla \cdot q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{окр}}^4) \\ - k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = h(T)(T - T_{\text{окр}}) \\ - k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = E + h(T)(T - T_{\text{окр}}) \\ Pe = \frac{l v}{a} \end{array} \right.,$$

где переменные $T(x, y, z, t)$ и $q_{\text{рад}}(x, y, z, t)$ представляют собой распределение температуры в трехмерном пространстве и времени и вектор радиационного потока тепла соответственно;

ρ — плотность материала;

$C_p(T)$ — удельная теплоемкость в зависимости от температуры;

v_x — компонента скорости в направлении x (при учете конвективных эффектов);

$k_x(T), k_y(T), k_z(T)$ — зависимость теплопроводности от температуры в направлениях x, y и z соответственно;

ε — излучательная способность поверхности;

σ — постоянная Стефана — Больцмана;

$T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды;

$T_{\text{окр},p}$ — температура окружающей среды в радиационной поверхности.

Взаимосвязь между описанными выражениями заключается в том, что они оба вносят вклад в общий теплообмен в системе. Уравнение тепло-

проводности описывает теплопроводность внутри материала, а уравнение радиационной теплопередачи — радиационный обмен теплом на поверхности. В общей модели необходимо решить оба уравнения одновременно, учитывая их соответствующие условия и граничные условия [10, 11].

2. Численное моделирование представленной модели. При численном решении представленной модели рассматривались два случая. В первом случае в модели в качестве источника тепла существует только один светодиод типа SMD2835 с размерами 3,5×2,8 мм и имеет параметры теплоемкости в 900 Дж/(кг·К), плотности 3000 кг/м³ теплопроводность 1 Вт/(м·К).

Во втором случае была рассмотрена модель с уже шестью светодиодами с аналогичными характеристиками, но расположенными в пределах границы бытовой светодиодной лампы типа «груша» с патроном E27 и диаметром 50 мм, граничные условия задавались так, чтобы модель сочетала в себе перечисленные аспекты тепловых характеристик светодиодной лампы типа E27.

При численном моделировании использовался метод конечных разностей для решения уравнения теплопроводности в переходный период на двумерной сетке, представляющей корпус светодиодной лампы. Геометрия корпуса светодиода, характеризующаяся размерами L_x и L_y , встраивалась в сетку модели:

$$\begin{cases} dx = \frac{L_x}{(n-1)} \\ dy = \frac{L_y}{(n-1)} \end{cases},$$

где n — количество точек сетки.

Начальная температура задавалась равной 25 °С, а для продвижения моделирования используется дискретный шаг по времени ($dt = 0,1$ с). Для дискретизации корпуса лампы используется сеточный подход со 100 точками сетки по каждому измерению.

При использовании метода конечных разностей распределение температуры в каждой точке сетки обновляется с учетом соседних точек и вклада источника тепла.

Результаты моделирования для одного светодиода в двумерном пространстве, ограниченном только сеткой модели, представлены на рис. 1.

Результаты моделирования для случая с шестью светодиодами, расположенными равноудаленно друг от друга и от центра лампы типа E27 диаметром 50 мм, представлены на рис. 2.

3. Результаты и обсуждение. Результаты моделирования дают полное представление о распределении температуры внутри светодиодных ламп, содержащих несколько SMD-светодиодов. Примечательно, что предсказания модели продемонстрировали отчетливые различия в температурных режимах, основанные на количестве светодиодов, присутствующих в конфигурации. В частности, модель дала результаты для сценария с шестью светодиодами SMD, показав максимальную температуру распределения приблизительно 97 °С. В отличие от этого, модель прогнозировала максимальную температуру в приблизительно 75 °С для корпуса с одним светодиодом.

Наблюдаемая разница в распределении температуры между сценариями с одним светодиодом

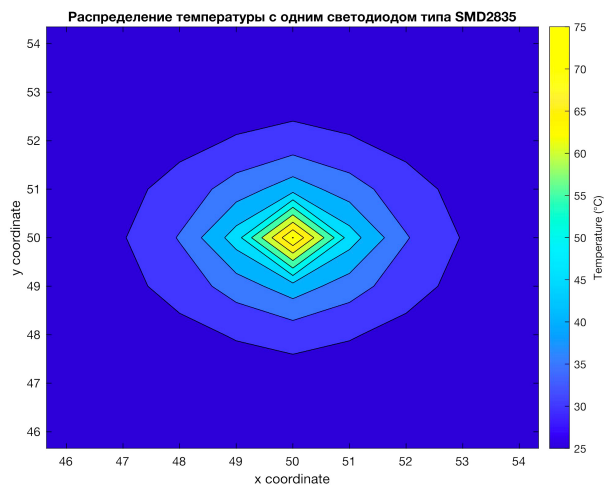


Рис. 1. Распределение температуры при численном решении разработанной модели в двумерном пространстве для одного светодиода

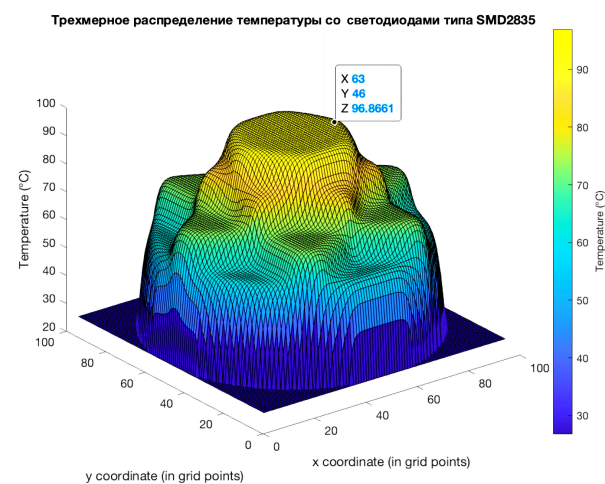


Рис. 2. Распределение температуры при численном решении разработанной модели в трехмерном пространстве для шести светодиодов

и сценариями с шестью светодиодами может быть объяснена несколькими взаимосвязанными факторами.

Совокупное тепло, выделяемое несколькими светодиодами, способствует повышению температуры. Пространственное расположение светодиодов влияет на рассеивание тепла, что приводит к локальным колебаниям температуры. Плотные расположенные светодиоды в системе лампы препятствуют эффективному отводу тепла, что приводит к более высоким температурам по сравнению со сценарием с одним светодиодом.

Также плотность тепловыделения вблизи светодиодов значительно выше в конфигурации с несколькими светодиодами. Эта концентрированная тепловая нагрузка усиливает температурные градиенты, приводя к более выраженным колебаниям температуры по всему корпусу светодиода. Таким образом модель учитывает взаимодействия между соседними светодиодами, которые влияют на общее распределение температуры. Теплопередача между светодиодами в сочетании с ограниченными путями отвода тепла приводит к распространению повышенных температур по всему корпусу. Каждый

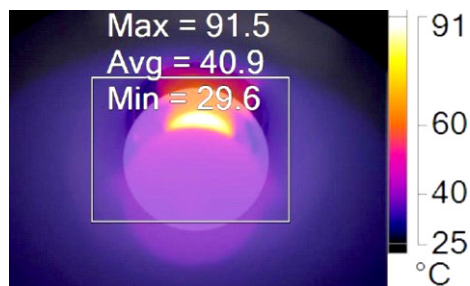


Рис. 3. Инструментальное измерение температурного распределения в бытовой светодиодной лампе мощностью 6,5 Вт с шестью светодиодами

светодиод создает вокруг себя локализованную горячую точку за счет своего тепловыделения. В системе с шестью светодиодами близость нескольких горячих точек усиливает их совокупное влияние на распределение температуры.

Численное решение разработанной модели показывает точность на уровне 93 %. Сравнение предсказаний модели с термограммой, полученной с помощью тепловизора Fluke tis 20 (рис. 3), подчеркивает обоснованность используемого вычислительного подхода [12].

Для конкретных случаев, требующих простого, но надежного подхода, предлагаемая модель предоставляет доступную альтернативу. Сложные схемы расположения светодиодов и граничных условий иногда могут быть сложными для настройки с помощью сложных вычислительных инструментов. В таких случаях простота модели в обращении с базовыми конфигурациями ускоряет процесс настройки моделирования, позволяя пользователям быстро определять параметры и инициировать моделирование.

Применение разработанной температурной модели для стандартизации и управления качеством продукции предполагает использование возможностей модели для обеспечения соответствия светодиодных ламп определенным температурным стандартам и критериям качества. Модель может быть использована для проверки соответствия вновь разработанной светодиодной лампы заданным температурным ограничениям в процессе эксплуатации. При вводе конструктивных параметров лампы, свойств материала и мощностных характеристик модель позволяет предсказать распределение температуры по лампе. Эта информация может быть сравнена с установленными стандартами для обеспечения соответствия.

В процессе производства модель может помочь в контроле качества путем моделирования распределения температуры для случайно выбранных образцов светодиодных ламп.

Это позволяет выявить лампы, существенно отклоняющиеся от ожидаемых температурных режимов. Лампы, превышающие допустимые температурные пороги, могут быть отмечены для дальнейшей проверки или настройки.

По сути, комплексная температурная модель служит виртуальным инструментом для оценки, оптимизации и обеспечения качества температурных характеристик светодиодных ламп. Интегрируя модель в различные этапы проектирования, производства и контроля качества, можно дополнительно контролировать тепловые общие эксплуатационные характеристики бытовых светодиодных ламп.

Заключение. Соответствие между выходными данными модели и эмпирическими данными подтверждает надежность и точность свойств модели и параметров моделирования. В контексте стандартизации и управления качеством продукции в светотехнической промышленности разработанная модель предлагает надежный инструмент для оценки тепловых характеристик бытовых светодиодных ламп при различных конфигурациях и условиях эксплуатации. Точность прогнозирования распределения температуры влияет на принятие обоснованных проектных решений для обеспечения соответствия своей продукции стандартам безопасности и эксплуатационных характеристик.

Разработанная модель дает важную информацию о сложных закономерностях распределения температуры внутри светодиодных ламп, содержащих несколько SMD-светодиодов. Отчетливые колебания температуры, наблюдаемые между различными конфигурациями светодиодов, подчеркивают важность тщательного теплового моделирования при проектировании светодиодов. В качестве исследовательского инструмента эта модель предлагает производителям путь к повышению качества продукции, оптимизации стратегий терморегулирования и вносит свой вклад в развитие энергоэффективных технологий освещения.

Интеграция данной модели в процессы управления качеством позволяет проверять светодиодную продукцию на соответствие определенным температурным показателям. Это облегчает выявление потенциальных горячих точек, зон чрезмерного нагрева и зон, подверженных риску выхода из строя из-за повышенных температур. Кроме того, этот вычислительный инструмент позволяет производить анализ оптимизации конструктивных параметров, таких как размещение светодиодов и конструкции теплоотвода, для повышения тепловой эффективности.

Поскольку индустрия освещения продвигается к повышению энергоэффективности и устойчивым практикам, разработанная вычислительная модель дает стратегическое преимущество при проектировании светодиодных изделий, которые работают оптимально, отвечают строгим требованиям к качеству и имеют увеличенный срок службы. Кроме того, универсальность модели в адаптации к различным конфигурациям светодиодов и условиям окружающей среды повышает ее применимость в широком спектре контекстов проектирования освещения.

Библиографический список

1. Cai M., Liang Z., Kunmiao T. [et al.]. Junction Temperature Prediction for LED Luminaires Based on a Subsystem-Separated Thermal Modeling Method // IEEE Access. 2019. P. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936924.
2. Wang C., Zhang Ch., Chen Q. [et al.]. Heat management of LED-based Cu₂O deposits on the optimal structure of heat sink // High Temperature Materials and Processes. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 20220277. DOI: 10.1515/htmp-2022-0277.
3. Huang Yi., Shen Sh., Li H. [et al.]. Numerical analysis on the thermal performances of different types of fin heat sink for high-power led lamp cooling // Thermal Science. 2019. Vol. 23. P. 625–636. DOI: 10.2298/TSCI170623233H.
4. Şahin N., Çiçek B. A. Numerical Analysis of Thermal Management for High Power LED Street Lights // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2018. Vol. 2. P. 1–12. DOI: 10.15623/ijret.2018.0702007.

5. Kuzmenko V. P., Solonyy S. V., Rysin A. V. Qualimetric Model of Heat Sinks of LED Lightning Devices Based on their Thermal Models // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2022. P. 1695–1697. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755619.
6. Orth T., Krahl M., Parlevliet P. P. [et al.]. Optical thermal model for LED heating in thermoset-automated fiber placement // Advanced Manufacturing Polymer & Composites Science. 2018. Vol. 4. P. 72–81. DOI: 10.1080/20550340.2018.1507798.
7. Бозриков А. В., Алексеев В. С., Ангонов И. Н. Современные проблемы производства энергоэффективных систем освещения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 1, № 3 (54). С. 80–84. EDN: PVMFZV.
8. Шириев Р. Р., Борисов А. Н., Валеев А. А. Об обеспечении теплового режима светодиодного источника света // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 3. С. 112–120. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-112-120. EDN: ZIJECR.
9. Кушнарев А. С., Макаров О. Ю. Методика обеспечения тепловых режимов радиоэлектронных устройств с мощными светодиодами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 3. С. 90–95. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.013. EDN: FGSIE.
10. Aladov A. V., Bulashevich K. A., Chernyakov A. E. [et al.]. Thermal resistance and nonuniform distribution of electroluminescence and temperature in high-power AlGaInN light-emitting diodes // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2015. № 2 (218). P. 74–83. DOI: 10.5862/JPM.218.7. EDN: TZGPAJ.
11. Аладов А. В., Белов И. В., Валюхов В. П. [и др.]. Исследование теплового режима в мощных светодиодных матрицах // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2018. Т. 11, № 3. С. 39–51. DOI: 10.18721/JPM.11304. EDN: YBRQVN.
12. Кузьменко В. П., Шишлаков В. Ф., Соленный С. В. [и др.]. Исследовательские испытания светодиодных источников света // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 632–640. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-632-640. EDN: PLVUMB.

КУЗЬМЕНКО Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники (№ 32) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург.
SPIN-код: 3159-4202
AuthorID (РИНЦ): 1111872
ORCID: 0000-0002-0270-4875
AuthorID (SCOPUS): 57215003337
Адрес для переписки: mr.konnny@gmail.com

Для цитирования

Кузьменко В. П. Комплексная модель распределения температуры для контроля тепловых характеристик бытовых светодиодных ламп // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 48–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-48-55.

Статья поступила в редакцию 19.08.2023 г.
© В. П. Кузьменко

COMPLEX TEMPERATURE DISTRIBUTION MODEL FOR CONTROLLING THE THERMAL PERFORMANCE OF HOUSEHOLD LED LAMPS

The study covers the question of the dynamics of heat transfer in a household LED lamp and scenarios for simplifying the modeling of thermal distribution, including the account of heat conduction, convection and the influence of several LED light sources. A comprehensive analysis of heat distribution processes in household LED lamps and the development of a mathematical model of the thermal radiation of an LED light source using the finite difference method are presented. The developed model takes into account the lamp geometry, material properties and environmental conditions. Special attention is paid to the influence of the location of the LEDs in the lamp system. The novelty of the study lies in the fact that the volumetric geometry of the lamp and light source, scenarios to account for various parameters of the model are included in the mathematical model. Verification of the model has shown accuracy up to 93 %. The study aims to create a more realistic and accurate method for modeling and analyzing thermal management in multilight LED household lighting fixtures.

Keywords: thermal radiation modeling, LED lamp thermal model, LED lighting fixture quality, LED lamp thermal management.

References

1. Cai M., Liang Z., Kunmiao T. [et al.]. Junction Temperature Prediction for LED Luminaires Based on a Subsystem-Separated Thermal Modeling Method // IEEE Access. 2019. P. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936924. (In Engl.).
2. Wang C., Zhang Ch., Chen Q. [et al.]. Heat management of LED-based Cu₂O deposits on the optimal structure of heat sink // High Temperature Materials and Processes. 2023. Vol. 42, no. 1. P. 20220277. DOI: 10.1515/htmp-2022-0277. (In Engl.).
3. Huang Yi., Shen Sh., Li H. [et al.]. Numerical analysis on the thermal performances of different types of fin heat sink for high-power led lamp cooling // Thermal Science. 2019. Vol. 23. P. 625–636. DOI: 10.2298/TSCI170623233H. (In Engl.).
4. Şahin N., Çiçek B. A Numerical Analysis of Thermal Management for High Power LED Street Lights // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2018. Vol. 2. P. 1–12. DOI: 10.15623/ijret.2018.0702007. (In Engl.).
5. Kuzmenko V. P., Solony S. V., Rysin A. V. Qualimetric Model of Heat Sinks of LED Lightning Devices Based on their Thermal Models // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2022. P. 1695–1697. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755619. (In Engl.).
6. Orth T., Krahl M., Parlevliet P. P. [et al.]. Optical thermal model for LED heating in thermoset-automated fiber placement // Advanced Manufacturing Polymer & Composites Science. 2018. Vol. 4. P. 72–81. DOI: 10.1080/20550340.2018.1507798. (In Engl.).
7. Bozrikov A. V., Alekseyev V. S., Antonov I. N. Sovremennyye problemy proizvodstva energoeffektivnykh sistem osveshcheniya [Modern problems of production energy efficient lighting systems] //

Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. *Vestnik of Saratov State Technical University*. 2011. Vol. 1, no. 3 (54). P. 80–84. EDN: PVMFZV. (In Russ.).

8. Shiriyev R. R., Borisov A. N., Valeyev A. A. Ob obespechenii teplovogo rezhima svetodiodnogo istochnika sveta [LED source of light with high light circuit] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2022. Vol. 24, no. 3. P. 112–120. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-112-120. EDN: ZIJECR. (In Russ.).

9. Kushnarev A. S., Makarov O. Yu. Metodika obespecheniya teplovykh rezhimov radioelektronnykh ustroystv s moshchnymi svetodiodami [Methodology of optimizing thermal regimes of radioelectronic devices with powerful LED] // Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019. Vol. 15, no. 3. P. 90–95. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.013. EDN: FGSIII. (In Russ.).

10. Aladov A. V., Bulashevich K. A., Chernyakov A. E. [et al.] Thermal resistance and nonuniform distribution of electroluminescence and temperature in high-power AlGaInN light-emitting diodes // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. *Physics and Mathematics*. 2015. No. 2 (218). P. 74–83. DOI: 10.5862/JPM.218.7. EDN: TZGPAJ. (In Engl.).

11. Aladov A. V., Belov I. V., Valyukhov V. P. [et al.]. Issledovaniye teplovogo rezhima v moshchnykh svetodiodnykh matritsakh [A Study of Thermal Regime in the High-Power LED Arrays] // Nauchno-Tekhnicheskiye Vedomosti Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politehnicheskogo Universiteta. *Fiziko-Matematicheskiye Nauki. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2018. Vol. 11, no. 3. P. 39–51. DOI: 10.18721/JPM.11304. EDN: YBRQVN. (In Russ.).

12. Kuzmenko V. P., Shishlakov V. F., Solenny S. V. [et al.]. Issledovatel'skiye ispytaniya svetodiodnykh istochnikov sveta [Research Tests of LED Light Sources] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, no. 7. P. 632–640. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-632-640. EDN: PLVUMB. (In Russ.).

KUZMENKO Vladimir Pavlovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electromechanics and Robotics (No. 32) Department, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg.
SPIN-code: 3159-4202

AuthorID (RSCI): 1111872
ORCID: 0000-0002-0270-4875
AuthorID (SCOPUS): 57215003337
Correspondence address: mr.konnny@gmail.com

For citations

Kuzmenko V. P. Complex temperature distribution model for controlling the thermal performance of household led lamps // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 48–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-48-55.

Received August 19, 2023.

© **V. P. Kuzmenko**

¹Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

²Научно-исследовательский институт интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ СТАНКОВ (ОБЗОР)

В данном обзоре приведена оценка влияния параметров режима лазерной закалки на шероховатость и твердость поверхности, глубину упроченного слоя, степень деформации, величину и знак остаточных напряжений, износостойкость. Представлено как скорость обработки, мощность излучения, температура нагрева поверхности, количество проходов при осуществлении лазерной закалки влияют на геометрические параметры зоны лазерного воздействия, шероховатость, твердость и износостойкость поверхности, деформацию, величину и знак остаточных напряжений в поверхностном слое. Сделано заключение в виде рекомендаций по подбору параметров режима лазерной закалки для получения заданного качества поверхности и поверхностного слоя деталей станков.

Ключевые слова: лазерная закалка, мощность излучения, зона лазерного воздействия, шероховатость, твердость, остаточные напряжения, износостойкость.

1. Введение. Основная тенденция современного машиностроения — это растущая потребность в повышении надежности и долговечности различного рода деталей машин, в том числе и станочных деталей. Для станочных деталей, к которым относятся линейные направляющие и ходовые винты, высокие требования к качеству поверхности и поверхностного слоя связаны, прежде всего, с высокой точностью их изготовления и возможностью сохранения рабочего состояния в течение длительного срока их эксплуатации.

Характерная особенность работы линейных направляющих и ходовых винтов — это неравномерное изнашивание вдоль рабочих поверхностей контактирующих деталей, которое вызывается неравномерностью нагрузки, скоростью перемещения, повторными нагрузками, попаданием в зону контакта посторонних частиц, что приводит к дополнительным деформациям, усталостному разру-

шению, возникновению процессов микрорезания и задирам.

Обеспечить высокую износостойкость и другие эксплуатационные свойства можно за счет применения современных методов поверхностного упрочнения. Одним из наиболее перспективных является лазерная закалка.

2. Анализ влияния основных параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя. Лазерная закалка (ЛЗ) — это процесс термической обработки, в котором используется лазер с плотностью мощности 10–100 МВт/м² в локализованной зоне нагрева [1, 2]. Применение этого процесса к стальным деталям и соединение его с технологией быстрой закалки, называемой мартенситной закалкой, позволяют повысить усталостную долговечность и ограничить деформацию стальных деталей [3–5]. Лазерный луч способен быстро повышать температуру поверх-

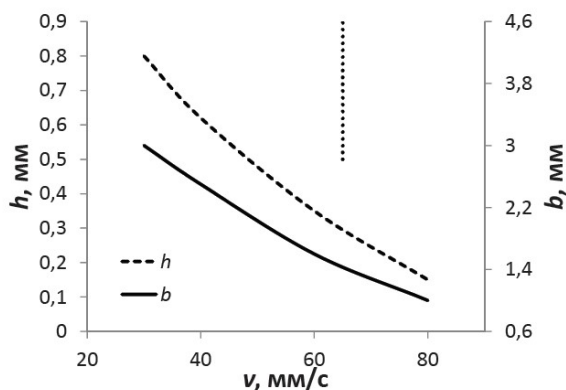


Рис. 1. Зависимость геометрических размеров ЗЛВ для стали 45 от скорости обработки

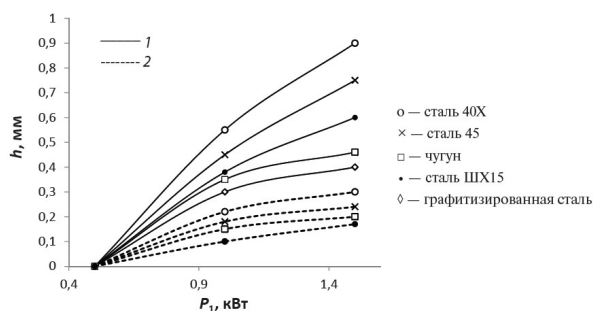


Рис. 2. Зависимость глубины ЗЛВ от мощности излучения: 1 — $v = 25$ мм/с; 2 — $v = 83$ мм/с

ности до температуры, превышающей температуру аустенизации. Этот интенсивный процесс нагрева позволяет преобразовать существующую микроструктуру поверхности до аустенита, а затем для получения очень тонкой мартенситной микроструктуры с твердостью 62–64 HRC [6]. Для получения однородного по своей твердости поверхностного слоя на деталях со сложной геометрией требуется специальная настройка параметров процесса лазерной закалки, таких как мощность лазера и скорость обработки [7–9]. Однородный по своей твердости поверхностный слой рекомендуется для равномерного распределения механических нагрузок. Этот слой получается за счет равномерного мартенситного слоя на поверхности закаленной детали. Однородный упрочненный слой позволяет избежать концентрации напряжений на твердом поверхностном слое деталей и ограничивает распространение трещин при периодических нагрузках, что повышает усталостную стойкость деталей [10–12].

В случае линейных направляющих и ходовых винтов однородный по своей твердости поверхностный слой может эффективно уменьшить износ, вызванный истиранием [13].

Основные результаты исследований зарубежных ученых, посвященных лазерной закалке, отражены в работах [1–18, см. также 19–40].

Из российских ученых, которые занимались оптимизацией технологического процесса лазерной закалки, можно выделить таких ученых, как Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н., Майоров В. С., Майоров С. В. и др. [41–48].

Анализируя многие из вышеперечисленных работ, следует устанавить, что наиболее значимыми

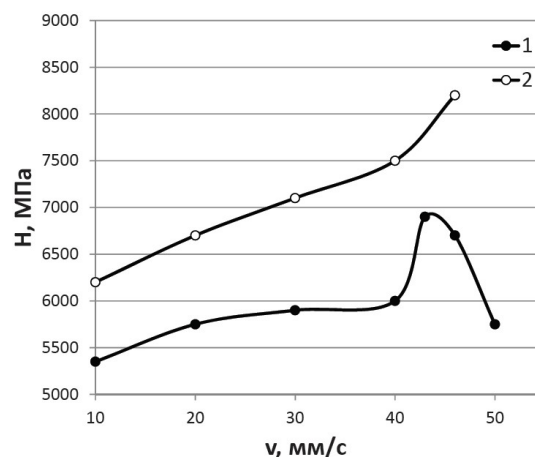


Рис. 3. Влияние скорости лазерной обработки на микротвердость различных слоев ЗЛВ нормализованной стали марки 35: 1 — верх, 2 — низ

параметрами режима лазерной закалки являются мощность излучения, Вт (с возможностью контроля температуры на поверхности, °С) и скорость обработки, м/мин.

В работе [48] представлено, как мощность и скорость обработки влияет на размеры зоны лазерного воздействия (ЗЛВ). В качестве источника лазерной энергии применялся газоразрядный CO_2 лазер. Результаты исследований представлены на рис. 1, рис. 2.

Основные выводы по этой работе такие:

- глубина и ширина ЗЛВ уменьшаются при увеличении скорости обработки и возрастают при увеличении мощности излучения;
- изменение глубины от скорости нелинейно;
- глубина ЗЛВ увеличивается при увеличении мощности излучения;
- для уменьшения возможности оплавления рекомендуется обработка с меньшей плотностью мощности при большем диаметре сканирующего пятна.

В этой же работе проиллюстрировано влияние скорости лазерной обработки на микротвердость различных слоев ЗЛВ нормализованной стали 35 (рис. 3).

Как видно из рис. 3, в интервале скоростей обработки от 10 до 40 мм/с (от 0,6 до 2,4 м/мин) имело место оплавление поверхности стали и видно, что при этом микротвердость в зоне оплавления непрерывно увеличивается. При увеличении скорости обработки (свыше 40 мм/с (2,4 м/мин)) оплавление исчезает и микротвердость возрастает до 7500 МПа. При дальнейшем увеличении скорости микротвердость верхней части ЗЛВ понижается. Очевидно, в этом случае в поверхностном слое образуется мартенсит с трооститной сеткой. Микротвердость мартенсита в нижней части ЗЛВ при увеличении скорости обработки непрерывно возрастает.

Особенно заметный рост микротвердости мартенситных участков наблюдается при увеличении скорости до 46 мм/с (2,76 м/мин), т.к. с увеличением скорости обработки диффузионное перераспределение углерода между избыточным ферритом и перлитными колониями замедляется. В результате при высокой скорости обработки мартенсит, образующийся на месте перлитных колоний, может иметь концентрацию углерода, близкую к эв-

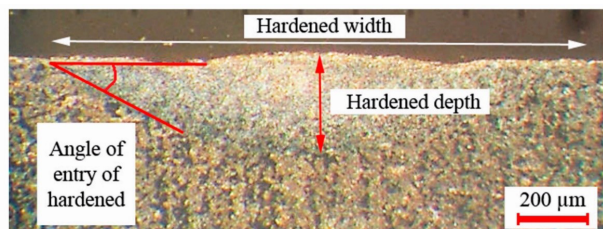


Рис. 4. Оптическое изображение ЗЛВ стали AISI 4130 после лазерной закалки с применением сканирующего луча

тектоидной. Это обуславливает его высокую твердость.

В случае лазерной закалки с применением сканирующего излучения, источником которого выступил Nd:YAG лазер модели IQL10, Raya Parto, научным коллективом авторов [19] изучалось влияние расположения фокальной плоскости, длительности импульса на ширину, глубину, угол входа ЗЛВ. Оптическое изображение микроструктуры ЗЛВ представлено на рис. 4. В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

— длительность импульса оказывает существенное влияние на процесс импульсного лазерного упрочнения поверхности;

— с увеличением длительности импульса глубина ЗЛВ увеличивается;

— при уменьшении положения фокальной плоскости увеличивается плотность лазерной энергии, что приводит к оплавлению поверхности и увеличению ширины, глубины и угла входа ЗЛВ.

Изучением влияния температуры нагрева обрабатываемой поверхности и скорости обработки занимались D. A. Lesyk, S. Martinez, V. V. Dzhemelinskyy, A. Lamikiz, B. N. Mordyuk, G. I. Prokopenko [20, 21]. В своих работах они анализировали, каким образом данные параметры режима ЛЗ влияют на глубину, ширину и твердость поверхности при обработке различных сталей.

Так, для стали AISI D2 [20] наиболее эффективными параметрами режима являются: удельная скорость закалки 90 мм/мин (0,09 м/мин); ширина сканирующей дорожки 10 мм; температура самозакалки $T_{hard} = 1270$ °С.

Для поиска оптимальных параметров режима ЛЗ стали AISI 1045 авторами работы [21] были получены уравнения регрессии для функции отклика глубины упрочнения (h_h), ширины упрочнения (b_h), угла упрочнения (α_h) и твердости поверхности (HRC):

$$h_h = 177,5 + 120A - 57,76B - 33,55AB + 45,83A^2 + 10B^2, \quad (1)$$

$$b_h = 9850,0 + 600,0A - 318,42B + 26,32AB - 83,33A^2 - 150,0B^2, \quad (2)$$

$$\alpha_h = 4,55 + 1,92A - 1,31B - 0,79AB + 0,03A^2, \quad (3)$$

$$HRC = 55,33 + 3,68A + 2,01B - 0,36AB - 3A^2 - 0,82B^2, \quad (4)$$

где A — температура нагрева, °С;
 B — скорость обработки, мм/мин [20].

Используя данные уравнения регрессии, можно при заданных значениях глубины упрочнения (h_h), ширины упрочнения (b_h), угла упрочнения (α_h) и твердости поверхности (HRC) рассчитать оптимальные параметры режима ЛЗ.

К примеру, для повышения производительности обработки рекомендуется вести обработку на более высоких скоростях без ущерба для качества обработанной поверхности.

Сами авторы работы [21] утверждают, что оптимальные режимы лазерной поверхностной закалки углеродистой стали AISI 1045 в отожжённом состоянии под действием сканирующего лазерного луча могут быть определены как находящиеся в диапазоне температур нагрева 1200–1300 °С и скорости обработки 70–90 мм/мин (0,07–0,09 м/мин). Эти оптимальные режимы процесса ЛЗ позволяют увеличить твердость в приповерхностном слое более чем в два раза по сравнению с необработанной поверхностью, обеспечивая увеличение глубины закалки до $h_h \approx 350$ мкм.

Режимы обработки для тел вращения, в частности для шлицевых валов, можно встретить в работе [22]. Авторы данной публикации применили статистический анализ для поиска оптимальных режимов закалки стали AISI 4340.

Авторы выбрали пять параметров, в которых варьируемыми факторами являются: мощность лазера (P), скорость сканирования лазерным лучом (S), скорость вращения шлицевого вала в процессе лазерного нагрева (R), угол наклона боковых поверхностей шлицев (A) и высота зубьев шлицев (D) (табл. 1). Полученные результаты показывают, что глубина закаленного слоя минимальна при параметрах режима обработки, представленного в опыте № 2: $P = 1900$ Вт, $S = 4$ мм/с, $R = 2000$ об/мин и $A = 15^\circ$) и максимальна при параметрах режима обработки (опыт № 9): $P = 2500$ Вт, $S = 2$ мм/с, $R = 2500$ об/мин и $A = 20^\circ$). Глубина закаленного слоя составляет 0,05 мм при вершине и 0,05 мм у корня зуба шлица (опыт № 2), в то время как глубина закаленного слоя составляет 0,95 мм при вершине и 0,45 мм у корня зуба шлица (опыт № 9).

Чтобы оценить глубину закаленного слоя у вершины (HT) и корня (HR) в зависимости от мощности лазера (P), скорости сканирования (S), скорости вращения (R), угла наклона боковой поверхности (A) и высоты зуба (D), авторы использовали метод линейной регрессии для определения адекватных коэффициентов уравнения в полиномиальной функции. После исключения несущественных коэффициентов полученные уравнения регрессии глубины закаленного слоя при вершине (HT) и корне (HR) зуба могут быть представлены в виде формул:

$$HT = -3,122 + 0,001717P + 0,3953S + 0,000065R + 0,00625A + 0,1373D + 0,03906S^2 - 0,000319PS - 0,0452SD, \quad (5)$$

$$HR = -0,981 + 0,000649P + 0,0680S + 0,000023R + 0,00375A + 0,01406S^2 - 0,000103PS. \quad (6)$$

Анализируя полученные уравнения регрессии, авторы сделали вывод, что увеличение мощности лазера и уменьшение скорости сканирования приводят к увеличению глубины закаленного слоя независимо от угла наклона зуба шлица (15° или 20°).

Результаты экспериментальных исследований в отношении изменения значений факторов в каждом опыте

№ опыта	P [Вт]	S [мм/с]	R [об/мин]	A [°]	D [мм]	HT [мм]	HR [мм]
1	1900	2	1500	15	2,5	0,20	0,15
2	1900	4	2000	15	3,0	0,05	0,05
3	2200	6	2500	15	3,0	0,05	0,10
4	2500	4	1500	15	3,5	0,20	0,20
5	2200	2	2000	15	3,5	0,60	0,30
6	2500	4	1500	15	3,0	0,25	0,20
7	1900	6	1500	15	3,0	0,05	0,05
8	1900	4	2500	15	2,5	0,05	0,05
9	2500	2	2500	20	3,0	0,95	0,45
10	2200	4	1500	20	2,5	0,15	0,15
11	1900	6	1500	20	3,5	0,05	0,10
12	1900	4	2000	20	3,0	0,05	0,10
13	1900	2	1500	20	3,0	0,20	0,15
14	1900	4	2500	20	3,5	0,05	0,10
15	2500	6	2000	20	2,5	0,10	0,15
16	2200	4	1500	20	3,0	0,15	0,15

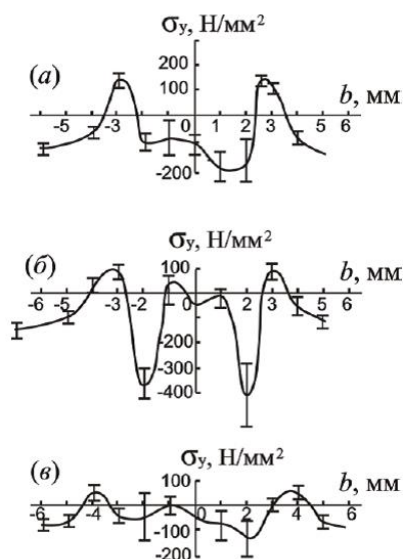


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений σ_y на поверхности стали У8 в зависимости от расстояния от центра полосы при обработке со скоростью $v = 2$ м/мин и различной мощностью: (а) — 1 кВт; (б) — 2 кВт; (в) — 3 кВт

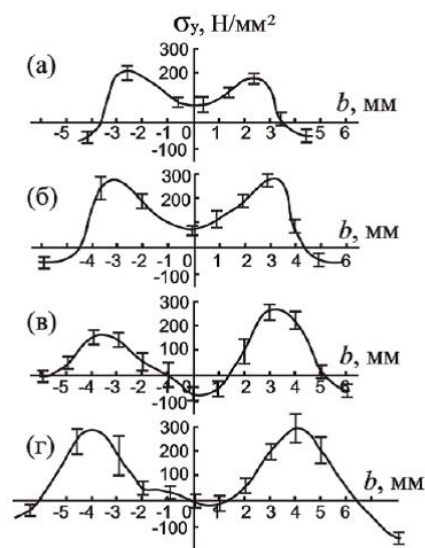


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений σ_y на поверхности технического железа в зависимости от расстояния от центра полосы при обработке со скоростью $v = 2$ м/мин и различной мощностью: (а) — 0,9 кВт; (б) — 1,3 кВт; (в) — 2 кВт; (г) — 3 кВт

Полученные уравнения регрессии вполне могут быть применены для определения оптимальных режимов ЛЗ деталей типа тел вращения.

Исследованию многопроходной ЛЗ посвящена работа [23]. Авторы исследовали поведение стали марки AISI 4140 с различными условиями термообработки. Научным коллективом была проведена многопроходная ЛЗ с 1, 2, 4, 8 и 16 проходами для изучения влияния многоцикловых тепловых нагрузок на модификацию материала. Были реализованы две схемы многопроходного лазерного упрочнения путем применения лазера мощностью 1500 Вт для поддержания постоянной максимальной температуры поверхности 1170 °С.

Авторами было установлено:

— с увеличением количества проходов возрастает максимальная температура обрабатываемой поверхности;

— существует тенденция к повышению твердости в упрочненной зоне и глубины упрочненного слоя после 16 проходов;

— остаточные напряжения на поверхности уменьшаются с увеличением количества проходов.

Изучением деформаций и остаточных напряжений на поверхности сталей, закаленных непрерывным лазерным излучением, занимались такие ученые, как В. С. Майоров и др. [45–47]. При лазерной обработке сплавов наблюдается большая

неравномерность распределения температуры, что приводит к значительной структурной неоднородности по толщине и ширине ЗЛВ. Это может вызвать значительную неоднородность распределения остаточных напряжений по толщине и ширине ЗЛВ и привести к деформации изделий.

Анализ результатов исследования показал, что при повышении мощности излучения изменяется не только величина напряжений в центре полосы, но и характер их распределения в поперечном направлении. Так, при мощности излучения $P = 1$ кВт распределение остаточных напряжений на стали У8 (рис. 5) подобно их распределению для технического железа (рис. 6в). При $P = 2$ кВт форма кривой распределения остаточных напряжений сильно усложняется: в центре полосы оплавления напряжения практически равны нулю, по краям наблюдаются минимумы, соответствующие $\sigma_y = -370 \dots -410$ Н/мм², а на границе ЗЛВ с необлученной поверхностью вновь наблюдаются участки с небольшими растягивающими напряжениями. Возникновение максимума в центре оплавленной полосы можно связать с возможностью самоотпуска, а также с увеличением количества остаточного аустенита. При $P = 3$ кВт зона оплавления имеет большие геометрические размеры, а кривая распределения остаточных напряжений поперек полосы проходит около нулевых значений с небольшим отклонением по обе стороны.

Величина и знак остаточных напряжений на поверхности упрочненных лазером полос зависят от соотношения объемных изменений, обусловленных чисто тепловым воздействием, и структурными превращениями.

Образование в процессе охлаждения достаточно насыщенного углеродом мартенсита приводит к формированию в центре полосы сталей 45, 40Х, У8 сжимающих остаточных напряжений. Уменьшение содержания углерода в мартенсите приводит к уменьшению объемного эффекта при охлаждении и доли сжимающих напряжений на поверхности. В структуре легированных сталей ХВГ и Р18 наблюдается большое количество остаточного аустенита, и объемный эффект за счет мартенситного превращения понижается. Это приводит к тому, что на поверхности этих сталей после лазерной обработки преобладают растягивающие напряжения.

Все это, по мнению авторов, приводит к деформации длинномерных образцов и требует подбора режимов ЛЗ, обеспечивающих минимально допустимые значения деформации в каждом конкретном случае.

Результаты исследований влияния процесса ЛЗ на износостойкость можно найти в работах [24–40]. Основное заключение из этих работ то, что ЛЗ приводит снижению износа рабочих поверхностей образцов в 1,5–2 раза и снижению коэффициента трения на 20–25 % по сравнению с исходными образцами.

Влияние ЛЗ на шероховатость поверхности описано в работе [49].

Исследования шероховатости на профилометре были проведены на необработанных и обработанных зонах до и после использования газа аргона. Для каждого образца были получены параметры шероховатости. На рис. 7 представлены результаты определения шероховатости, полученные для различных образцов. Параметр шероховатости R_a является одним из наиболее анализируемых и соответствует

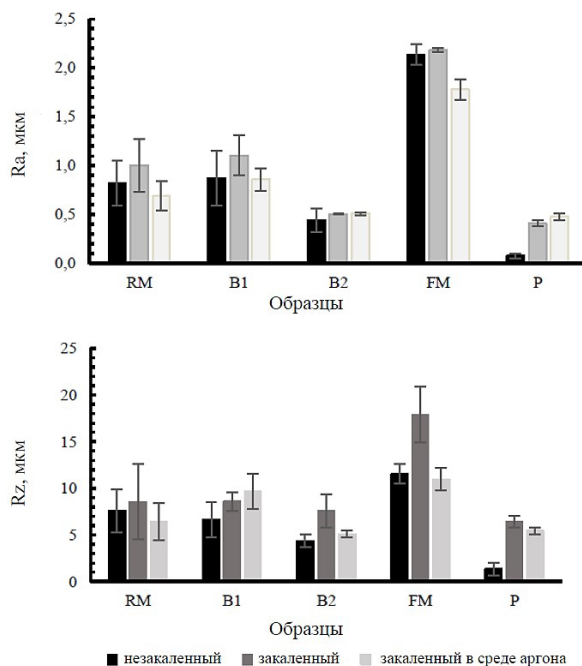


Рис. 7. Параметры шероховатости образцов: RM — грубое фрезерование, B1 — обработка щеткой за один проход; B2 — обработка щеткой за три прохода, FM — чистовое фрезерование, P — полирование

среднему арифметическому высот поверхности образца. R_z — максимальная высота профиля шероховатости.

Исходя из результатов, приведенных на рис. 7, можно сделать вывод, что параметр шероховатости R_a увеличивается на поверхности всех образцов после ЛЗ без применения защитной среды. Такое же поведение наблюдается и для параметра шероховатости R_z , все образцы показали незначительное увеличение шероховатости.

Сравнивая результаты, полученные в экспериментах с применением защитной среды — аргона и без него, можно сделать вывод, что в целом увеличение шероховатости наблюдается не во всех образцах, за исключением образцов после ЛЗ с применением защитной среды.

3. Заключение. Параметры режима лазерной закалки оказывают значительное влияние на состояние поверхности и поверхностного слоя после данного вида упрочняющей обработки. В значительной степени на качество поверхности и поверхностного слоя оказывают влияние параметры режима лазерной закалки, такие как скорость обработки, мощность излучения.

В качестве рекомендаций по подбору параметров режима лазерной закалки можно предложить режимы, обеспечивающие снижение шероховатости, получение высокой твердости и глубины упрочненного слоя, минимальные деформации обработанных деталей.

Так, для получения минимальных значений шероховатости необходимо проводить лазерную закалку с применением защитной среды в виде инертных газов, что практически исключает появление оксидных пленок на закаленной поверхности.

Для повышения твердости и глубины упрочненного слоя необходимо проводить лазерную закалку с оптимальной скоростью обработки и возможно большими значениями мощности излучения, избегая при этом оплавления поверхности.

Максимальное снижение деформации обеспечивается подбором значений скорости и мощности излучения в каждом конкретном случае и во многом зависит от сечения обрабатываемой заготовки.

Благодарности

Благодарим компанию Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. за поддержку при проведении экспериментов, приведенных в данной статье.

Библиографический список

- Zhang T., Li L., Liang F., Yang B. Parameter optimization of laser die-surface hardening using the particle swarm optimization technique // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 36. P. 1104–1112. DOI: 10.1007/s00170-007-0929-8.
- Sun P., Li S., Yu G. [et al.]. Laser surface hardening of 42CrMo cast steel for obtaining a wide and uniform hardened layer by shaped beams // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70. P. 787–796. DOI: 10.1007/s00170-013-5292-3.
- Yilbas B. S., Akhtar S. S., Keles O. Laser cutting of small diameter hole in aluminum foam // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79. P. 101–111. DOI: 10.1007/s00170-015-6789-8.
- Alvarenga H. D., van de Putte T., van Steenberghe N. [et al.]. Influence of carbide morphology and microstructure on the kinetics of superficial decarburization of C-Mn steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. Vol. 46. P. 123–133. DOI: 10.1007/s11661-014-2600-y.
- Fakir R., Barka N., Brousseau J. Case study of laser hardening process applied to 4340 steel cylindrical specimens using simulation and experimental validation // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 11. P. 15–25. DOI: 10.1016/j.csite.2017.12.002.
- Erdem M., Altug M., Karabulut M. Investigation of mechanical, microstructural, and machining properties of AISI 420 martensitic stainless steel welded by laser welding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 85. P. 481–492. DOI: 10.1007/s00170-015-7924-2.
- Barka N., Bocher P., Brousseau J. Sensitivity study of hardness profile of 4340 specimen heated by induction process using axisymmetric modeling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 2747–2756. DOI: 10.1007/s00170-013-5212-6.
- Safeen W., Hussain S., Wasim A. [et al.]. Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 87. P. 1765–1781. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.12.025.
- Fakir R., Barka N., Brousseau J. Servo-control applied to the parameters of the laser hardening process for a regular case depth of 4340 steel cylindrical specimen // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2019. Vol. 19, № 3. DOI: 10.1115/1.4042918.
- Nassef G. A., Elkhatib A., Yakout M. Analysis of a failed rocker arm shaft of a passenger car engine // *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 5–6. P. 10–14. DOI: 10.1016/j.csefa.2016.01.001.
- Rafi H. K., Starr T. L., Stucker B. E. A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 1299–1309. DOI: 10.1007/s00170-013-5106-7.
- Fakir R., Barka N., Brousseau J. [et al.]. Analysis of the mechanical behavior of AISI 4340 steel cylindrical specimens heat treated with fiber laser // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 55. P. 41–56. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.039.
- Prime M. B., Sebring R. J., Edwards J. M. [et al.]. Laser surface-contouring and spline data-smoothing for residual stress measurement // *Experimental Mechanics*. 2004. Vol. 44. P. 176–184. DOI: 10.1007/BF02428177.
- Sun Y., Hao M. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser // *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. Vol. 50. P. 985–995. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.01.018.
- Lambiase F., di Ilio A. M., Paoletti A. Prediction of laser hardening by means of neural network // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 12. P. 181–186. DOI: 10.1016/j.procir.2013.09.032.
- Bailey N. S., Shin Y. C. Optimization of laser hardening processes for industrial parts with complex geometry via predictive modeling // In *Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, October 4–7, 2009. West Lafayette, USA, 2009. P. 647–656.
- Babu P. D., Buvanashakaran G., Balasubramanian K. R. Experimental studies on the microstructure and hardness of laser transformation hardening of low alloy steel // *Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 241–258. DOI: 10.1139/tcsme-2012-0018.
- Lusquinos F., Conde J. C., Bonss S. [et al.]. Theoretical and experimental analysis of high power diode laser (HPDL) hardening of AISI 1045 steel // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 254. P. 948–954. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.07.200.
- Giuseppe C., Mahmoud M., Mojtaba K. M. [et al.]. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser // *Materials*. 2019. Vol. 12 (19). DOI: 10.3390/ma12193136.
- Lesyk D. A., Martinez S., Dzhemelinskyy V. V. [et al.]. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 278. P. 108–120. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.07.049.
- Lesyk D. A., Martinez S., Mordyuk B. N. [et al.]. Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045 // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 111. P. 424–438. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.09.030.
- Barka N., Sattarpanah Karganroudi S., Fakir R. [et al.]. Effects of Laser Hardening Process Parameters on Hardness Profile of 4340 Steel Spline – An Experimental Approach // *Coatings*. 2020. Vol. 10, no. 4. DOI: 10.3390/coatings10040342.
- Lu Y., Meyer H., Radet T. Multi-cycle phase transformation during laser hardening of AISI 4140 // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 94. P. 919–923. DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.073.
- Zhikai C., Qinghai Z., Jing W. [et al.]. Behaviors of 40Cr steel treated by laser quenching on impact abrasive wear // *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 103. P. 118–125. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.01.039.
- Ozan Y., Suat Y. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels // *Tribology International*. 2017. Vol. 119. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.006.
- Baykara T., Keskin N. Effects of Laser Hardening Treatment on the Wear Properties of the Vanadis 4 Extra and Vanadis 10 Tool Steels // *Int. J. Metall. Met. Phys*. 2019. Vol. 4. DOI: 10.35840/2631-5076/9229.
- Martinez S., Lamikiz A., Ukar E. [et al.]. Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process // *Optics and Lasers in Engineering*. 2017. Vol. 90. P. 72–80. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.005.
- Li M., Chen X., Beibei Z., Rui Y. [et al.]. Comparison on the microstructure, bending properties and tribological behaviors of rail materials treated by laser dispersed quenching and induction assisted laser dispersed quenching // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 410. 126936. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126936.

29. Bakhtiari M., Fayazi K. A., Farnia A. Improving the Wear Properties of AISI 4130 Steel Using Laser Surface Hardening Treatment // Arab. J. Sci. Eng. 2023. Vol. 48. P. 11801–11818. DOI: 10.1007/s13369-022-07551-5.
30. Park C., Kim J., Sim A. [et al.]. Influence of diode laser heat treatment and wear conditions on the fretting wear behavior of a mold steel // Wear. 2019. Vol. 434–435. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202961.
31. Telasang G., Dutta Majumdar J. [et al.]. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel // Surface and Coatings Technology. 2015. Vol. 261. P. 69–78. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.058.
32. Lei S., Liu Q.cK., Liu Y.cP. [et al.]. Wear behavior of laser-hardened GCr15 steel under lubricated sliding conditions // Materials Science Forum. 2009. Vol. 628–629. P. 697–702. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.628-629.697.
33. Kaul R., Ganesh P., Tiwari P. [et al.]. Characterization of dry sliding wear resistance of laser surface hardened En 8 steel // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 167. P. 83–90. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.09.085.
34. Roy S., Zhao J., Shrotriya P. [et al.]. Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel // Tribology International. 2017. Vol. 112. P. 94–102. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.03.036.
35. Yazici O., Yilmaz S. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels // Tribology International. 2018. Vol. 119. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.006.
36. Baykara T., Keskin N. Effects of laser hardening treatment on the wear properties of the vanadis 4 extra and vanadis 10 tool steels // International Journal of Metallurgy and Metal Physics. 2019. Vol. 4. P. 1–9. DOI: 10.35840/2631-5076/9229.
37. Bambirra de Oliveira R. J., Mota de Siqueira R. H., Fernandes de Lima M. S. Microstructure and wear behaviour of laser hardened SAE 4130 steels // International Journal of Surface Science and Engineering. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 161–170. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2018.10012334.
38. Chen C., Feng A., Liu B. [et al.]. Effect of quench-tempering and laser quenching on the microstructure and properties of high-chromium cast iron // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 9. P. 2759–2773. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.06.022.
39. Feng A., Wei Y., Liu B. [et al.]. Microstructure and mechanical properties of composite strengthened high-chromium cast iron by laser quenching and laser shock peening // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 20. P. 4342–4355. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.08.148.
40. Lesyk D. A., Martinez S., Mordyuk B. N. [et al.]. Combining laser transformation hardening and ultrasonic impact strain hardening for enhanced wear resistance of AISI 1045 steel // Wear. 2020. Vol. 462–463. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203494.
41. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н., Майоров В. С. [и др.]. Распределение остаточных напряжений на поверхности сталей, упрочненных непрерывным СО₂-лазером // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 9. С. 45–49.
42. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология. В 7 т. Т. 3. Методы поверхностной лазерной обработки. Москва: Высшая школа, 1987. 192 с.
43. Рыкалин Н. Н. [и др.]. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. Москва: Машиностроение, 1985. 496 с.
44. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология. В 7 т. Т. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов. Москва: Высшая школа, 1988. 159 с.
45. Майоров В. С., Майоров С. В. Закалка чугуновых деталей излучением твердотельного лазера // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 3 (645). С. 6–8.
46. Майоров В. С., Майоров С. В., Стернин М. Ю. Компьютерные системы поддержки принятия решений для ла-

зерных технологических процессов обработки материалов // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. Москва: Физматлит, 2009. С. 494–506.

47. Майоров В. С., Сафонов А. Н., Тарасенко В. М. Исследование структуры и свойств сплавов при лазерной обработке и разработка технологии упрочнения промышленных изделий // Применение лазеров в народном хозяйстве: Всесоюз. конф., 17–20 мая 1985 г. Звенигорода, 1985. С. 156–157.

48. Майсурадзе М. В., Рыжков М. А., Корниенко О. Ю. [и др.]. Индукционная и лазерная термическая обработка стальных изделий. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2022. 92 с. ISBN 978-5-7996-3544-2. EDN NTXZGS.

49. Lagarinhos J. N., Santos S., Miranda G. [et al.]. The influence of surface finishing on laser heat treatments of a tool steel // Procedia CIRP. 2022. Vol. 108. P. 839–844. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.129.

ПЕТРОЧЕНКО Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск; старший инженер-исследователь Научно-исследовательского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика.
SPIN-код: 3294-1488

AuthorID (РИНЦ): 648136
ORCID: 0000-0001-5600-835X
AuthorID (SCOPUS): 57983962200
ResearcherID: A-8009-2014

ХАО Цинлэ, доктор философских наук, заместитель директора отдела «Институт передового производства» Научно-исследовательского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика.
AuthorID (SCOPUS): 56237276500

ЮЙ Синьшань, инженер-исследователь отдела «Институт передового производства» Научно-исследовательского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика.
ORCID: 0009-0003-4899-1018

ЧЖАО Кайпэн, инженер-исследователь отдела «Институт передового производства» Научно-исследовательского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО «Китайская национальная группа машиностроительных институтов», г. Нинбо, Китайская Народная Республика.
ORCID: 0009-0005-2149-9159

Для цитирования

Петrochenko С. В., Хао Ц., Юй С., Чжао К. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков (обзор) // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 56–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-56-65.

Статья поступила в редакцию 06.09.2023 г.
© С. В. Петrochenko, Ц. Хао, С. Юй, К. Чжао

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF LASER QUENCHING MODE PARAMETERS ON THE QUALITY OF THE SURFACE AND SURFACE LAYER OF MACHINE PARTS (OVERVIEW)

This review provides an assessment of the influence of the parameters of the laser hardening mode on the quality of the surface and the surface layer. It is presented how the processing speed, radiation power, surface heating temperature, initial structure during, the number of passes laser hardening affect the geometric parameters of the laser exposure zone, roughness, hardness and wear resistance of the surface, deformation, magnitude and sign of residual stresses in the surface layer. The conclusion is made in the form of recommendations on the selection of parameters of the laser hardening mode to obtain a given surface quality and surface layer of machine parts.

Keywords: laser hardening, radiation power, laser exposure zone, roughness, hardness, residual stresses, wear resistance.

Acknowledgements

Thanks to Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. for providing support for the experiments of this paper.

References

1. Zhang T., Li L., Liang F., Yang B. Parameter optimization of laser die-surface hardening using the particle swarm optimization technique // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol. 36. P. 1104–1112. DOI: 10.1007/s00170-007-0929-8. (In Engl.).
2. Sun P., Li S., Yu G. [et al.]. Laser surface hardening of 42CrMo cast steel for obtaining a wide and uniform hardened layer by shaped beams // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70. P. 787–796. DOI: 10.1007/s00170-013-5292-3. (In Engl.).
3. Yilbas B. S., Akhtar S. S., Keles O. Laser cutting of small diameter hole in aluminum foam // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79. P. 101–111. DOI: 10.1007/s00170-015-6789-8. (In Engl.).
4. Alvarenga H. D., van de Putte T., van Steenberghe N. [et al.]. Influence of carbide morphology and microstructure

on the kinetics of superficial decarburization of C-Mn steels // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. Vol. 46. P. 123–133. DOI: 10.1007/s11661-014-2600-y. (In Engl.).

5. Fakir R., Barka N., Brousseau J. Case study of laser hardening process applied to 4340 steel cylindrical specimens using simulation and experimental validation // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018. Vol. 11. P. 15–25. DOI: 10.1016/j.csite.2017.12.002. (In Engl.).

6. Erdem M., Altug M., Karabulut M. Investigation of mechanical, microstructural, and machining properties of AISI 420 martensitic stainless steel welded by laser welding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 85. P. 481–492. DOI: 10.1007/s00170-015-7924-2. (In Engl.).

7. Barka N., Bocher P., Brousseau J. Sensitivity study of hardness profile of 4340 specimen heated by induction process using axisymmetric modeling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 2747–2756. DOI: 10.1007/s00170-013-5212-6. (In Engl.).

8. Safeen W., Hussain S., Wasim A. [et al.]. Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

2016. Vol. 87. P. 1765–1781. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.12.025. (In Engl.).
9. Fakir R., Barka N., Brousseau J. Servo-control applied to the parameters of the laser hardening process for a regular case depth of 4340 steel cylindrical specimen // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2019. Vol. 19, no. 3. DOI: 10.1115/1.4042918. (In Engl.).
10. Nassef G. A., Elkhatib A., Yakout M. Analysis of a failed rocker arm shaft of a passenger car engine // *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 5–6. P. 10–14. DOI: 10.1016/j.csefa.2016.01.001. (In Engl.).
11. Rafi H. K., Starr T. L., Stucker B. E. A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 1299–1309. DOI: 10.1007/s00170-013-5106-7. (In Engl.).
12. Fakir R., Barka N., Brousseau J. [et al.]. Analysis of the mechanical behavior of AISI 4340 steel cylindrical specimens heat treated with fiber laser // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 55. P. 41–56. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.039. (In Engl.).
13. Prime M. B., Sebring R. J., Edwards J. M. [et al.]. Laser surface-contouring and spline data-smoothing for residual stress measurement // *Experimental Mechanics*. 2004. Vol. 44. P. 176–184. DOI: 10.1007/BF02428177. (In Engl.).
14. Sun Y., Hao M. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser // *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. Vol. 50. P. 985–995. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.01.018. (In Engl.).
15. Lambiase F., di Ilio A.M., Paoletti A. Prediction of laser hardening by means of neural network // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 12. P. 181–186. DOI: 10.1016/j.procir.2013.09.032. (In Engl.).
16. Bailey N. S., Shin Y. C. Optimization of laser hardening processes for industrial parts with complex geometry via predictive modeling // *In Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, October 4–7, 2009. West Lafayette, USA, 2009. P. 647–656. (In Engl.).
17. Babu P. D., Buvanashakaran G., Balasubramanian K. R. Experimental studies on the microstructure and hardness of laser transformation hardening of low alloy steel // *Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 241–258. DOI: 10.1139/tcsme-2012-0018. (In Engl.).
18. Lusquinos F., Conde J. C., Bonss S. [et al.]. Theoretical and experimental analysis of high power diode laser (HPDL) hardening of AISI 1045 steel // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 254. P. 948–954. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.07.200. (In Engl.).
19. Giuseppe C., Mahmoud M., Mojtaba K. M. [et al.]. Experimental and Numerical Study of AISI 4130 Steel Surface Hardening by Pulsed Nd:YAG Laser // *Materials*. 2019. Vol. 12 (19). DOI: 10.3390/ma12193136. (In Engl.).
20. Lesyk D. A., Martinez S., Dzhemelinsky V. V. [et al.]. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 278. P. 108–120. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.07.049. (In Engl.).
21. Lesyk D. A., Martinez S., Mordyuk B. N. [et al.]. Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045 // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 111. P. 424–438. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.09.030. (In Engl.).
22. Barka N., Sattarpanah Karganroudi S., Fakir R. [et al.]. Effects of Laser Hardening Process Parameters on Hardness Profile of 4340 Steel Spline — An Experimental Approach // *Coatings*. 2020. Vol. 10, no. 4. DOI: 10.3390/coatings10040342. (In Engl.).
23. Lu Y., Meyer H., Radel T. Multi-cycle phase transformation during laser hardening of AISI 4140 // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 94. P. 919–923. DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.073. (In Engl.).
24. Zhikai C., Qinghai Z., Jing W. [et al.]. Behaviors of 40Cr steel treated by laser quenching on impact abrasive wear // *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 103. P. 118–125. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.01.039. (In Engl.).
25. Ozan Y., Suat Y. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels // *Tribology International*. 2017. Vol. 119. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.006. (In Engl.).
26. Baykara T., Keskin N. Effects of Laser Hardening Treatment on the Wear Properties of the Vanadis 4 Extra and Vanadis 10 Tool Steels // *Int. J. Metall. Met. Phys.* 2019. Vol. 4. DOI: 10.35840/2631-5076/9229. (In Engl.).
27. Martinez S., Lamikiz A., Ukar E. [et al.]. Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process // *Optics and Lasers in Engineering*. 2017. Vol. 90. P. 72–80. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.005. (In Engl.).
28. Li M., Chen X., Beibei Z., Rui Y. [et al.]. Comparison on the microstructure, bending properties and tribological behaviors of rail materials treated by laser dispersed quenching and induction assisted laser dispersed quenching // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 410. 126936. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126936. (In Engl.).
29. Bakhtiari M., Fayazi K. A., Farnia A. Improving the Wear Properties of AISI 4130 Steel Using Laser Surface Hardening Treatment // *Arab. J. Sci. Eng.* 2023. Vol. 48. P. 11801–11818. DOI: 10.1007/s13369-022-07551-5. (In Engl.).
30. Park C., Kim J., Sim A. [et al.]. Influence of diode laser heat treatment and wear conditions on the fretting wear behavior of a mold steel // *Wear*. 2019. Vol. 434–435. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202961. (In Engl.).
31. Telasang G., Dutta Majumdar J. [et al.]. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 261. P. 69–78. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.058. (In Engl.).
32. Lei S., Liu Q.cK., Liu Y.cP. [et al.]. Wear behavior of laser-hardened GCr15 steel under lubricated sliding conditions // *Materials Science Forum*. 2009. Vol. 628–629. P. 697–702. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.628-629.697. (In Engl.).
33. Kaul R., Ganesh P., Tiwari P. [et al.]. Characterization of dry sliding wear resistance of laser surface hardened En 8 steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 167. P. 83–90. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.09.085. (In Engl.).
34. Roy S., Zhao J., Shrotriya P. [et al.]. Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel // *Tribology International*. 2017. Vol. 112. P. 94–102. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.03.036. (In Engl.).
35. Yazici O., Yilmaz S. Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels // *Tribology International*. 2018. Vol. 119. P. 222–229. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.006. (In Engl.).
36. Baykara T., Keskin N. Effects of laser hardening treatment on the wear properties of the vanadis 4 extra and vanadis 10 tool steels // *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*. 2019. Vol. 4. P. 1–9. DOI: 10.35840/2631-5076/9229. (In Engl.).
37. Bambirra de Oliveira R. J., Mota de Siqueira R. H., Fernandes de Lima M. S. Microstructure and wear behaviour of laser hardened SAE 4130 steels // *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 161–170. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2018.10012334. (In Engl.).
38. Chen C., Feng A., Liu B. [et al.]. Effect of quench-tempering and laser quenching on the microstructure and properties of high-chromium cast iron // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 9. P. 2759–2773. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.06.022. (In Engl.).
39. Feng A., Wei Y., Liu B. [et al.]. Microstructure and mechanical properties of composite strengthened high-chromium cast iron by laser quenching and laser shock peening // *Journal*

of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 20. P. 4342–4355. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.08.148. (In Engl.).

40. Lesyk D. A., Martinez S., Mordiyuk B. N. [et al.]. Combining laser transformation hardening and ultrasonic impact strain hardening for enhanced wear resistance of AISI 1045 steel // *Wear*. 2020. Vol. 462–463. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203494. (In Engl.).

41. Grigoryants A. G., Safonov A. N., Mayorov V. S. [et al.]. Raspredeleniye ostatochnykh napryazheniy na poverkhnosti staley, uprochnennykh nepreryvnym SO₂-lazerom [Distribution of residual stresses on the surface of steels hardened with a continuous CO₂ laser] // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. Metallology and Heat Treatment of Metals*. 1987. No. 9. P. 45–49. (In Russ.).

42. Grigoryants A. G., Safonov A. N. Lazernaya tekhnika i tekhnologiya. V 7 t. T. 3. Metody poverkhnostnoy lazernoy obrabotki [Laser technology and technology. In 7 vols. Vol. 3. Methods of surface laser processing]. Moscow, 1987. 192 p. (In Russ.).

43. Rykalin N. N. [et al.]. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: spravochnik [Laser and electron beam processing of materials: handbook]. Moscow, 1985. 496 p. (In Russ.).

44. Grigoryants A. G., Safonov A. N. Lazernaya tekhnika i tekhnologiya. V 7 t. T. 6. Osnovy lazernogo termouprochneniya splavov [Laser technology and technology In 7 vols. Vol. 6. Fundamentals of laser thermal hardening of alloys]. Moscow, 1988. 159 p. (In Russ.).

45. Mayorov V. S., Mayorov S. V. Zakalka chugunnykh detaley izlucheniym tverdotel'nogo lazera [Hardening of cast iron parts by solid-state laser radiation] // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. Metallology and Heat Treatment of Metals*. 2009. No. 3 (645). P. 6–8. (In Russ.).

46. Mayorov V. S., Mayorov S. V., Sternin M. Yu. Komp'yuternyye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy dlya lazernykh tekhnologicheskikh protsessov obrabotki materialov [Computer decision support systems for laser technological processes of materials processing] // *Lazernyye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennyye problemy fundamental'nykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok* [Laser technologies of materials processing: modern problems of fundamental research and applied developments] / Ed. by V. Ya. Panchenko. Moscow, 2009. P. 494–506. (In Russ.).

47. Mayorov V. S., Safonov A. N., Tarasenko V. M. Issledovaniye struktury i svoystv splavov pri lazernoy obrabotke i razrabotka tekhnologii uprochneniya promyshlennykh izdeliy [Investigation of the structure and properties of alloys during laser processing and development of technology for hardening industrial products] // *Primeneniye lazerov v narodnom khozyaystve. Application of Lasers in the National Economy*. May 17–20, 1985. Zvenigorod, 1985. P. 156–157. (In Russ.).

48. Maisuradze M. V., Ryzhkov M. A., Kornienko O. Yu. [et al.]. Induktsionnaya i lazernaya termicheskaya obrabotka

stal'nykh izdeliy [Induction and laser heat treatment of steel products]. Yekaterinburg, 2022. 92 p. ISBN 978-5-7996-3544-2. EDN: NTXZGS. (In Russ.).

49. Lagarinhos J. N., Santos S., Miranda G. [et al.]. The influence of surface finishing on laser heat treatments of a tool steel // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 108. P. 839–844. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.129. (In Engl.).

PETROCHENKO Sergei Valeryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Technologies of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock Department, Omsk State Transport University, Omsk; Senior Research Engineer Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, People's Republic of China.

SPIN-code: 3294-1488

AuthorID (RSCI): 648136

ORCID: 0000-0001-5600-835X

AuthorID (SCOPUS): 57983962200

ResearcherID: A-8009-2014

HAO Qingle, Doctor of Philosophy Sciences, Deputy Director of Institute of Advanced Manufacturing Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, People's Republic of China.

AuthorID (SCOPUS): 56237276500

YU Xinshan, Research Engineer of Institute of Advanced Manufacturing Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, People's Republic of China.

ORCID: 0009-0003-4899-1018

ZHAO Kaipeng, Research Engineer of Institute of Advanced Manufacturing Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Institute Group, Ningbo, People's Republic of China.

ORCID: 0009-0005-2149-9159

For citations

Petrochenko S. V., Hao Q., Yu X., Zhao K. Evaluation of the influence of laser quenching mode parameters on the quality of the surface and surface layer of machine parts (overview) // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 56–65. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-56-65.

Received September 6, 2023.

© S. V. Petrochenko, Q. Hao, X. Yu, K. Zhao

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОДАТЛИВОСТИ СТОЛА КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА ПОД НАГРУЗКОЙ

В статье представлен метод оценки динамической податливости стола координатно-расточного станка с учетом деформаций несущей системы станка при воздействии периодических сил. Вибровозбудитель в виде электродвигателя с несбалансированным ротором позволяет моделировать динамическую нагрузку, эквивалентную процессу фрезерования по параметрам модуля сил резания и частоты воздействия, исключая применение СОЖ и стружкообразование. Приведенный метод может быть применен для определения предельных режимов резания и участков рабочей зоны станка, обеспечивающих необходимую жесткость и точность обработки.

Ключевые слова: обрабатываемые центры, точность обработки, точность фрезерования, жесткость несущей системы, динамика привода, ballbar.

1. Введение. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) играют ключевую роль в современной промышленности, обеспечивая высокую точность и эффективность в процессе обработки различных материалов. Исследование запаса виброустойчивости узлов станка при позиционировании и перемещениях под нагрузкой является актуальной задачей в области машиностроения и производства. Стол координатно-расточного станка является одной из его основных компонентов и выполняет роль опоры для приспособлений и заготовки во время обработки. Под воздействием динамической нагрузки стол испытывает различные смещения и деформации, что негативно сказывается на точности обработки [1].

Неблагоприятные параметры процесса резания могут привести к вибрациям, своего рода самовозбуждающимся неустойчивым колебаниям с большими нарастающими амплитудами. Высокие амплитуды вибрации в процессе фрезерования приводят к ухудшению поверхности заготовки, повышенному износу инструмента и повышенному шуму. В худшем случае эти вибрации могут привести к обширной доработке или браковке заготовки, особенно для деталей низкой жесткости и для станков со значительным износом шарико-винтовых передач. Чтобы преодолеть проблемы с вибрацией, многие операторы выполняют фрезерование тонкостенных заготовок с очень консервативными режимами резания, такими как уменьшенная скорость подачи, глубина резания и ширина резания. Однако это снижает скорость съема материала, что приводит к менее эффективному процессу обработки [2]. Существует множество работ, которые исследуют динамические характеристики передач винт-гайка качения, широко эксплуатируемые в приводах металлорежущих станков [3–5].

Общая тенденция станкостроения в области повышения точности станков состоит в стремлении компенсировать любые машинные ошибки. Для этого необходимо знать техническое состояние каждой машины в настоящий момент времени. Существует множество различных тестов состояния станков с ЧПУ, которые были стандартизированы, например, испытания с помощью лазерного интерферометра и телескопического датчика. Тест с лазерным трекером обычно используется для определения всего векторного пространства объемной погрешности и генерации таблицы коррекций [6]. Поскольку подобные проверки занимают достаточно много времени и требуют наличия специального измерительного оборудования, а требуемая коррекция зависит от внешних параметров [7], то многие предприятия не проводят таких работ при стандартном обслуживании станков.

Испытание с помощью телескопического датчика представляет собой лучшую практическую альтернативу, но дает лишь частичную информацию о состоянии машины.

Учеными предложены множество методов испытаний станков с прибором ballbar, позволяющие расширить результаты за счет позиционных или траекторных вариаций [8]. Они отличаются оборудованием, стоимостью, длительностью и типом результатов.

II. Цель исследования. В данной статье была поставлена следующая цель: исследование зависимости величины колебаний стола координатно-расточного станка от скорости контурной подачи и модуля силового гармонического воздействия. Понимание этих зависимостей и факторов, влияющих на упругие деформации, позволят разработчикам станков и инженерам улучшить конструкцию стола и оптимизировать параметры его работы, такие как точ-

ность и производительность, а также снизить количество бракованных изделий.

Для достижения данной цели будет проведено экспериментальное исследование, включающее в себя нагружение стола вибрационной периодической нагрузкой и измерение деформаций в радиальном направлении при перемещении по круговым траекториям.

III. Основная часть. В качестве измерительного устройства для контроля точности круговых перемещений станков с ЧПУ используют телескопический датчик с двумя сферическими шарнирами на конце согласно пункту 6.633 ГОСТ Р ИСО 230-1-2010. В данной работе был применен прибор Renishaw Ballbar QC-20W, который обладает точностью измерения $\pm 0,5$ мкм. Этот прибор оснащен встроенным пьезодатчиком и программным обеспечением, позволяющим выделить множество элементарных погрешностей при перемещении по круговым траекториям. Программное обеспечение прибора Renishaw Ballbar QC-20W обеспечивает возможность обнаружения различных погрешностей, таких как люфты в системе шарико-винтовой передачи (ШВП) и направляющих, неперпендикулярность осей, рассогласование приводов и другие неточности [9]. При перемещении по круговым траекториям пьезодатчик регистрирует динамически изменяющийся радиус и анализирует множество элементарных погрешностей, которые могут влиять на точность оборудования. Использование такого измерительного устройства и метода [10] позволяет более детально и точно анализировать геометрическую точность станка под действием различных факторов и нагрузок, что способствует улучшению процесса обработки и повышению точности исполнения траекторий.

Именно радиальная составляющая отклонений при круговой интерполяции создает ключевую погрешность, определяющую размерную точность и шероховатость поверхности в различных точках рабочего пространства металлорежущего станка. Поэтому максимальное радиальное перемещение определяет размерную точность и шероховатость поверхности обрабатываемой детали в различных точках рабочего пространства металлорежущего станка. Чем больше радиальное перемещение, тем больше радиальная составляющая погрешности при круговой интерполяции и тем менее точным будет размер обрабатываемой на станке детали.

В приводе подачи шарико-винтовая передача преобразует вращающееся движение сервопривода в линейное движение. Во время фрезерования возникающие силы передаются через элементы ШВП на корпусные детали станка. Поэтому такие характеристики, как осевая жесткость ШВП и их элементов качения, имеют существенное значение для эксплуатационного поведения станка [11].

Статическая нагрузка может в некоторых случаях устранить существующий люфт в шарико-винтовых передачах, люфт, который при нормальных условиях обработки будет устранен за счет воздействия сил резания на конструкцию [12]. Однако нагрузка, создаваемая статически, не эквивалентна реальным силам резания.

Применение программной коррекции позволяет повысить точность позиционирования и перемещений только для ненагруженных состояний, что нехарактерно для любого металлорежущего оборудования. Активная программная коррекция ГОСТ ISO/TR 16907-2017 требует точной и акту-

альной информации о состоянии оборудования, включая его геометрические параметры и динамические характеристики, может привести к небольшим движениям осей, которые неподвижны без коррекции, например, при коррекции отклонения от прямолинейности. Программная коррекция может быть ограничена в своей способности стабилизировать быстропротекающие физические процессы в оборудовании, такие как колебания вследствие износа деталей или деформации конструкции [13]. Снижение точности позиционирования из-за нелинейности трения и деформации муфт и шпинделя приводит к ошибкам слежения и некачественному формообразованию поверхности [14].

Изменение мгновенных значений силы резания при фрезеровании во времени происходит не по синусоидальному закону, а характеризуется более сложными закономерностями и имеет доминирующие частоты. В рамках данной работы используется нагрузочное устройство, создающее приближенное вынуждающее инерционное силовое воздействие на несущую систему станка в виде вращающегося вектора сил. Такой подход позволяет создать условия, близкие к процессу резания, и исследовать динамическую податливость стола станка под этой эквивалентной нагрузкой с учетом имеющихся зазоров (рис. 1).

Для контроля выбран станок модели 2431СФ10, оснащенный системой ЧПУ «Маяк-600», который обладает значительным износом элементов привода и механизмами демпфирования. Испытания оборудования, имеющего механизмы демпфирования или фиксации осей, целесообразно производить в условиях внешнего инерционного силового нагру-

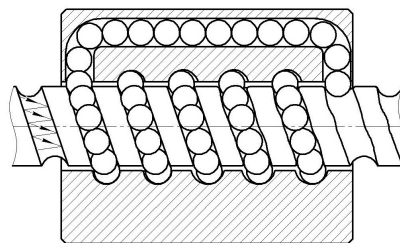


Рис. 1. Схема изменения вектора нагрузки в ШВП при знакопеременной нагрузке; конструктивные изменения, связанные с износом шарико-винтовой пары

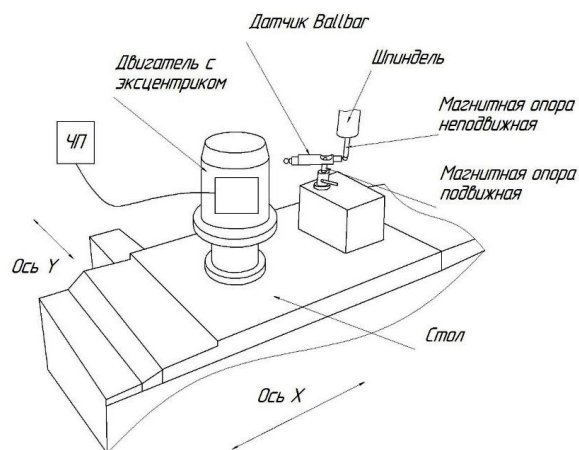
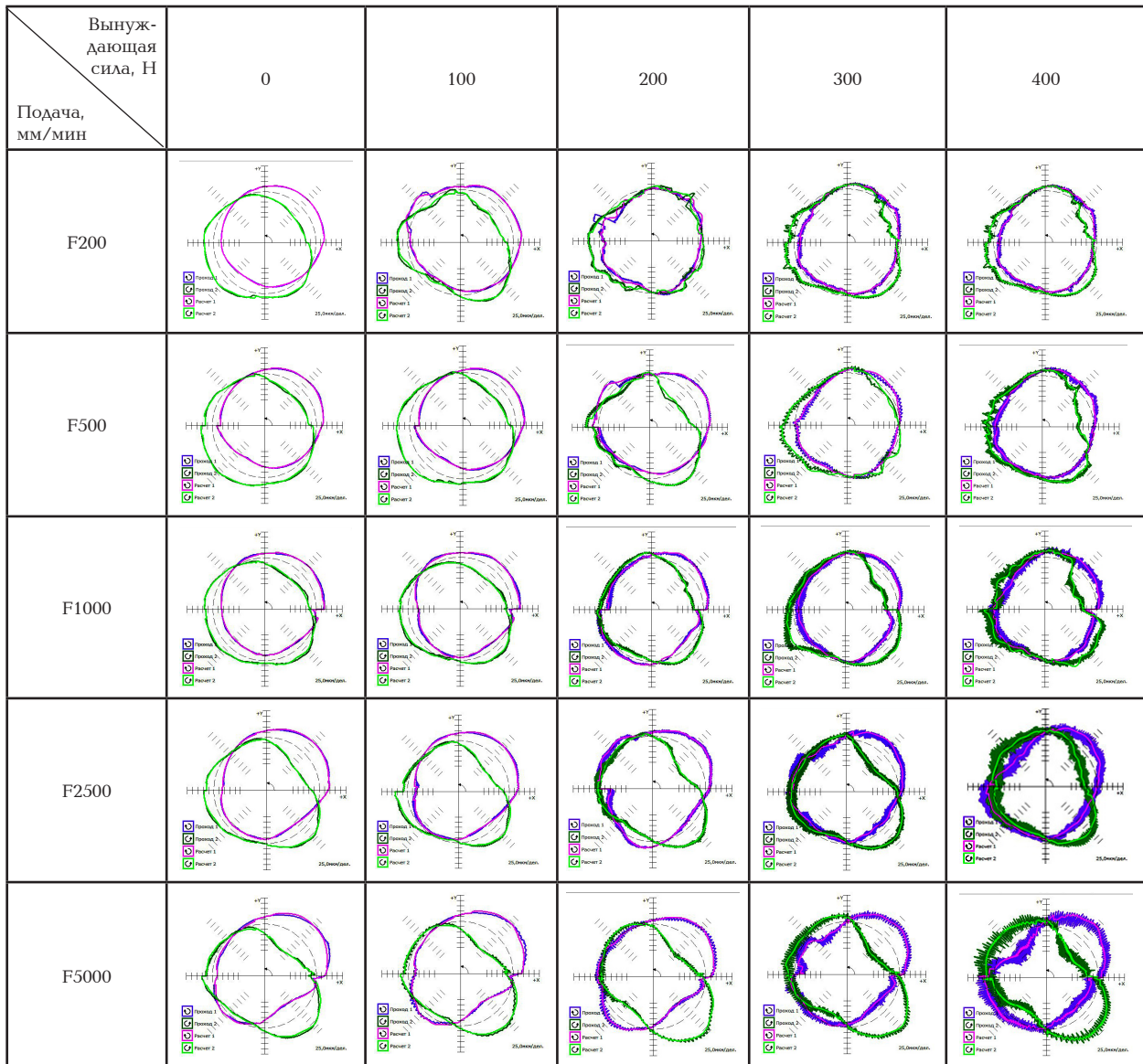


Рис. 2. Схема измерения виброустойчивости при нагружении вибрацией стола координатно-расточного станка

Изменение результата диагностики в зависимости от подачи и вынуждающей силы



жения по представленному выше методу. При этом необходимо документировать условия нагружения, активные коррекции в системе ЧПУ, позиции узлов станка, прогрева оборудования и температурных условий окружающей среды. Проведение экспериментов с различными массами груза и частотами вращения шпинделя позволяет определить влияние этих параметров на деформации стола и его поведение под нагрузкой.

Предлагаемая схема установки (рис. 2), которая позволяет создать периодические вынужденные колебания, имитирующие процесс фрезерования, и измерить амплитуду виброперемещений. Перемещение по круговой траектории задействует сразу две оси X и Y, что позволяет выявить наиболее устойчивые к нагрузке положения подвижного крестового стола. Использование круговой диаграммы под действием нагрузки является эффективным методом для определения отклонений и анализа точности оборудования при обработке материалов. В соответствии с известными алгоритмами [15, 16] данная диаграмма позволяет визуализировать ряд отклонений, описанных ранее.

Для создания инерционного силового воздействия используется вибровозбудитель, включающий в себя жестко закрепленный на столе корпус с трехфазным электродвигателем со статически неуравновешенным ротором, подключенным через частотный преобразователь. На конце вала этого двигателя эксцентрично установлен сборный груз переменной массы. Таким образом, вибрационная нагрузка, приближенная к процессу резания, передается на стол станка. Масса груза и плечо (расстояние от оси вращения до центра массы) могут быть подобраны экспериментально, учитывая равенство амплитуд и частот, возникающих в процессе резания колебаний.

Неуравновешенность вращающегося ротора создает динамический дисбаланс, который при вращении вызывает центробежную силу. Величина центробежной силы, которая действует на груз и вызывает вынужденные колебания, рассчитывается по формуле:

$$F_{ц} = m \cdot \varepsilon \cdot \omega^2 = 4\pi^2 \cdot m \cdot \varepsilon \cdot f^2, \quad (1)$$

Таблица 2

Размах виброперемещений в зависимости от вынуждающей силы и подачи

Вынуждающая сила, Н \ Подача, мм/мин	0	50	100	200	300	400
200	1	2	5	8	10	15
500	1	1	3	10	24	25
1000	1	2	10	8	30	30
2500	2	5	17	25	35	45
5000	8	10	16	30	45	60

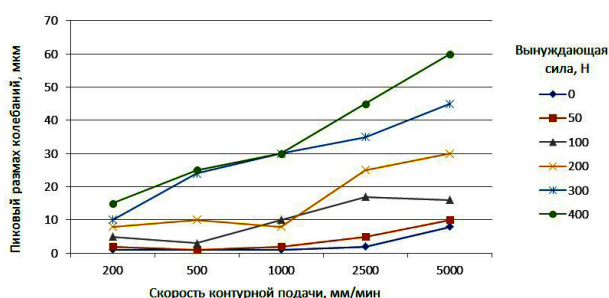


Рис. 3. График зависимости максимальной амплитуды вынужденных колебаний от скорости подачи по окружности

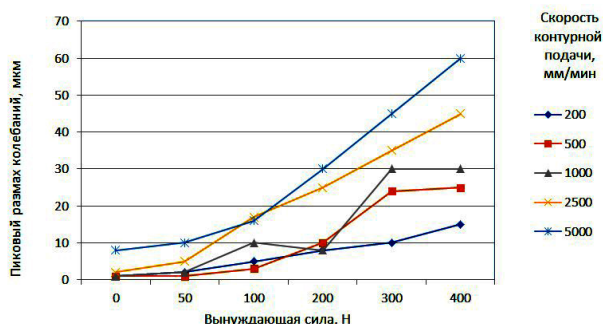


Рис. 4. График зависимости максимальной амплитуды вынужденных колебаний от модуля вынуждающей силы

где m — неуравновешенная масса, кг; ε — эксцентриситет, м; ω — угловая скорость, рад/с; f — частота вращения шпинделя, Гц.

Диапазон контурной подачи для предоставления наиболее широкого спектра результатов для всех возможных типов обработки был выбран в диапазоне 200 – 5000 мм/мин. Пять значений частоты вынуждающего воздействия, устанавливаемые на частотном преобразователе, позволяют по формуле 1 получить центробежную силу со значениями 0, 100, 200, 300 и 400 Н.

В табл. 1 приведены 25 результатов измерений координатно-расточного станка по представленному методу испытаний при изменении значений контурной подачи и модуля силы, создающей имитирующие вынужденные колебания. Остальные параметры диагностики оставались неизменными.

Значения отклонений были получены при изучении результатов в программе прибора Renishaw Ballbar QC-20W и внесены в табл. 2. Главным контролируемым параметром было максимальное отклонение, что позволяет упростить сравнение, повысить скорость исследования и изучить наибольшие смещения, которые могут вызвать отбраковку детали.

Полученная картина фактической точности станка под нагрузкой предоставляет ценную информацию для анализа влияния состояния оборудования на точность выполнения траекторий при обработке. Она позволяет визуализировать запас устойчивости упругой системы станка в рабочем пространстве в процессе, имитирующем обработку, и позволяет принять соответствующие меры для оптимизации процесса обработки и повышения точности исполнения траекторий.

Кроме того, на основе такой картины можно определить эффективные пределы корректирующих воздействий для системы числового программного управления металлорежущих станков и другого технологического оборудования. Такие корректировки могут быть введены для компенсации отклонений и повышения точности обработки, исходя из полученных данных о фактической точности станка под нагрузкой.

Основная особенность в том, что вместе с увеличением центробежной силы увеличивается размах колебаний (рис. 3), а при увеличении контурной подачи искажается средняя линия, а также несколько изменяется размах колебаний (рис. 4).

На графике зависимости пикового размаха колебаний (в микрометрах) от скорости контурной подачи (в миллиметрах в минуту) и вынуждающей силы (в Ньютонах) (рис. 3), наибольшая величина пикового размаха колебаний наблюдается при максимальной вынуждающей силе, которая составила в эксперименте 400 Н и скорости контурной подачи 5000 мм/мин.

Из графика зависимости максимальной амплитуды вынужденных колебаний от модуля вынуждающей силы при различных скоростях контурной подачи (рис. 4) можно заметить, что при увеличении вынуждающей силы увеличивается и пиковый размах колебаний. В то же время для каждой вынуждающей силы существует определенная скорость контурной подачи, при которой пиковый размах колебаний будет минимальным. При скоростях контурной подачи более 1000 мм/мин при увеличении вынуждающей силы пиковый размах колебаний существенно увеличивается, что указывает на определенные ограничения в процессе обработки материала при таких условиях.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что оптимальная скорость контурной подачи для исследуемого станка составляет 500 мм/мин, так как пиковый размах колебаний не превышает 25 микрометров. Улучшению при применении программной коррекции подвергается преимущественно геометрическая точность, но уменьшить динамическую податливость привода средствами программной коррекции невозможно.

VI. Выводы.

1. Представленный метод позволяет измерить и оценить фактическое влияние состояния станка на динамическую податливость двух линейных осей при круговом движении под воздействием нагрузки, имитирующей силы резания при фрезеровании, в том числе с учетом активной программной коррекции и механизмов вибродемпфирования, а так-

же проводить сравнительные испытания состояния и жесткости различных единиц технологического оборудования.

2. Проведение многофакторных исследований позволяет прогнозировать ожидаемую амплитуду виброперемещений для конкретного станка в настоящий момент времени с учетом различий в силах резания и скоростях подачи и участка рабочего пространства. Исходя из результатов испытаний, под действием вынуждающей силы более 100 Н и при скорости подачи более 1000 мм/мин существенно увеличивается смещение элементов привода станка.

Библиографический список

1. Luo B. A method to predict position-dependent structural natural frequencies of machine tool // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 92. P. 72–84. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.02.009.
2. Maslo S., Menezes B., Kienast P. [et al.]. Improving dynamic process stability in milling of thin-walled workpieces by optimization of spindle speed based on a linear parameter-varying model // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 93. P. 850–855. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.092.
3. Brecher C., Altstadter H., Daniels M. Axis position dependent dynamics of multi-axis milling machines // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 31. P. 508–514. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.068.
4. Бушуев В. В., Новиков В. А. Определение приведенных коэффициентов демпфирования элементов привода подач станков с передачей винт–гайка качения // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2016. № 4 (39). С. 22–26.
5. Deng C., Liu Y., Zhao J. Analysis of the machine tool dynamic characteristics in manufacturing space based on the generalized dynamic response model // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 1–14. DOI: 10.1007/s00170-017-0201-9.
6. Телешевский В. И., Соколов В. А., Пимушкин Я. И. Повышение точности многокоординатных технологических и измерительных систем на основе лазерной коррекции объемных геометрических погрешностей // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2018. № 4 (47). С. 99–104.
7. Телешевский В. И., Пимушкин Я. И., Соколов В. А. Влияние нагрузок на лазерную коррекцию объемной точности многокоординатных технологических и измерительных систем // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2020. № 2 (53). С. 8–13.
8. Woźniak M., Majda P. Reproducibility of machine tools' circularity test according to ISO 230-4 with respect to testing position // *Archives of Mechanical Technology and Materials*. 2017. Vol. 37. P. 22–26. DOI: 10.1515/amt-2017-0003.
9. Blokhin D. A., Popov A. Yu. Investigation of the causes of shape deviations in contour milling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260 (3). P. 032007-1–032007-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032007.
10. Пат. 2794584 С1 Российская Федерация, МПК G 01 M 13/00, B 23 Q 17/00. Способ диагностики точности металлорежущего станка под нагрузкой / Блохин Д. А., Попов А. Ю. № 2022109724; заявл. 12.04.22; опубл. 21.04.23.
11. Brecher C., Falker J., Eber B. [et al.]. Modelling of ball screw drives rolling element contact characteristics // *CIRP Annals*. 2018. Vol. 67 (1). DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.109.
12. Archenti A., Nicolescu M., Casterman G. [et al.]. A new method for circular testing of machine tools under loaded condition // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 1 (1). P. 575–580. DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.002.
13. Givi M., Mayer J. R. R. Optimized volumetric error compensation for five-axis machine tools considering relevance and compensability // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2015. Vol. 12. P. 44–55. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.09.002.
14. Guo C., Chen L., Ding J. A novel dynamics model of ball-screw feed drives based on theoretical derivations and deep learning // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 141. P. 196–212. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.07.011.
15. Блохин Д. А., Попов А. Ю., Нуртдинов Ю. Р., Дроздов И. Н. Способ контроля виброустойчивости стола вертикально-фрезерного станка // *Инновационное и цифровое машиностроение: материалы Всерос. науч.-техн. конф., Уфа, 07–09 апреля 2021 года. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2021. С. 263–268.*
16. Блохин Д. А., Дроздов И. Н. Составление карты точности перемещений стола фрезерного станка под нагрузкой // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2021. № 4 (59). С. 53–56.

БЛОХИН Дмитрий Андреевич, старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 5142-6237
AuthorID: 869045
ORCID: 0000-0001-6197-435X
AuthorID (SCOPUS): 56503655400
ResearcherID: A-8621-2017
Адрес для переписки: blohin.da@mail.ru
МИХАЙЛОВ Игорь Сергеевич, студент гр. КТО-214 Машиностроительного института ОмГТУ, г. Омск.
Адрес для переписки: mik3d@mail.ru

Для цитирования

Блохин Д. А., Михайлов И. С. Исследование динамической податливости стола координатно-расточного станка под нагрузкой // *Омский научный вестник*. 2024. № 1 (189). С. 66–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-66-72.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.

© Д. А. Блохин, И. С. Михайлов

THE STUDY OF THE DYNAMIC DISPLACEMENT OF THE TABLE OF A JIG BORING MACHINE UNDER LOAD

The article presents a technique for evaluation dynamic flexibility of the vertical milling machine table, considering the deformations of the supporting system of the machine under the influence of forces equivalent to cutting forces. The vibration exciter in the form of an electric motor with an unbalanced rotor makes it possible to simulate a dynamic load equivalent to the milling process in terms of the modulus of cutting forces and impact frequency, excluding the use of coolant and chip formation. A setup has been developed to create an equivalent dynamic load on the machine tool. The proposed technique can be used to determine the cutting limits and the locality of the working area of the machine that provide the greatest rigidity and processing accuracy.

Keywords: CNC machine tools, milling accuracy, supporting system rigidity, feed drive system dynamics, ballbar.

References

1. Luo B. A method to predict position-dependent structural natural frequencies of machine tool // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 92. P. 72–84. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2015.02.009. (In Engl.).
2. Maslo S., Menezes B., Kienast P. [et al.]. Improving dynamic process stability in milling of thin-walled workpieces by optimization of spindle speed based on a linear parameter-varying model // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 93. P. 850–855. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.092. (In Engl.).
3. Brecher C., Altstadter H., Daniels M. Axis position dependent dynamics of multi-axis milling machines // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 31. P. 508–514. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.068. (In Engl.).
4. Bushuev V. V., Novikov V. A. Opredeleniye privedennykh koeffitsiyentov dempfirovaniya elementov privoda podach stankov s peredachey vint-gayka kacheniya [Determination of the reduced damping coefficients of the feed drive elements of machine tools with a rolling screw-nut transmission] // *Vestnik MGTU Stankin*. 2016. Vol. 4 (39). P. 22–26. (In Russ.).
5. Deng C., Liu Y., Zhao J. Analysis of the machine tool dynamic characteristics in manufacturing space based on the generalized dynamic response model // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 1–14. DOI: 10.1007/s00170-017-0201-9. (In Engl.).
6. Teleshevskiy V. I., Sokolov V. A., Pimushkin Ya. I. Povysheniye tochnosti mnogokoordinatnykh tekhnologicheskikh i izmeritel'nykh sistem na osnove lazernoy korrektsii ob'yemnykh geometricheskikh pogreshnostey [Improving the Accuracy of Multi-Axis Technological and Measuring Systems Based on Laser Correction of Volumetric Geometric Errors] // *Vestnik MGTU Stankin*. *Vestnik MSUT «Stankin»*. 2018. Vol. 4 (47). P. 99–104. (In Russ.).
7. Teleshevskiy V. I., Pimushkin Ya. I., Sokolov V. A. Vliyaniye nagruzok na lazernuyu korrektsiyu ob'yemnoy tochnosti mnogokoordinatnykh tekhnologicheskikh i izmeritel'nykh sistem [Influence of Loads on Laser Correction of Volumetric Accuracy of Multi-Axis Technological and Measuring Systems] // *Vestnik MGTU Stankin*. *Vestnik MSUT «Stankin»*. 2020. Vol. 2 (53). P. 8–13. (In Russ.).
8. Woźniak M., Majda P. Reproducibility of machine tools' circularity test according to ISO 230-4 with respect to testing position // *Archives of Mechanical Technology and Materials*. 2017. Vol. 37. P. 22–26. DOI: 10.1515/amt-2017-0003. (In Engl.).
9. Blokhin D. A., Popov A. Yu. Investigation of the causes of shape deviations in contour milling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260 (3). P. 032007-1–032007-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032007. (In Engl.).
10. Patent 2794584 C1 Russian Federation, IPC G 01 M 13/00, B 23Q 17/00. Sposob diagnostiki tochnosti metallorezhushchego stanka pod nagruzkoj [Method for diagnosing the accuracy of a metal-cutting machine under load] / Blokhin D. A., Popov A. Yu. No. 2022109724. (In Russ.).
11. Brecher C., Falker J., Eßer B. [et al.]. Modelling of ball screw drives rolling element contact characteristics // *CIRP Annals*. 2018. Vol. 67 (1). DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.109. (In Engl.).
12. Archenti A., Nicolescu M., Casterman G. [et al.]. A new method for circular testing of machine tools under loaded condition // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 1 (1). P. 575–580. DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.002. (In Engl.).
13. Givi M., Mayer J. R. Optimized volumetric error compensation for five-axis machine tools considering relevance and compensability // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2015. Vol. 12. P. 44–55. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.09.002. (In Engl.).
14. Guo C., Chen L., Ding J. A novel dynamics model of ball-screw feed drives based on the theoretical derivations and deep learning // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 141. P. 196–212. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.07.011. (In Engl.).

15. Blokhin D. A., Popov A. Yu., Nurtdinov Yu. R., Drozdov I. N. Sposob kontrolya vibroustoychivosti stola vertikal'no-frezernogo stanka [Method for controlling vibration resistance of a table of a vertical milling machine] // Innovatsionnoye i tsifrovoye mashinostroyeniye. *Innovative and Digital Engineering*. Ufa, 2021. P. 263–268. (In Russ.).

16. Blokhin D. A., Drozdov I. N. Sostavleniye karty tochnosti peremeshcheniy stola frezernogo stanka pod nagruzkoy [Mapping the accuracy of the movements of the milling machine table under load] // Vestnik MGTU Stankin. *Vestnik MSUT «Stankin»*. 2021. Vol. 4 (59). P. 53–56. (In Russ.).

BLOKHIN Dmitriy Andreyevich, Senior Lecturer of Metal-Cutting Machines and Instruments Department, Mechanical Engineering Institute, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 5142-6237

AuthorID: 869045

ORCID: 0000-0001-6197-435X

AuthorID (SCOPUS): 56503655400

ResearcherID: A-8621-2017

Correspondence address: blohin.da@mail.ru

MIKHAILOV Igor Sergeevich, Student of gr. KTO-214 Mechanical Engineering Institute, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: mik3d@mail.ru

For citations

Blokhin D. A., Mikhailov I. S. The study of the dynamic displacement of the table of a jig boring machine under load // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 66–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-66-72.

Received September 01, 2023.

© D. A. Blokhin, I. S. Mikhailov

УДК 62-8:62-187.4:004
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78
EDN: JYGOQK

А. В. БУБНОВ
А. М. ДАЙНОВИЧ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ ДЛЯ ДЕМОДУЛЯЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

Электропривод с фазовой синхронизацией, реализованный на основе принципа фазовой автоподстройки частоты, обладает высокими показателями точности и широким диапазоном регулирования частоты вращения. Фильтр нижних частот, применяемый для демодуляции ШИМ-сигнала фазовой ошибки в контуре фазовой автоподстройки частоты, ограничивает рабочий диапазон частот вращения. Целью данной работы является анализ влияния фильтра нижних частот на динамику электропривода в области низких частот вращения. Для этого авторами в среде Matlab разработана математическая модель электропривода с фазовой синхронизацией, позволяющая исследовать влияние параметров фильтра нижних частот в пропорциональном режиме работы электропривода. В ходе исследования получена зависимость величины пульсации ошибки по частоте вращения от частоты вращения электропривода. С ее помощью сформулировано условие выбора постоянной времени демодулятора в системе управления электроприводом, работающим в различном диапазоне частот вращения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании точного электропривода с фазовой синхронизацией.

Ключевые слова: точный электропривод, электропривод с фазовой синхронизацией, фильтрация ШИМ-сигнала, фильтр нижних частот, постоянная времени, имитационное моделирование.

I. Введение. Точность регулирования скорости вращения — одна из ключевых характеристик электропривода для узла оптико-механической развертки, определяющая качество работы сканирующей системы. Электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), реализуемый на основе принципа фазовой автоподстройки частоты, позволяет обеспечить

требуемые для таких систем высокие точностные показатели, а также хорошие динамические характеристики и широкий диапазон регулирования скорости вращения [1].

Функциональная схема ЭПФС приведена на рис. 1, где БЗЧ — блок задания частоты f_{on} , ИЧФД — импульсный частотно-фазовый дискри-

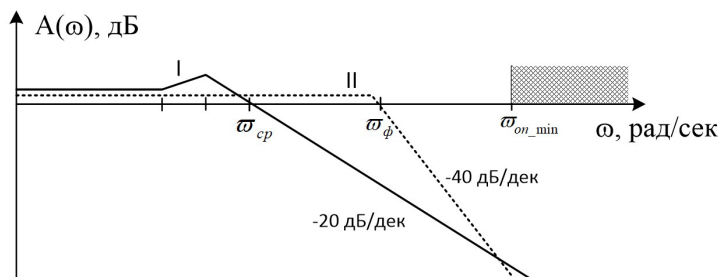


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики ЭПФС без учета фильтра (I) и ФНЧ 2-го порядка (II)

устойчивости системы автоматического управления в необходимом диапазоне частот вращения.

Целью данной работы является анализ влияния демодулятора выходного сигнала ИЧФД на основе фильтра нижних частот на работу ЭПФС в области низких частот вращения.

III. Моделирование и результаты. Проведем анализ влияния параметров ФНЧ на динамику электропривода с помощью математического моделирования в программном комплексе Matlab на основе имитационной модели ЭПФС в пропорциональном режиме работы (рис. 2). Имитационная модель состоит из следующих функциональных блоков:

- блок ШИМ, выполняющий преобразование сигнала фазового рассогласования $\Delta\varphi$. Он реализован на основе логического устройства сравнения и генератора пилообразного сигнала с периодом T_{on} . Амплитуда выходного сигнала блока, в соответствии с [11], составляет $\pm 0,5\varphi_0$, где $\varphi_0 = 2\pi/z$ — угловое расстояние между двумя соседними метками ИДЧ;
- блок ФНЧ 2-го порядка с передаточной

функцией $W_{ФНЧ}(p) = \frac{1}{(T_\phi p + 1)^2}$, где T_ϕ — постоянная

времени. Для его построения использован компонент «Transfer Function with Initial Output» из раздела «Additional Linear» библиотеки Simulink [12]. Его особенностью является возможность инициализации выходного сигнала, позволяющая задавать стартовое положение рабочей точки в момент запуска процедуры моделирования;

- блок КУ, представляющий собой ПД-регулятор с передаточной функцией $W_{КУ}(p) = k(T_k p + 1)$, где k — коэффициент усиления корректирующего устройства, T_k — постоянная времени;
- математические модели бесколлекторного двигателя постоянного тока и импульсного датчика частоты вращения на основе интегрирующих звеньев;
- измерительный блок, предназначенный для анализа осциллограмм исследуемых сигналов;
- функциональный блок для определения времени регулирования.

Основные параметры исследуемой математической модели: максимальное угловое ускорение $\varepsilon_m = 10$, коэффициент усиления корректирующего устройства $k = 10$, число меток ИДЧ $z = 4800$. Значение постоянной времени корректирующего устройства T_k определено из соотношений, описанных в [1], и соответствует настройке регулятора на критический переходный процесс в пропорциональном режиме работы электропривода. Асимптотические ЛАХ (рис. 3) разомкнутой САУ электропривода без ФНЧ (I) и ФНЧ (II) поясняют особенности выбора постоянной времени T_ϕ , задаваемой при моделировании, а также исследуемый диапазон частот

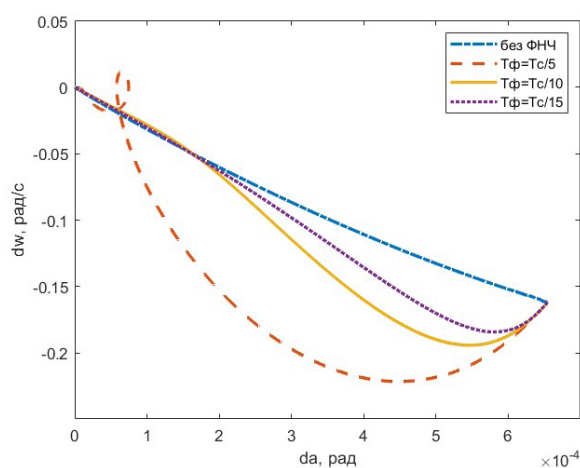


Рис. 4. Фазовые портреты ЭПФС в пропорциональном режиме с учетом влияния ФНЧ с различной постоянной времени

вращения ЭПФС. Анализ режима синхронизации ЭПФС, с точки зрения характера переходного процесса, величины пульсации $\Delta\omega$ на заданной частоте вращения, был выполнен в области низких частот вращения ($n \geq 30$ об/мин).

Диапазон изменения значения постоянной времени демодулятора был определен на основе предварительного исследования математической модели, приведенной на рис. 2, в которой было исключено влияние ШИМ-сигнала. На основе преобразованной модели были построены фазовые портреты ЭПФС в пропорциональном режиме работы (рис. 4) при различных значениях T_ϕ . Результаты моделирования показали, что частота среза ФНЧ должна быть не менее чем на октаву больше частоты среза системы, чтобы обеспечить требуемый характер переходного процесса и точность по частоте вращения. Выбор меньшей постоянной времени приведет к колебаниям в системе, потере синхронизации. Поэтому для исследования математической модели (рис. 2) были выбраны значения T_ϕ из диапазона:

$$\frac{1}{20\omega_{cp}} \leq T_\phi \leq \frac{1}{8\omega_{cp}}, \quad (2)$$

где ω_{cp} — частота среза замкнутой линеаризованной системы регулирования ЭПФС без учета влияния ФНЧ.

Исследование модели электропривода было выполнено в диапазоне частот вращения от 30 до 600 об/мин для каждого выбранного значения постоянной времени демодулятора. Для наглядности изучения влияния ФНЧ на характер пере-

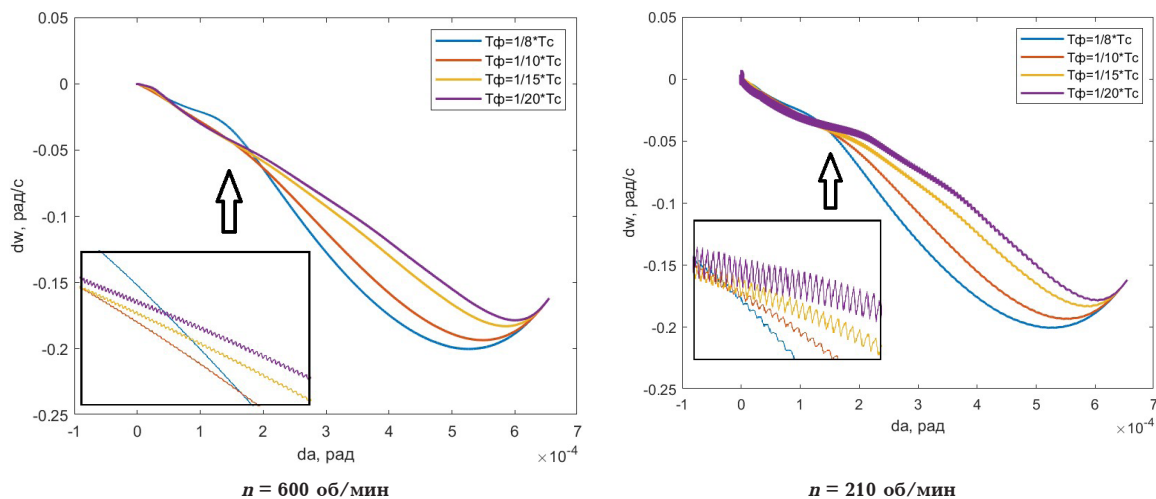


Рис. 5. Фазовые портреты ЭПФС в пропорциональном режиме работы с учетом влияния ФНЧ

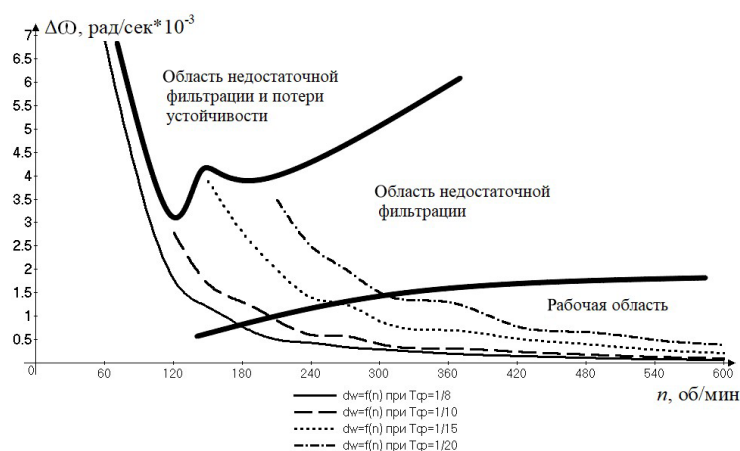


Рис. 6. Зависимость величины пульсаций $\Delta\omega$ от частоты вращения ЭПФС в пропорциональном режиме работы

ходного процесса в среде Matlab были построены семейства фазовых портретов ЭПФС в пропорциональном режиме (рис. 5) для заданной частоты f_{on} . Анализ фазовых портретов показал, что с увеличением частоты f_{on} наличие ШИМ в контуре ФАПЧ не приводит к изменению фазовых траекторий ЭПФС в пропорциональном режиме работы.

С помощью измерительного блока, использованного в предложенной модели, на каждом этапе исследования была выполнена оценка величины пульсации ошибки по частоте вращения в установившемся режиме работы электропривода, вызванной импульсным характером выходного сигнала ИЧФД. На основании обобщенных результатов построена графическая зависимость величины пульсаций $\Delta\omega$ от частоты вращения ЭПФС (рис. 6) при различных значениях постоянной времени T_ϕ .

IV. Выводы. Полученная зависимость позволяет сделать следующие выводы:

1. Вследствие нелинейного характера величины пульсации ошибки по частоте вращения на графике можно выделить области, в которых возникает потеря устойчивости системы, область недостаточной фильтрации выходного сигнала ИЧФД и рабочую область. Выбор значения постоянной времени демодулятора позволит обеспечить необходимое качество фильтрации выходного сигнала ИЧФД и требуемый характер переходного процесса.

2. Результаты моделирования позволяют следующим образом уточнить условие (1) для значения постоянной времени ФНЧ:

— при работе электропривода в области высоких частот вращения ($n > 500$ об/мин) величины пульсаций $\Delta\omega$ снижаются для всех заданных при моделировании значений T_ϕ , и, с точки зрения инженерной практики, их можно считать одинаковыми. При этом задержки в работе САУ, вызванные наличием ФНЧ, будут меньше при более низких значениях постоянной времени. В такой ситуации частота среза ФНЧ должна быть более чем на декаду больше частоты среза системы;

— для работы ЭПФС в области низких частот вращения следует выбирать значение постоянной времени фильтра T_ϕ из верхней границы диапазо-

на (2), т.е. $\frac{1}{10\omega_{cp}} \leq T_\phi \leq \frac{1}{8\omega_{cp}}$. В этом случае будет

обеспечено необходимое качество фильтрации выходного сигнала ИЧФД. Временные задержки, вносимые ФНЧ, не окажут заметного влияния на характер переходного процесса в пропорциональном режиме работы.

Результаты, представленные в работе, могут быть использованы при проектировании точного электропривода с фазовой синхронизацией, работающего в области низких частот вращения.

Библиографический список

1. Бубнов А. В. Вопросы теории и проектирования прецизионных синхронно-синфазных электроприводов постоянно-го тока. Омск: Омский научный вестник, 2005. 190 с.
2. Hsieh G. C., Hung J. C. Phase-locked loop techniques. A survey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43, no. 6. P. 609–615. DOI: 10.1109/41.544547.
3. Zhu C., Li X., Shi L. [et al.]. A new nonlinear Type3-PLL with noise rejection and fast locking performance in tracking telemetry and command systems // Acta Astronaut. 2019. Vol. 157. P. 397–403. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.01.006.
4. Seifi S., Karimi H. Stability analysis of a single-phase phase-locked loop for power systems applications // 2012 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA). Montreal, QC, Canada. 2012. P. 1383–1387. DOI: 10.1109/ISSPA.2012.6310510.
5. Wang D., Lu K., Rasmussen P. O. [et al.]. Comparative study of low-pass filter and phase-locked loop type speed filters for sensorless control of AC drives // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2017. Vol. 1, no. 2. P. 207–215. DOI: 10.23919/TEMS.2017.7961343.
6. Гутников В. С. Фильтрация измерительных сигналов. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. 192 с.
7. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам / пер. с англ. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
8. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-locked loop in constant speed control system for the flywheel motor // Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 129. P. 323–330 DOI: 10.1007/978-3-642-25778-0_45.
9. Геложе Ю. А., Клименко П. П. Системы фазовой автоподстройки частоты с ФНЧ высоких порядков // Радиосистемы. 2004. № 78. С. 74–82. EDN: YKNSGD.

10. Зайцев А. А. Исследование и минимизация фазового шума в ФАПЧ синтезаторах частот // Научно-исследовательские публикации. 2017. № 1 (39). С. 5–29. EDN: YKMWRT.

11. Бубнов А. В. Математическая модель логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией // Электричество. 2005. № 5. С. 27–31.

12. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7. Самоучитель. Москва: ДМК-Пресс, 2008. 784 с. ISBN 978-5-94074-423-8.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5358-0661

ORCID: 0000-0002-0604-3795

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: A-6669-2015

ДАЙНОВИЧ Александр Михайлович, аспирант кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3076-2474

AuthorID (РИНЦ): 897061

Адрес переписки: dainovich-alex@mail.ru

Для цитирования

Бубнов А. В., Дайнович А. М. Особенности применения фильтра нижних частот для демодуляции информационных сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78.

Статья поступила в редакцию 21.11.2023 г.

© А. В. Бубнов, А. М. Дайнович

FEATURES OF USING LOW-PASS FILTER FOR SMALL SIGNAL DEMODULATION IN PHASE-LOCKING MOTOR DRIVE

Phase-locking motor drive based on phase-lock principal provides high accuracy and wide shaft speed range. A low-pass filter is used for PWM-signal demodulation in phase-lock loop. This type of demodulator limits loop bandwidth and working range of motor drive. The main purpose of this article is to analyze low-pass filter influence on motor drive dynamic characteristics in low shaft speed area. The authors developed Matlab Simulink model to researcher phase-locking motor drive working in synchronous mode. As a result the dependence of angular velocity ripple versus rotational speed is obtained. The choosing condition of low-pass filter time constant is defined for different shaft speed area by using the obtained dependence. The received results can be applicable for design precision phase-lock motor drive.

Keywords: precision motor drive, phase-locking motor drive, PWM filtering, low-pass filter, time constant, simulation modeling.

References

1. Bubnov A. V. Voprosy teorii i proyektirovaniya pretsizionnykh sinkhronno-sinfaznykh elektroprivodov postoyannogo toka [Theoretical and design aspects of DC synchronous phase-locking motor drives]. Omsk. 2005. 190 p. ISBN 5-8149-0206-X. (In Russ.).
2. Hsieh G. C., Hung J. C. Phase-locked loop techniques. A survey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43, no. 6. P. 609–615. DOI: 10.1109/41.544547. (In Engl.).
3. Zhu C., Li X., Shi L. [et al.]. A new nonlinear Type3-PLL with noise rejection and fast locking performance in tracking telemetry and command systems // Acta Astronaut. 2019. Vol. 157. P. 397–403. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.01.006. (In Engl.).
4. Seifi S., Karimi H. Stability analysis of a single-phase phase-locked loop for power systems applications // 2012 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA). Montreal, QC, Canada. 2012. P. 1383–1387. DOI: 10.1109/ISSPA.2012.6310510. (In Engl.).
5. Wang D., Lu K., Rasmussen P. O. [et al.]. Comparative study of low-pass filter and phase-locked loop type speed filters for sensorless control of AC drives // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2017. Vol. 1, no. 2. P. 207–215. DOI: 10.23919/TEMS.2017.7961343. (In Engl.).
6. Gutnikov V. S. Fil'tratsiya izmeritel'nykh signalov [Filtering of measurement signals]. Leningrad, 1990. 192 p. ISBN 5-283-04482-5. (In Russ.).
7. Dzhonson D., Dzhonson Dzh., Mur G. Spravochnik po aktivnym fil'tram [A handbook of active filters] / trans. from Engl. Moscow, 1983. 128 p. (In Russ.).
8. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-locked loop in constant speed control system for the flywheel motor // Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 129. P. 323–330 DOI: 10.1007/978-3-642-25778-0_45. (In Engl.).
9. Gelozhe Yu. A., Klimenko P. P. Sistemy fazovoy avtopodstroyki chastoty s FNCh vysokikh poruyadkov [Phase-lock systems with high order LPF] // Radiosistemy. Radio Systems. 2004. No. 78. P. 74–82. EDN: YKNSGD. (In Russ.).
10. Zaytsev A. A. Issledovaniye i minimizatsiya fazovogo shuma v FAPCH sintezatorakh chastot [Research and minimization of phase noise in PLL frequency synthesizer] // Nauchno-issledovatel'skiye publikatsii. Journal of Scientific Research Publications. 2017. No. 5 (39). P. 5–29. EDN: YKMWRT. (In Russ.).
11. Bubnov A. V. Matematicheskaya model' logicheskogo ustroystva sravneniya dlya elektroprivoda s fazovoy sinkhronizatsiyey [The mathematical model logical comparator for phase-locking motor drive] // Elektrichestvo. Electricity. 2005. No. 5. P. 27–31. (In Russ.).
12. D'yakonov V. P. Simulink 5/6/7. Samouchitel' [Simulink 5/6/7: Tutorial]. Moscow, 2008. 784 p. ISBN 978-5-94074-423-8. (In Russ.).

BUBNOV Aleksey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 5358-0661
ORCID: 0000-0002-0604-3795
AuthorID (SCOPUS): 7004195241
ResearcherID: A-6669-2015
DAYNOVICH Aleksandr Mikhaylovich, Graduate Student of Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 3076-2474
AuthorID (RSCI): 897061
Correspondence address: dainovich-alex@mail.ru

For citations

Bubnov A. V., Daynovich A. M. Features of using low-pass filter for small signal demodulation in phase-locking motor drive // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78.

Received November 21, 2023.
© A. V. Bubnov, A. M. Daynovich

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНО-МНОГОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШЕК КАЖДОЙ ФАЗЫ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ

В статье рассмотрен трехфазно-многофазный трансформаторный преобразователь числа фаз с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки; приведена его схема замещения и линейная математическая модель. В качестве примера выполнен анализ работы изготовленного трехфазно-семифазного трансформаторного преобразователя числа фаз. В результате электромагнитных испытаний опытного образца определены параметры схемы замещения устройства. С использованием математической модели рассчитаны и построены рабочие характеристики. Выполнено сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных измерений. Наибольшие погрешности, полученные при сравнении расчетных и экспериментальных значений КПД и коэффициента мощности, составили 3,5 % и 2,2 % соответственно.

Ключевые слова: преобразователь числа фаз, трансформатор, многофазная обмотка, схема замещения, математическая модель.

В структуру различных электротехнических комплексов и систем часто входят трансформаторные преобразователи числа фаз (ТПФ). Например, ТПФ необходимы для работы многофазных систем, обеспечивающих транспорт электроэнергии [1–4], в устройствах для выпрямления и инвертирования [5–8], для питания электропривода с многофазными электрическими машинами [9, 10]. Благодаря увеличению числа фаз можно повысить энергетические, массогабаритные показатели, а также улучшить электромагнитную совместимость таких комплексов и систем.

В настоящее время известны ТПФ с разными конструкциями магнитопровода и схемами соединения обмоток [11–14]. Формирование необходимого количества фаз многофазной обмотки ТПФ осуществляется за счет соединения выводов катушек (и их отпаек) вторичной обмотки устройства в различные схемы. Это существенно усложняет конструкцию такого специального трансформатора, увеличивает трудоемкость при его сборке и ремонте. Более простую схему соединения обмоток имеет ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы многофазной вторичной обмотки (рис. 1).

Многофазная симметричная система ЭДС на выводах вторичной обмотки может быть получена для различного количества витков катушек $w_{2,i}$ (рис.

1), где $I = 1...3m_2$; $k = 1...m_2$, m_2 — количество фаз вторичной обмотки.

В [15, 16] рассмотрен подход для определения количества витков многофазной обмотки ТПФ (рис. 1). Число витков $w_{2,i}$ может принимать положительные или отрицательные значения. У катушек с отрицательными значениями количества витков ЭДС должно быть в противофазе с ЭДС катушек с положительными значениями, размещённых на одном стержне сердечника ТПФ, что обеспечивается различным направлением намотки катушек или маркировкой их выводов. Определение минимального количества витков катушек выполняется с учетом нескольких ограничений, при которых на выводах вторичной обмотки будет многофазная симметричная система ЭДС, мощность многофазной симметричной нагрузки равномерно распределяется по трем фазам первичной обмотки, а также обеспечивается одинаковое количество витков каждой фазы вторичной обмотки [16].

Необходимо отметить, что преобразователь числа фаз со схемой соединения катушек вторичной обмотки, показанной на рис. 1, был использован в качестве трехфазно-двухфазного и в дальнейшем как трехфазно-многофазный ТПФ [1, 11].

Многофазная вторичная обмотка ТПФ является простой и технологичной: для увеличения числа фаз этой обмотки необходимо добавить на каждый

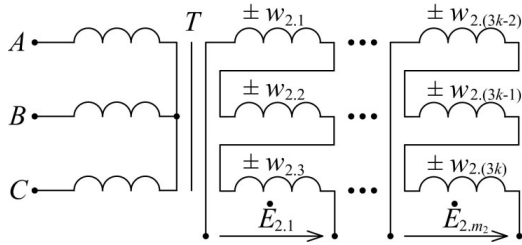


Рис. 1. Схема соединения обмоток трехфазно-многофазного ТПФ

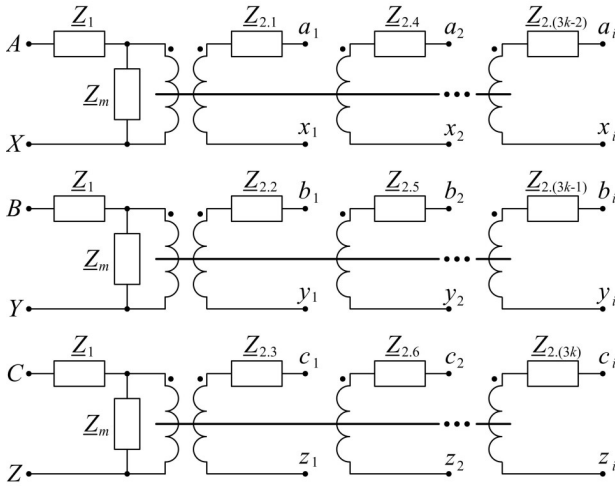


Рис. 2. Схема замещения трехфазно-многофазного ТПФ

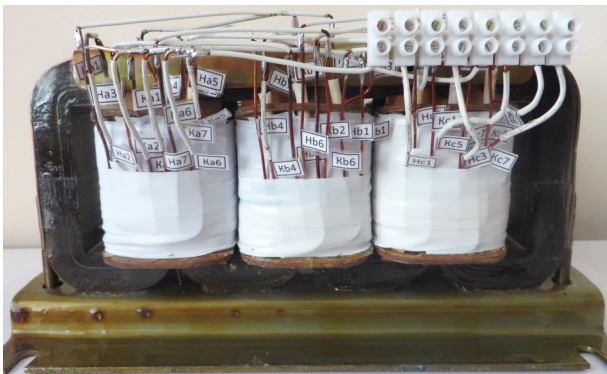


Рис. 3. Опытный образец трехфазно-семифазного ТПФ

из трех стержней магнитопровода по одной катушке с заданным количеством витков; все катушки многофазной обмотки должны быть изготовлены из провода одинакового сечения.

Для анализа работы ТПФ используем подход, основанный на схемах замещения устройства. Схема замещения трехфазно-многофазного ТПФ со схемой соединения обмоток (рис. 1) приведена на рис. 2.

Катушки каждой фазы в зависимости от количества фаз вторичной обмотки могут быть соединены согласно или встречно между собой, поэтому на схеме с m -фазной вторичной обмоткой (рис. 2) не показаны соединения катушек, обеспечивающих формирование многофазной системы напряжений.

Комплексные сопротивления схемы замещения позволяют учитывать потери мощности в магнитопроводе и обмотках, ЭДС, наведенные основным

магнитным потоком и полями рассеивания ТПФ [17, 18].

Допущения, принятые при моделировании ТПФ: устройство подключается к сети с симметричным трехфазным напряжением, характеристики магнитной цепи и обмоток трансформатора линейные, магнитная связь между катушками, размещенными на разных стержнях сердечника, отсутствует.

Математическая модель трехфазно-многофазного ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки для любого числа фаз вторичной обмотки (m_2) состоит из следующих уравнений:

$$-\dot{E}_{1,(A,B,C)} + (R_1 + jX_1)\dot{I}_{1,(A,B,C)} = \dot{U}_{1,(A,B,C)}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{1,A}W_1 + \sum_{k=1}^m \dot{I}_{2,(3k-2)}W_{2,(3k-2)} = \frac{-\dot{E}_{1,A}}{R_m + jX_m}W_1; \quad (2)$$

$$\dot{I}_{1,B}W_1 + \sum_{k=1}^m \dot{I}_{2,(3k-1)}W_{2,(3k-1)} = \frac{-\dot{E}_{1,B}}{R_m + jX_m}W_1; \quad (3)$$

$$\dot{I}_{1,C}W_1 + \sum_{k=1}^m \dot{I}_{2,(3k)}W_{2,(3k)} = \frac{-\dot{E}_{1,C}}{R_m + jX_m}W_1; \quad (4)$$

$$\dot{E}_{2,k} = \dot{E}_{1,A} \frac{W_{2,(3k-2)}}{W_1} + \dot{E}_{1,B} \frac{W_{2,(3k-1)}}{W_1} + \dot{E}_{1,C} \frac{W_{2,(3k)}}{W_1}; \quad (5)$$

$$\dot{U}_{2,k} = \dot{E}_{2,k} - \dot{I}_{2,k}(R_{2,k} + jX_{2,k}) = 0; \quad (6)$$

$$R_{2,k} = r_{2,(3k-2)} + r_{2,(3k-1)} + r_{2,(3k)} + R_{2,n}; \quad (7)$$

$$X_{2,k} = x_{2,(3k-2)} + x_{2,(3k-1)} + x_{2,(3k)} + X_{2,n}. \quad (8)$$

где $E_{1,(A,B,C)}$ — действующие значения ЭДС, наводимые основным магнитным потоком в фазах A, B и C первичной обмотки, В;

$I_{1,(A,B,C)}$ — действующие значения фазных токов первичной обмотки, А;

$U_{1,(A,B,C)}$ — действующие значения фазных напряжений сети, приложенных к первичной обмотке, В;

W_1 и $W_{2,i}$ — число витков катушек первичной трехфазной обмотки и i -й катушки вторичной многофазной обмотки;

R_1 и X_1 — сопротивления, учитывающие потери мощности и ЭДС, наводимые потоками рассеивания в первичной обмотке ($Z_1 = R_1 + jX_1$), Ом;

R_m и X_m — сопротивления, учитывающие магнитные потери ТПФ и ЭДС от основного магнитного потока в первичной обмотке ($Z_m = R_m + jX_m$), Ом;

$E_{2,k}$ и $I_{2,k}$ — действующие значения фазных ЭДС и токов вторичной обмотки;

$r_{2,i}$ и $x_{2,i}$ — сопротивления, учитывающие потери мощности и ЭДС от потоков рассеивания в катушках вторичной обмотки ($Z_{2,i} = r_{2,i} + jx_{2,i}$), Ом;

$R_{2,n}$ и $X_{2,n}$ — сопротивления нагрузки вторичной многофазной обмотки, Ом.

С использованием серийного трехфазного трансформатора изготовлен опытный образец трехфазно-семифазного ТПФ (рис. 3). Схема соединения и число витков катушек устройства приведены в [16].

На каждом из трех стержней сердечника размещено 77 ± 2 витка вторичной обмотки, каждая фаза содержит 33 ± 1 виток. При намотке катушек рассчитаны значения витков округлены до целых

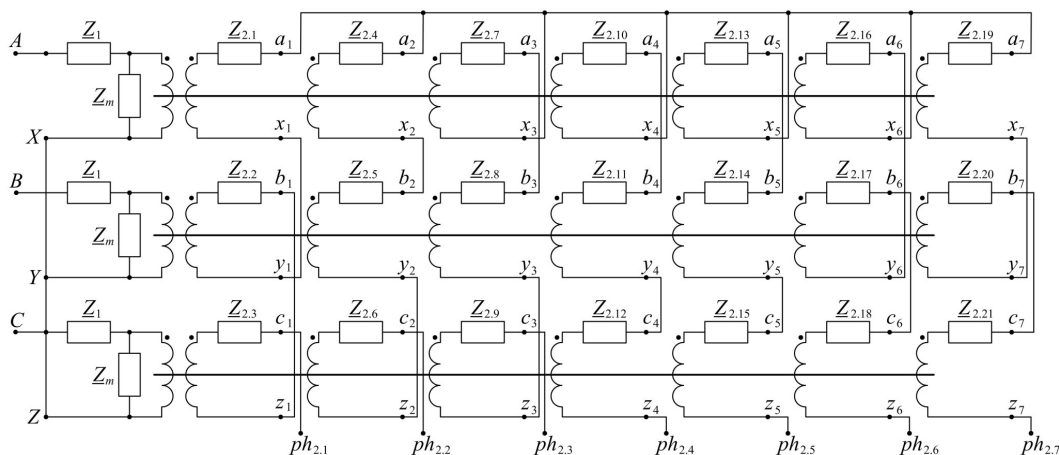


Рис. 4. Схема замещения трехфазно-семифазного ТПФ

Таблица 1

Результаты измерений (опыт холостого хода)

Фаза	$U_{\text{ф.ном}}$ В	$I_{\text{ф.х.х.}}$ А	$P_{\text{х.х.}}$ Вт	$Q_{\text{х.х.}}$ вар
A	222,3	0,064	2,1	14,1
B	223,2	0,065	2,3	14,3
C	224,1	0,069	2,2	15,1
Среднее	223,2	0,066	2,2	14,5

Таблица 2

Результаты измерений (опыт короткого замыкания)

Фаза	$U_{\text{к.з.}}$ В	$I_{\text{ф.ном}}$ А	$P_{\text{к.з.}}$ Вт	$Q_{\text{к.з.}}$ вар
A	28,1	0,226	6,18	0,91
B	28,2	0,228	6,12	0,90
C	28,0	0,225	6,19	0,89
Среднее	28,1	0,226	6,16	0,90

значений, поэтому общее количество витков нескольких фаз отличается на один виток. Вторичная семифазная обмотка соединена звездой с нулевым выводом, выводы подключены к винтовому зажиму.

Номинальные параметры ТПФ (рис. 3): полная мощность — 100 ВА; напряжение первичной и вторичной обмотки — 220 и 5,86 В соответственно; ток первичной и вторичной обмотки — 0,226 и 2,44 А соответственно, коэффициент мощности симметричной многофазной нагрузки 0,8, частота — 50 Гц.

Схема замещения трехфазно-семифазного ТПФ приведена на рис. 4.

Сопротивления элементов ТПФ определены в результате электромагнитных испытаний. При экспериментальном исследовании ТПФ выполнены следующие опыты и измерения [19]:

1. Опыт холостого хода. При проведении опыта определены действующее значение напряжения катушек первичной и вторичной обмоток; ток холостого хода; активная и реактивная мощность, потребляемая из сети (табл. 1).

Напряжения катушек вторичной обмотки в режиме холостого хода равны: $U_{2,x,x_i} = \{5,5; 1,2; 1,2; 1,6; 0,5; 5,3; 0,2; 4,8; 2,5; 4,1; 3,5; 0,0; 4,1; 0,0; 3,5; 0,2; 2,5; 4,8; 1,6; 5,3; 0,5\}$ В, значения фазных ЭДС вторичной обмотки: $6,6 \pm 0,1$ В.

2. Опыт короткого замыкания. При проведении опыта определены действующее значение напряжения короткого замыкания; активная и реактивная мощность, потребляемая из трехфазной сети (табл. 2).

Действующее значение фазных токов вторичной обмотки при проведении опыта короткого замыкания равно $2,44 \pm 0,1$ А.

3. Измерение сопротивления обмоток постоянному току выполнено способом падения напряже-

ния [19]. Омическое сопротивление катушек фаз A, B и C первичной обмотки равно 60,9; 62,0 и 60,2 Ом соответственно, каждой фазы вторичной обмотки: $R_{2,k} = \{200; 192; 198; 204; 206; 198; 195\}$ мОм.

С использованием данных табл. 1 рассчитаны сопротивления, учитывающие магнитные потери и ЭДС от основного магнитного потока (рис. 4): $R_m = 495$ Ом и $X_m = 3262,7$ Ом.

Сопротивления катушек первичной и вторичной обмоток устройства определены при допущении, что активная и реактивная мощность, потребляемая из сети в опыте короткого замыкания (18,5 Вт и 2,6 вар), делятся на две равные части между трехфазной и многофазной обмотками ТПФ ($R_1 = 60,2$ Ом; $R_{2,k} = 222,5$ мОм; $X_1 = 8,58$ Ом; $X_{2,k} = 31,7$ мОм).

Как можно видеть из табл. 2, при проведении опыта короткого замыкания значение коэффициента мощности составило 0,99, это можно объяснить тем, что на каждом стержне сердечника катушки вторичной обмотки (рис. 4) включены встречно между собой, что приводит к уменьшению индуктивности.

Для расчета напряжения на различных катушках вторичной обмотки устройства нужно определить активные и индуктивные сопротивления каждой катушки $r_{2,i}$ и $x_{2,i}$. При допущении об одинаковой средней длине витков катушек многофазной обмотки сопротивление каждой катушки можно вычислить по выражениям:

$$r_{2,i} = \frac{W_{2,i}}{W_{2,(3k-2)} + W_{2,(3k-1)} + W_{2,(3k)}} R_{2,k}; \quad (9)$$

$$x_{2,i} = \frac{W_{2,i}}{W_{2,(3k-2)} + W_{2,(3k-1)} + W_{2,(3k)}} X_{2,k}. \quad (10)$$

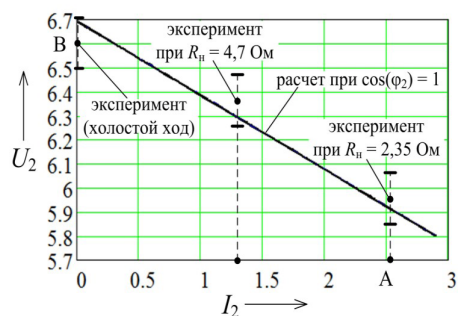


Рис. 5. Зависимость напряжения вторичной обмотки от нагрузки трехфазно-семифазного ТПФ

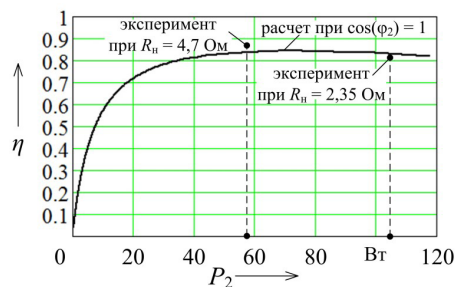


Рис. 6. КПД трехфазно-семифазного ТПФ

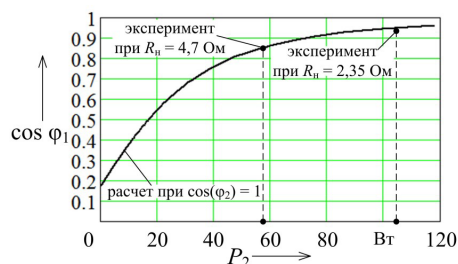


Рис. 7. Коэффициент мощности трехфазно-семифазного ТПФ

Активные сопротивления катушек $r_{2,r}$ рассчитанные по формуле (9), можно уточнить с использованием известных значений омического сопротивления соответствующей катушки и коэффициента вытеснения тока, учитывающего увеличение активных сопротивлений под влиянием поверхностного эффекта.

Точно рассчитать индуктивные сопротивления обмоток различных устройств сложно из-за того, что магнитные поля рассеивания катушек замыкаются через воздух и конструктивные элементы, сцепляются с неполными и разными числами витков катушек [17]. При этом существующие теоретические и экспериментальные методы позволяют определить эти сопротивления с достаточной для инженерной практики точностью [17, 20].

Для ТПФ (рис. 3) с использованием математической модели (1)–(8) рассчитаны рабочие характеристики (рис. 4–6). При расчете характеристик коэффициент мощности симметричной нагрузки принят равным единице.

На рис. 5 показаны интервалы, в которых находятся измеренные значения фазных напряжений при подключении к вторичной обмотке активных сопротивлений 4,7 и 2,35 Ом. На выводах вторичной обмотки ТПФ (рис. 3) формируется семифазная си-

стема напряжений с незначительной несимметрией из-за отличия числа витков катушек вторичной обмотки изготовленного ТПФ от необходимого числа витков, определенных в результате расчета [16]. При проектировании устройства можно обеспечить необходимое число витков катушек за счет оптимизации размеров катушек и магнитной цепи, а также значения отношения «вольт на виток» такого специального трансформатора.

На рис. 6 и 7 также приведены значения КПД и коэффициента мощности, определенные экспериментально. Наибольшие значения погрешностей КПД и коэффициента мощности, полученные при сравнении результатов расчета и эксперимента, составили 3,5 % и 2,2 % соответственно.

В результате изложенного можно сделать следующие выводы:

1) составлена линейная математическая модель трехфазно-многофазного ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки, с использованием которой можно выполнить анализ работы ТПФ с любым количеством фаз вторичной обмотки, большим двух;

2) в результате экспериментальных исследований определены параметры схемы замещения трехфазно-семифазного ТПФ;

3) приведены расчетные выражения для определения активного и индуктивного сопротивления катушек многофазной вторичной обмотки рассмотренного ТПФ, что необходимо для расчета рабочих диапазонов изменения напряжения каждой катушки;

4) выполнен расчет рабочих характеристик трехфазно-семифазного ТПФ, наибольшие значения погрешностей КПД и коэффициента мощности, полученные при сравнении результатов расчета и эксперимента, составили 3,5 % и 2,2 % соответственно.

Библиографический список

1. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование многофазных линий электропередачи: моногр. Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2014. 168 с.
2. Гершенгорн А. И. Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. 1994. № 8. С. 67–70.
3. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Тхао Лэ Ван. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи: моногр. Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2020. 296 с. ISBN 978-5-98710-387-6.
4. Москалев Ю. В. Повышение эффективности транспорта электроэнергии с использованием трансформаторного преобразователя числа фаз и многофазной линии электропередачи // Проблемы машиноведения: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. / ред. Ю. А. Бурьян. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2023. С. 13–18.
5. Щуров Н. И., Мятаж С. В. Синтез и анализ многофазных вентиляльных преобразователей: моногр. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. 202 с. ISBN 978-5-7782-4140-4.
6. Рогинская Л. Э., Ялалова З. И. Определение электромагнитной мощности фазообразующих трансформаторов преобразовательных установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 2, Т. 9. С. 18–23. EDN: RPFQVP.
7. Abdollahi R. Harmonic Reduction Using A Novel Multipulse AC-DC Converter // World Journal of Engineering. 2018. Vol. 15 (2). P. 520–530. DOI: 10.1108/WJE-11-2017-0353.
8. Москалев Ю. В. Моделирование трансформаторного преобразователя числа фаз с последовательным соединением

- катушек каждой фазы вторичной обмотки как элемента схемы выпрямления // Практическая силовая электроника. 2022. № 4 (88). С. 30–36. EDN: WNDZMR.
9. Терешкин В. М., Гришин Д. А., Макулов И. А. Перспективы применения многофазных машин переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 19–26. EDN: YGKHUR.
10. Levi E., Bojoi R., Profumo F. [et al.]. Multiphase induction motor drives – a technology status review // IET Electric Power Applications. 2007. Vol. 1 (4). P. 489–516. DOI: 10.1049/iet-epa:20060342.
11. Ronsin F. Transformateur diphasé-triphasé. FR Brevet 2648612 A1; date d'application 15 juin, 1989; date de publiés 21 December, 1990.
12. Paice D. Nine-Phase Step-Up/Step-Down Autotransformer. US patent 7274280; filed May 18th, 2006; published September 25th, 2007.
13. Пат. 2487455 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/14. Девятифазный преобразователь числа фаз / С. Н. Григорьев, В. А. Сучков, Е. В. Афонина, В. В. Филатов, Ю. И. Солюянов. № 2012109621/07; заявл.14.03.12; опубл. 10.07.13. Бюл. № 19.
14. Пат. 143244 U1 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/14. Многофазный трансформаторный преобразователь числа фаз / Ю. В. Рахманова, Л. Э. Рогинская, А. С. Горбунов, П. В. Шилов. № 2014108411/07; заявл. 04.03.14; опубл. 20.07.14. Бюл. № 20.
15. Москалев Ю. В. Определение минимального числа витков катушек вторичной обмотки трансформаторного трехфазно-многофазного преобразователя числа фаз // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 61–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-61-66.
16. Москалев Ю. В. Оптимизация схемы соединения и количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз // Вестник Московского энергетического института. 2023. № 1. С. 17–24. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-17-24.
17. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 322 с. ISBN 978-5-469-01380-8.
18. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. Electric Machinery. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 688 p. ISBN 0-07-366009-4.
19. ГОСТ 3484.1-88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. Введ. 1990–01–01. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 79 с.
20. Михеев Г. М., Швецов В. М., Иванова Т. Г. Методы определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора // Вестник Чувашского университета. 2009. № 2. С. 147–153.

МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.
SPIN-код: 1422-1951
AuthorID (РИНЦ): 657144
ORCID: 0000-0002-0970-937X
AuthorID (SCOPUS): 57200088110
Адрес для переписки: yuriyvm@mail.ru

Для цитирования

Москалев Ю. В. Математическая модель трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 79–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-79-85.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023 г.
© Ю. В. Москалев

MATHEMATICAL MODEL OF A THREE-PHASE-MULTIPHASE TRANSFORMER PHASES CONVERTER WITH A SERIES CONNECTION OF COILS OF EACH PHASE OF SECONDARY WINDING

The article considers a three-phase-multiphase transformer converter of the number of phases with a serial connection of coils of each phase of the secondary winding, its substitution scheme and a linear mathematical model are given. As an example, the analysis of the operation of a manufactured three-phase-seven-phase transformer converter of the number of phases is performed. As a result of electromagnetic tests of the prototype, the parameters of the replacement circuit of the device are determined. Using a mathematical model, the operating characteristics are calculated and constructed. The results of theoretical calculations and experimental measurements are compared. The largest errors obtained when comparing the calculated and experimental values of efficiency and power factor are 3,5 % and 2,2 %, respectively.

Keywords: phase number converter, transformer, multiphase winding, connection diagram, substitution scheme, mathematical model.

References

1. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Modelirovaniye mnogofaznykh liniy elektropredachi [Modelling of multiphase transmission lines]. Irkutsk, 2014. 168 p. (In Russ.).
2. Gershengorn A. I. Mnogofaznyye linii elektropredachi vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya [High and extra-high voltage multiphase transmission lines] // Elektricheskiye stantsii. *Electrical Stations*. 1994. No. 8. P. 67–70. (In Russ.).
3. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Tkhaio Le Van. Kompleksnoye modelirovaniye mul'tifaznykh, mnogotsepykh i kompaktnykh liniy elektropredachi [Integrated modelling of multiphase, multi-circuit and compact transmission lines]. Irkutsk, 2020. 296 p. ISBN 978-5-98710-387-6. (In Russ.).
4. Moskaev Yu. V. Povysheniye effektivnosti transporta elektroenergii s ispol'zovaniyem transformatornogo preobrazovatelya chisla faz i mnogofaznoy linii elektropredachi [Improving the efficiency of power transport using transformer phase number converter and multiphase transmission line] // Problemy mashinovedeniya / Ed. by Yu. A. Buryana. Omsk, 2023. P. 13–18. (In Russ.).
5. Shchurov N. I., Myatezh S. V. Sintez i analiz mnogofaznykh ventil'nykh preobrazovatelye [Synthesis and analysis of multiphase valve converters]. Novosibirsk, 2020. 202 p. ISBN 978-5-7782-4140-4. (In Russ.).
6. Roginskaya L. E., Yalalova Z. I. Opredeleniye elektromagnitnoy moshchnosti fazopreobrazuyushchikh transformatorov preobrazovatel'nykh ustanovok [The definition of electromagnetic power of the phase-reformative transformers of the transforming plants] // Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy. *Electrical Engineering and Information Complexes and Systems*. 2013. No. 2, vol. 9. P. 18–23. EDN: RPFQVP. (In Russ.).
7. Abdollahi R. Harmonic Reduction Using A Novel Multipulse AC-DC Converter // World Journal of Engineering. 2018. Vol. 15 (2). P. 520–530. DOI: 10.1108/WJE-11-2017-0353. (In Engl.).
8. Moskaev Yu. V. Modelirovaniye transformatornogo preobrazovatelya chisla faz s posledovatel'nym soyedineniyem katushek kazhdoy fazy vtorichnoy obmotki kak elementa skhemy vypryamleniya [Simulation of a phase transformer converter with series connection of coils of each phase of the secondary winding as an element of rectifying scheme] // Prakticheskaya silovaya elektronika. *Practicheskaya Silovaya Electronica*. 2022. No. 4 (88). P. 30–36. EDN: WNDZMR. (In Russ.).
9. Tereshkin V. M., Grishin D. A., Makulov I. A. Perspektivy primeneniya mnogofaznykh mashin peremennogo toka [Perspectives of multi-phase AC machines] // Elektronika i elektrooborudovaniye transporta. *Electronics and Electrical Equipment of Transport*. 2017. No. 1. P. 19–26. EDN: YGKHUR. (In Russ.).
10. Levi E., Bojoi R., Profumo F. [et al.]. Multiphase induction motor drives – a technology status review // IET Electric Power Applications. 2007. Vol. 1 (4). P. 489–516. DOI: 10.1049/iet-epa:20060342. (In Engl.).
11. Ronsin F. Transformateur diphasé-triphasé [Two-phase/three-phase transformer]. FR patent 2648612 A1; filed June 15th, 1989; published December 21st, 1990. (In Fr.).
12. Paice D. Nine-Phase Step-Up/Step-Down Autotransformer. US patent 7274280; filed May 18th, 2006; published September 25th, 2007. (In Engl.).
13. Patent 2487455 C1 Russian Federation, IPC H 02 M 5/14. Devyatifaznyy preobrazovatel' chisla faz [Nine-phase converter] / S. N. Grigoryev, V. A. Suchkov, E. V. Afonina, V. V. Filatov, Yu. I. Soluyanov. No. 2012109621/07. (In Russ.).
14. Patent 143244 U1 Russian Federation, IPC H 02 M 5/14. Mnogofaznyy transformatornyy preobrazovatel' chisla

faz [Multiphase transformer phase number converter] / Yu. V. Rakhmanova, L. E. Roginskaya, A. S. Gorbunov, P. V. Shilov. No. 2014108411/07. (In Russ.).

15. Moskaev Yu. V. Opredeleniye minimal'nogo chisla vitkov katushek vtorichnoy obmotki transformatornogo trekhfazno-mnogofaznogo preobrazovatelya chisla faz [Determination of minimum secondary winding coils turns for transformer three-phase-multiphase phase number converter] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 1 (181). P. 61–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-61-66. (In Russ.).

16. Moskaev Yu. V. Optimizatsiya skhemy soyedineniya i kolichstva vitkov katushek vtorichnoy obmotki trekhfazno-mnogofaznogo transformatornogo preobrazovatelya chisla faz [Optimizing the Connection Diagram and Turns Number for the Three-Phase to Multiphase Transformer Converter Secondary Winding Coils] // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. *Bulletin of MPEI*. 2023. No. 1. P. 17–24. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-17-24. (In Russ.).

17. Vol'dek A. I., Popov V. V. Elektricheskiye mashiny. Vvedeniye v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory [Electrical machines. Introduction to electromechanics. DC machines and transformers]. Saint Petersburg, 2008. 322 p. ISBN 978-5-469-01380-8. (In Russ.).

18. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. Electric Machinery. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 688 p. ISBN 0-07-366009-4. (In Engl.).

19. GOST 3484.1-88. Transformatory silovyye. Metody elektromagnitnykh ispytaniy [Power transformers. Electromagnetic test methods]. Moscow, 1989. 79 p. (In Russ.).

20. Mikheyev G. M., Shvetsov V. M., Ivanova T. G. Metody opredeleniya induktivnosti rasseyaniya obmotok silovogo transformatora [Method for definition stray induction of high-voltage transformer winding] // Vestnik Chuvashskogo universiteta. *Bulletin of Chuvash University*. 2009. No. 2. P. 147–153. (In Russ.).

MOSKALEV Yury Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Omsk.

SPIN-code: 1422-1951

AuthorID (RSCI): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Correspondence address: yuriyvm@mail.ru

For citations

Moskaev Yu. V. Mathematical model of a three-phase-multiphase transformer phases converter with a series connection of coils of each phase of secondary winding // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 79–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-79-85.

Received September 14, 2023.

© Yu. V. Moskaev

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД, ПЕРЕМЕЩАЕМЫХ ЛЕНТОЧНЫМИ КОНВЕЙЕРАМИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ИЗВЛЕЧЕНИЕМ

В статье приводятся теоретические и практические аспекты совершенствования конструкций существующих подсистем сепарации с использованием результатов исторических и патентно-информационных исследований, используемых для обнаружения и извлечения ферромагнитных тел в потоке многокомпонентной немагнитной кусковой, зернистой, тонкоизмельченной и сыпучей сред.

Предлагается новый энергосберегающий технологический подход с эффектом синхронного улучшения показателей производительности транспортно-технологической системы и снижения стоимостных и энергетических затрат при ее работе, в частности в подсистеме сепарации материалопотока.

Предложена подсистема сепарации-обнаружения металлофрагментов в немагнитной сыпучей среде, для разработки устройств сигнализации и управления током в извлекающих обмотках.

Для повышения извлекающей способности при очистке немагнитных сыпучих сред предлагается конструкция комбинированного железоотделителя. Проведено математическое моделирование работы электромагнитной системы комбинированного железоотделителя транспортной системы, на основе которого предложена математическая модель магнитного поля в его рабочей области, позволяющая определить извлекающую силу от обмоток и с током. Произведена экспериментальная проверка результатов теоретических исследований импульсного магнитного извлечения ферромагнитных тел из сыпучей среды.

Ключевые слова: комбинированный железоотделитель, ферромодуляционные датчики, пондеромоторная сила, намагничивающая сила, импульс тока, ферромагнитное тело, обмотка, постоянные магниты.

Введение. Федеральным законом [1] предусмотрено содействие энергетической эффективности, разработка и использование технологий, которые имеют высокую энергетическую эффективность в сфере энергосбережения.

Подвесные электромагнитные железоотделители нашли широкое применение в агропромышленном комплексе, пищевой, горнодобывающей, энергетической, металлургической, электронной и других отраслях промышленности, где они применяются для защиты технологического оборудования от попадания в него вместе с обрабатываемым зернистым, кусковым, тонкоизмельченным и сыпучим материалом (углем, гравием, шлаком, песком, шихтой и т.д.) металломагнитных включений [2–14].

Выпускаемые в настоящее время отечественной и зарубежной промышленностью стационарные железоотделители [5–11] представляют собой электромагниты постоянного тока с П-, С- или Ш-образным сердечником, имеют большую металлоемкость (до 16 т) и трудоёмкость при монтаже, низкий уровень энергосбережения, так как работают в продолжительном режиме и потребляют большое количество электроэнергии из питающей электрической сети до 30 кВтч. Эксплуатация с целью ресурсосбережения и снижения металлоемкости магнитных систем с постоянными магнитами (ПМ) на основе *Nd-Fe-B* и *Sm-Co* нецелесообразна вследствие большого объема магнитов и их высокой закупочной стоимости, или невозможна, так как ПМ

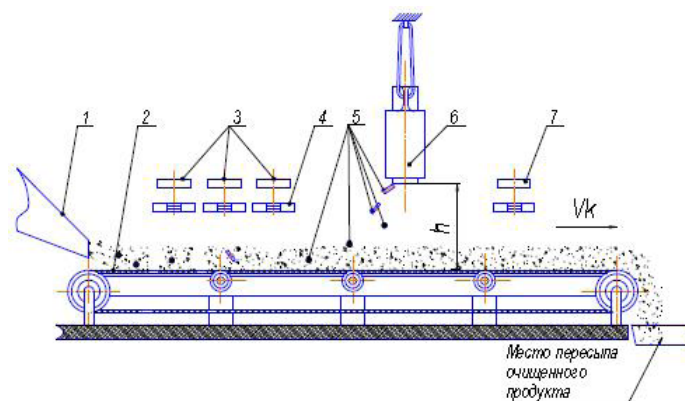


Рис. 1. Схема транспортной системы с обнаружением и извлечением металлофрагментов на ленточном конвейере:

1 — механизм загрузки сыпучей смеси; 2 — конвейер; 3 — ПМ;
4 — ФМД; 5 — ФТ; 6 — КЖ; 7 — датчик контроля неизвлеченных ФТ
Источник: Парсентьев О. С. Энергосберегающая магнитная сепарация // World Science: Problems and Innovations: сб. тр. конф. 2020. С. 38–48

на основе *Fe-Ba* не могут обеспечить необходимую для извлечения ферромагнитных тел (ФТ) извлекающую силу из-за резкого падения интенсивности магнитного поля в рабочей области с увеличением расстояния от поверхности полюсов магнита [6, 10].

Анализ патентной информации [4, 12, 13] показывает, что массу подвесных железоотделителей удастся снизить до 20 %, а подъемные силы электромагнита увеличить на 15–20 % за счет применения специальной формы полюсных наконечников. Однако из-за потерь энергии магнитного поля в паразитных зазорах и высокой температуры обмоток данный класс подвесных железоотделителей является экономически невыгодным, отличается низкой энергоэффективностью, так как требует повышенных требований к тепловому режиму, за счет чего уменьшается плотность тока в обмотках и подъемная электромагнитная сила, что делает невозможным извлечение ФТ с удельной магнитной восприимчивостью вещества $\chi \leq 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ [14].

Учитывая перечисленные недостатки, на предприятиях, где эксплуатируются железоотделители данного класса, приемлемая степень очистки материалопотока от ФТ достигается за счет уменьшения высоты подвеса железоотделителя над материалопотоком, снижения скорости движения ленты конвейера до 1,6–2,0 м/с.

В свою очередь, это приводит к снижению производительности и ресурса конвейера и увеличению непроизводительного расхода электроэнергии. Известные методы извлечения непригодны, так как ФТ в потоке сыпучей смеси появляются редко. Требования к обеспечению качества очистки постоянно растут. Так, указанные отрасли промышленности требуют систем, способных обнаруживать и извлекать ФТ массой до 5 кг на расстоянии 0,05–0,1 м в немагнитных, зернистых, кусковатых и тонкоизмельченных средах.

Согласно ГОСТ 34566-2019, содержание ФТ в комбикорме размером до 2 мм не должно превышать 20 мг/кг, а наличие частиц размером свыше 2 мм и острыми краями не допускается. Кроме этого, низкое качество очистки многокомпонентных сред от металломагнитных включений может приводить в ленточных конвейерах к загрязнению ленты и ее ускоренному износу, к пробуксовке ленты на барабанах, боковому сходу ленты за пределы краев барабанов и роликов опор [15].

Учитывая значительную потребность предприятий народного хозяйства в системах обнаружения и извлечения ФТ в перемещаемых потоках, научные разработки и экспериментальные исследования, направленные на совершенствование таких систем и их подсистем, являются актуальной научно-технической задачей.

Цель исследования заключается в разработке энергосберегающего технологического подхода — системы дискретного обнаружения и извлечения ФТ, массой до 30 кг, производительностью до 70 т/ч, с интенсивностью потока металлочастиц в рабочей зоне сепаратора не более 1000 штук/час, вероятность появления которых на входе в подсистему сепарации, при аналоговом транспортировании, описывается законом редких событий с распределением Пуассона.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Предложить и обосновать структуру энергосберегающей системы сепарации и обнаружения ФТ в сухих зернистых, кусковатых, тонкоизмельченных и сыпучих потоках, для разработки устройств сигнализации и управления током в извлекающих обмотках.

2. Провести математическое моделирование работы электромагнитной системы комбинированного железоотделителя.

3. Обосновать методику расчета подъемной извлекающей ФТ силы из потока сухих многокомпонентных потоков в рабочей области комбинированного железоотделителя КЖ.

4. Осуществить экспериментальную проверку результатов теоретических исследований импульсного магнитного извлечения ФТ из потока немагнитной сыпучей среды.

Основная часть. В работе предлагается энергосберегающая концепция импульсного магнитного извлечения ФТ из потока многокомпонентного материала в системе непрерывного транспорта, при обнаружении ФТ ферромодуляционными датчиками (ФМД) в условиях, когда вероятность их появления на входе в рабочую зону КЖ описывается законом редких событий с распределением Пуассона, позволяющая с высокой степенью вероятности обнаруживать и извлекать ФТ в потоке немагнитных зернистых, кусковатых, тонкоизмельченных и сыпучих материалов (рис. 1) [16].

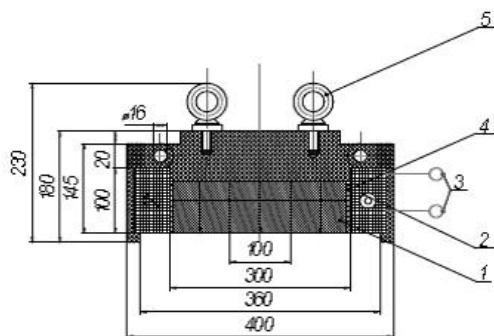


Рис. 2. Конструкция КЖ блочного типа для установки над лентой конвейера шириной 400 мм: 1 — блоки ПМ; 2 — обмотка; 3 — выводы обмотки; 4 — рейки деревянные, фиксирующие обмотки и магнитные плиты; 5 — рым-болты для подъема КЖ

Система сканирования материалопотока состоит из устройства подмагничивания, представляющего собой ПМ и ФМД, расположенные после погрузчика, по ходу движения конвейера. Это дает возможность максимально приблизить датчики к сканируемой поверхности сыпучей смеси. Выходные сигналы датчиков после преобразования в цифровую форму подаются в блок управления КЖ, который создает в рабочей области импульсы намагничивающей силы, заданной амплитуды и длительности для извлечения ФТ. После того как извлеченные ФТ под действием подъемных электромагнитных сил притянулись к поверхности полюсов КЖ, управляющие импульсы снимаются с обмоток и металломагнитные включения удерживаются на поверхности полюсов полем пондеромоторных сил, развиваемых ПМ до момента разгрузки. Конструкция комбинированного железоотделителя (рис. 2) состоит из блоков ПМ на основе $Fe-Ba$ или $Fe-Sr$, размещенных в обмотке прямоугольного сечения. Количество блоков КЖ определяется шириной ленты конвейера, имеет высокую энергоэффективность, гораздо меньшую металлоемкость, энергопотребление и быстрое действие, так как не имеет ферромагнитного сердечника.

Математическая модель. Расчет извлекающей силы, создаваемой одним индуктором КЖ, производится путем синтеза поля в рабочей области слоя материалопотока, находящегося под КЖ. Задача синтеза формулируется так: в рабочей зоне необходимо создать напряженность и градиент модуля напряженности магнитного поля такие, чтобы величина удельной пондеромоторной силы была достаточна для извлечения ФТ из потока многокомпонентной сыпучей смеси, т. е. выполнялось условие: $|HgradH| \geq 16 \cdot 10^{11} \text{ A}^2/\text{м}^3$. Такая величина удельной подъемной силы в рабочей области КЖ может быть получена импульсом тока $i = 2000 - 8000 \text{ A}$. Выполнить это условие можно путем нахождения намагничивающей силы обмотки, которая создает требуемое значение напряженности магнитного поля. Длительность импульса намагничивающей силы выбиралась исходя из условия времени перемещения ФТ из потока смеси в область действия магнитного поля КЖ и составляет 0,4 с. При расчетах делается допущение о том, что масса большинства ФТ не превышает примерно 1,5–2,0 кг, поэтому пренебрегаем их искажающим влиянием на поле, созданное обмоткой КЖ; индуктивность обмотки КЖ линейна; плотность тока распределяется одинаково по всем слоям обмотки.

Пиковое значение намагничивающей силы индуктора (A) определяется по формуле [17]:

$$F_{\text{нам}} = U \cdot w \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (1)$$

где U — напряжение, подводимое к индуктору, В;
 L — индуктивность обмотки, Гн;
 C — емкость импульсного конденсатора, Ф;
 λ — коэффициент затухания, значение которого зависит от параметров R, L, C — цепи;
 w — число витков в обмотке.

Для выполнения этого условия произведены расчеты электромагнитных и геометрических параметров индуктора КЖ с числом витков 60; 80; 100; 120; 140; 160; 180 и 200 при постоянной температуре обмоток 75°C , неизменной емкости импульсных конденсаторов 0,06 Ф и напряжении источника питания 500 В. К намотке на ребро принимались провода марки ПБ, число параллельных проводов в обмотке равно $n_p = 8$ [18]. Сечение витка обмотки будет изменяться от $132,8 \cdot 10^{-6}$ до $220 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Высота рассчитываемых обмоток будет изменяться l от 0,094 до 0,130 м, индуктивности обмоток L будут изменяться от $1,71 \cdot 10^{-3}$ до $16,82 \cdot 10^{-3}$ Гн, сопротивление обмоток будет изменяться от 0,120 до 0,128 Ом. Намагничивающие силы, развиваемые полем индуктора и рассчитанные по формуле (1), примут аperiодический характер. Проведенный анализ амплитуд намагничивающих сил от изменения высоты обмоток при постоянном напряжении источника питания $U = \text{const} = 500 \text{ В}$ позволяет сделать заключение о том, что увеличении числа витков обмотки до 60 витков и высоты обмотки l до 0,1 м ее намагничивающая сила достигнет максимума. Дальнейшее увеличение высоты обмотки не приведет к возрастанию намагничивающей силы, а только к увеличению числа витков и закупочной стоимости. Геометрические размеры индуктора зависят от выбранной глубины извлечения. Изменением амплитуды импульса намагничивающей силы индуктора можно регулировать скорость извлечения ФТ из потока немагнитного сыпучего вещества.

Напряженность поля, создаваемая индуктором в рабочей области КЖ, определяется из закона Био – Савара – Лапласа. Напряженность магнитного поля, создаваемого элементом тока $\tau_j \vec{1}_j$, определялась по [16]:

$$d\vec{H}_i = \frac{\tau_j \vec{1}_j \times \vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3} \cdot dS_j, \quad (2)$$

где \vec{r}_{ij} — вектор из точки наблюдения i в точку j поверхности с током;

τ — поверхностная плотность тока слоя обмотки, А/м.

Суммарная величина пондеромоторной силы (H), создаваемая индуктором такого КЖ, определялась как [16]:

$$F_{\text{пос}} = \vec{1}_z \sum_{k=1}^w \frac{\mu_0 \cdot \lambda \cdot m}{\rho} \times \left(H_x \frac{\partial H_x}{\partial z} + H_y \frac{\partial H_y}{\partial z} + H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right) \quad (3)$$

где H_x, H_y, H_z — напряженности магнитного поля в рабочей области, по осям $Ox; Oy; Oz$, А/м;

λ — объемная магнитная восприимчивость ФТ, о.е.;

ρ — плотность ФТ, кг/м³;

m — масса ФТ, кг.

Сила сопротивления движению ФТ в вертикальном направлении (Н), определялась по [16]:

$$F_C = \frac{\pi}{12} \cdot \rho_b \cdot d_{cf}^2 \cdot V_k^2 + m \left(\frac{\gamma \cdot d \cdot V_k}{L} + g + g\mu \right), \quad (4)$$

где ρ_b — плотность среды (воздуха), кг/м³. $\rho_b = 1,23$ кг/м³ [16];

V_k — скорость движения конвейера, м/с;

d_{cf} — диаметр ФТ, м;

d — толщина немагнитной сыпучей смеси на конвейере, м;

g — ускорение свободного падения, м/с² [19];

L — длина области действия железотделителя, м. $L=0,5$ м по [16];

μ — коэффициент трения, определяемый по [19], о.е. $\mu=0,5$.

γ — коэффициент внутреннего трения, определяемый по [20], о.е. $\gamma=70,6$.

В качества исследуемого металломагнитного включения принималась стальная сфера диаметром $d_{cf}=0,073$ м, выполненная из Ст 45 ($\chi=3$; $\rho=7450$ кг/м³; $m=1,52$ кг), которая удалена от поверхности полюсов на глубину до $h=0,3$ м. Сила сопротивления движению металлофрагмента в вертикальном направлении, рассчитанная по формуле (4), при скорости движения ленты конвейера $V_k=1,6$ м/с и толщине слоя угля класса АО на ленте $d=0,20$ м составляет $F_C=90,8$ Н. Статические $F_{MC}=f(h)$ и динамические характеристики $F_{MA}=f(t)$ КЖ, рассчитанные по формулам (1)–(3), представлены на рис. 3 и 4.

Анализ данных статических и динамических характеристик, представленных на рис. 3 и 4, позволяет сделать заключение о том, что в момент действия импульса пондеромоторной силы, созданного током в обмотке, гарантированное извлечение ФТ сферической формы будет на глубине до 0,10 м, так как силы извлечения превосходят силы сопротивления в указанном диапазоне глубин $F_M > F_C$ в 2,1–7,7 раза. Исследуемое ФТ в указанном диапазоне глубин приобретает необходимую начальную скорость, которая позволяет ему выйти на поверхность сыпучего немагнитного вещества и с нарастающим ускорением устремиться вверх к полюсам железотделителя.

Результаты экспериментов. Экспериментальные исследования одноблочного КЖ проводились на базе предприятия ГУП ЛНР «ГПКИ ОО «Гипромашуглеобогащение» во всем объеме рабочей области КЖ.

Цель экспериментов — измерение пондеромоторной силы, развиваемой в рабочей области, на модели КЖ и ее сравнение с данными, которые получены в процессе теоретических исследований.

Экспериментальная модель — макет КЖ, магнитная система которого собрана из магнитных пластин на основе Fe-Ba марки 29РА240 размером 100×80×40 мм, рассчитанного на ширину ленты конвейера 400 мм [16]. В качестве материала обмотки принят провод марки ПБ — $8 \frac{4,5 \cdot 6,3}{4,95 \cdot 6,75}$, сечение

витка $S_v=220$ мм². Для оценки извлекающей способности КЖ в его обмотку кратковременно подавался импульс тока для формирования импульса намагничивающей силы амплитудой $I_w=235$ кА. Извлекаемое ФТ — сфера диаметром $d_{cf}=0,073$ м, массой $m=1,52$ кг, выполненная из стали марки 45 погружалась в немагнитную сыпучую сухую сре-

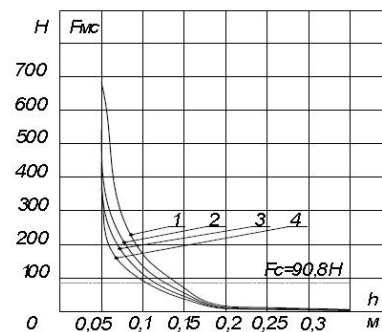


Рис. 3. Зависимости изменения пондеромоторных сил $F_{MC}=f(h)$ от глубины рабочей области, построенные в моменты времени действия импульса намагничивающей силы: 1. $t_{max}=0,064$ с; 2. $t_1=0,2$ с; 3. $t_2=0,3$ с; 4. $t_3=0,4$ с

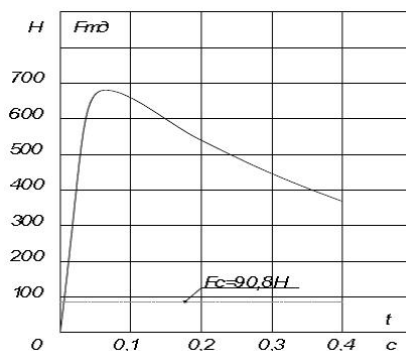


Рис. 4. Динамическая характеристика изменения пондеромоторной силы во времени $F_{MA}=f(t)$ в рабочей области КЖ

ду — песок на глубину извлечения $h=0,05...0,15$ м от поверхности полюсов КЖ. Проведенные испытания в ГУП ЛНР «ГПКИ ОО «Гипромашуглеобогащение» на макете КЖ показали, что при появлении ФТ на входе в подсистему сепарации, двигающегося со скоростью 1,6–2,5 м/с, работа в импульсном режиме позволяет сократить время извлечения металлофрагмента до 0,9 с, зону срабатывания до 1,44–2,25 м и непроизводительный расход электроэнергии в 4,8–8,3 раза, в сравнении с серийно выпускаемыми моделями подвесных железотделителей серии ДЖШ, которые включаются по сигналу металлодетектора в тот момент времени, когда ФТ находится на расстоянии 12 м от его рабочей зоны [6, 8].

На предприятиях с суточной производительностью сыпучей продукции от 1000 до 10000 т работа одного блока КЖ над плоской лентой конвейера шириной 0,4 м при угле откоса в движении $\varphi=15^\circ$, коэффициенте наполнения $\psi=1$, $C_0=174$ и изменении скорости ленты конвейера V_k от 1,6 до 2,5 м/с позволяет увеличить производительность в 1,56 раза от 45,5 до 70,0 т/ч [16].

В результате обработки экспериментальных данных получены значения пондеромоторных сил в зависимости от глубины извлечения и сопоставлены с теоретическими значениями пондеромоторных сил. Экспериментальные исследования позволили выявить, что макет комбинированного железотделителя, разработанный по предлагаемой методике, извлекает около 95,7–98,0 % ферромагнитных частиц из песка.

Заключение. 1. Предложена и обоснована энергосберегающая структура транспортно-технологической подсистемы сепарации — обнаружения ФТ в немагнитной сыпучей среде. На ее основе разработаны устройства сигнализации и управления током в извлекающих обмотках, а также предложен комбинированный способ извлечения ФТ из потока сыпучего вещества. Реализация предложенного энергосберегающего подхода позволяет снизить скорости движения (1,6–2,5 м/с) ленты конвейера в 4,8–8,3 раза, повысить производительность очистки в 1,25 раза и ее эффективность в 1,2–2,7 раза.

2. Проведено математическое моделирование работы электромагнитной системы КЖ, на основе которого предложена математическая модель магнитного поля в его рабочей области, позволяющая определить извлекающую силу от обмотки с током.

3. Предложен энергосберегающий метод извлечения ФТ из потока транспортируемых сухих многокомпонентных кусковых, тонкоизмельченных, зернистых и сыпучих сред, который заключается в комбинированном воздействии пондеромоторных сил магнитного поля на извлекаемые металломагнитные включения. Для получения наибольшего значения пондеромоторных сил в рабочей области КЖ направление вектора намагниченности в ПМ должно совпадать с направлением силовых линий магнитного поля обмоток с током. Данный метод позволяет выполнить расчет геометрических и электромагнитных параметров КЖ с целью энергосбережения, минимизации производственных и эксплуатационных затрат.

4. В настоящей работе предлагается решение задачи энергосбережения основных технологических процессов производства, поставленной в [1].

Любые производимые изменения в технике, технологиях или управление должны учитывать и корпоративную социальную ответственность [21].

Библиографический список

1. Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 23.11.2009 года № 261-ФЗ. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1511> (дата обращения: 02.06.2023).
2. Пелевин А. Е. Магнитные и электрические методы обогащения. Магнитные методы обогащения. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. 296 с. ISBN 978-5-8019-0435-1.
3. Загирияк М. В., Бранспиз Ю. А., Шведчикова И. А. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: моногр. / под общей ред. М. В. Загирияка. Киев: Техніка, 2011. 224 с. ISBN 978-966-575-194-6.
4. Парсентьев О. С. Обзор существующих железотделителей и анализ магнитного поля в рабочей области комбинированного железотделителя: моногр. Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2019. 152 с.
5. Musaev T., Khabibullin M., Fedorov O. Developing a Method Providing for the Accurate Assessment of Actual 6 (10) kV Transformer Load Using Data from Smart Electric Energy Metering Systems // Conference: 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2022. P. 7–11. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787155. EDN: MGFBJC.
6. Железотделители (Магнитные сепараторы). URL: <https://dimalmag.ru/production/separators/> (дата обращения: 05.06.2023).
7. Постоянные магниты. Магнитные системы. URL: <https://technomagproduct.nethouse.ru> (дата обращения: 05.06.2023).

8. Железотделители. Подвесные. URL: <https://vikron.ru> (дата обращения: 15.06.2023).
9. Электромагнитные железотделители. URL: <https://electromagnet.ru> (дата обращения: 21.06.2023).
10. Оборудование вспомогательное. Железотделители. URL: <https://xinhaimining.ru/> (дата обращения: 21.06.2023).
11. Промышленные магниты. Каталог. Плита магнитная с механической очисткой (ПММ). URL: <https://magnetpro.ru> (дата обращения: 25.06.2023).
12. А. с. 944658 А1 СССР, МПК В 03 С 1/04. Подвесной электромагнитный железотделитель / Карташян В. О. № 2991655/22-03; заявл. 08.10.80; опубл. 27.07.82, Бюл. № 27.
13. А. с. 1036386 А СССР, МПК В 03 С 1/08. Подвесной электромагнитный железотделитель / Карташян В. О., Алферов Г. Н., Пожарский В. Д., Кузнецов Н. И. № 3365442/22-03; заявл. 17.12.81; опубл. 23.08.83, Бюл. № 31.
14. Кармазин В. И., Кармазин В. В. Магнитные и электрические методы обогащения. Москва: Недра, 1988. 304 с. ISBN 5-247-00169-9.
15. Бибииков П. Я. Очистка конвейерной ленты. Взгляд на проблему // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 3. С. 300–302. EDN: IFACSTF.
16. Парсентьев О. С. Обеспечение качества очистки немагнитных сыпучих сред в транспортных системах комбинированным железотделителем: дис. ... канд. техн. наук. Луганск. 2021. 206 с.
17. Бочкарев О. В. О намагничивании постоянных магнитов от импульсных конденсаторных установок // Электротехника. 1971. № 6. С. 52–53.
18. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
19. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. Москва: Наука, 1988. 256 с.
20. Бранспиз Ю. А. Теория расчета силового воздействия магнитного поля на магнетики. Луганск: Изд-во ВУГУ, 1997. 128 с.
21. Кукукина И. Г., Федоров О. В. Дидактические методы КСО // Инновационные технологии в образовательной деятельности: материалы XXV Междунар. науч.-метод. конф. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2023. С. 247–251. DOI: 10.46960/intech_2022_247. EDN: MBQSSB.

ПАРСЕНТЬЕВ Олег Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
SPIN-код: 7974-9547
AuthorID (РИНЦ): 1216808
ORCID: 0009-0005-1639-0730
Адрес для переписки: parsentevo@mail.ru
МУСАЕВ Тимур Абдулаевич, кандидат технических наук, начальник отдела анализа потерь электрической энергии АО «Сетевая компания», г. Казань.
SPIN-код: 9406-8249
AuthorID (РИНЦ): 1067018
ORCID: 0000-0002-0868-3841
Адрес для переписки: musaevkgeu@rambler.ru

Для цитирования

Парсентьев О. С., Мусаев Т. А. Обеспечение качества очистки многокомпонентных сред, перемещаемых ленточными конвейерами энергосберегающим импульсным магнитным извлечением // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 86–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-86-92.

Статья поступила в редакцию 31.08.2023 г.
© О. С. Парсентьев, Т. А. Мусаев

QUALITY ASSURANCE MULTI-COMPONENT ENVIRONMENTS MOVED BELT CONVEYORS ENERGY SAVING PULSED MAGNETIC EXTRACTION

The article presents theoretical and practical aspects of improving the designs of existing separation subsystems using the results of historical and patent information studies used to detect and extract ferromagnetic bodies in a flow of multicomponent non-magnetic lumpy, granular and finely divided and friable media. A new energy-saving technological approach proposed with the effect of synchronously improving the performance of the transport and technological system and reducing the cost and energy costs during its operation, in particular in the material flow separation subsystem.

A subsystem for the separation-detection of metal fragments in a non-magnetic granular medium proposed for the development of signaling and current control devices in extracting windings.

To increase the extraction capacity during the purification of non-magnetic granular media, a design of a combined iron separator proposed. Mathematical modeling of the operation of the electromagnetic system of the combined iron separator of the transport system is carried out, on the basis of which a mathematical model of the magnetic field in its working area is proposed, which makes it possible to determine the extracting force from the windings with and current. An experimental verification of the results of theoretical studies of pulsed magnetic extraction of ferromagnetic bodies from a granular medium is carried out.

Keywords: combined iron separator, ferromodulation sensors, ponderomotive force, magnetizing force, current pulse, ferromagnetic body, winding, permanent magnets.

References

1. Ob energosberezhenii i povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii: Feder. zakon ot 23.11.2009 goda № 261-F3 [On Energy Saving and Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation: Federal Law of November 23, 2009 No. 261-F3]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1511> (accessed: 02.06.2023). (In Russ.).
2. Pelevin A. E. Magnitnyye i elektricheskiye metody obogashcheniya. Magnitnyye metody obogashcheniya [Magnetic and electrical methods of enrichment. Magnetic enrichment methods]. Yekaterinburg, 2018. 296 p. ISBN 978-5-8019-0435-1. (In Russ.).
3. Zagirnyak M. V., Branspiz Yu. A., Shvedchikova I. A. Magnitnyye separatory. Problemy proyektirovaniya [Magnetic separators. Design problems] / Ed. by M. V. Zagirnyaka. Kiev, 2011. 224 p. ISBN 978-966-575-194-6. (In Russ.).
4. Parsentev O. S. Obzor sushchestvuyushchikh zhelezootdeliteley i analiz magnitnogo polya v rabochey oblasti kombinirovannogo zhelezootdelatelya [Review of existing iron separators and analysis of the magnetic field in the working area of the combined iron separator]. Lugansk, 2019. 152 p. (In Russ.).
5. Musaev T., Khabibullin M., Fedorov O. Developing a Method Providing for the Accurate Assessment of Actual 6 (10) kV Transformer Load Using Data from Smart Electric Energy Metering Systems // Conference: 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2022. P. 7–11. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787155. EDN: MGFBJC. (In Engl.).
6. Zhelezootdeliteli (Magnitnyye separatory) [Iron separators (Magnetic separators)]. URL: <https://dimalmag.ru/production/separators/> (accessed: 05.06.2023). (In Russ.).
7. Postoyannyye magnity. Magnitnyye sistemy [Permanent magnets. Magnetic systems]. URL: <https://technomagproduct.nethouse.ru> (accessed: 05.06.2023). (In Russ.).
8. Zhelezootdeliteli. Podvesnyye [Iron separators. Suspended]. URL: <https://vikron.ru> (accessed: 15.06.2023). (In Russ.).
9. Elektromagnitnyye zhelezootdeliteli [Electromagnetic iron separators]. URL: <https://electromagnet.ru> (accessed: 21.06.2023). (In Russ.).

10. Oborudovaniye vspomogatel'noye. Zhelezootdeliteli [Auxiliary equipment. Iron separators]. URL: <https://xinhaimining.ru/> (accessed: 21.06.2023). (In Russ.).
11. Promyshlennyye magnity. Katalog. Plita magnitnaya s mekhanicheskoy ochistkoy (PMM) [Industrial magnets. Catalog. Magnetic plate with mechanical cleaning (MPC)]. URL: <https://www.magnetpro.ru> (accessed: 25.06.2023). (In Russ.).
12. Certificate of Authorship 944658 A1 USSR, IPC B 03 C 1/04. Podvesnoy elektromagnitnyy zhelezootdelitel' [Suspended electromagnetic iron separator] / Kartashyan V. O. No. 2991655/22-03. (In Russ.).
13. Certificate of Authorship 1036386 A USSR, IPC B 03 C 1/08. Podvesnoy elektromagnitnyy zhelezootdelitel' [Suspended electromagnetic iron separator] / Kartashyan V. O., Alferov G. N., Pozharskiy V. D., Kuznetsov N. I. No. 3365442/22-03. (In Russ.).
14. Karmazin V. I., Karmazin V. V. Magnitnyye i elektricheskiye metody obogashcheniya [Magnetic and electrical methods of enrichment]. Moscow, 1988. 304 p. (In Russ.).
15. Bibikov P. Ya. Ochistka konveyernoy lenty, vzglyad na problemu [Cleaning the conveyor belt, a look at the problem] // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2004. No. 3. P. 300–302. EDN: IFACTF. (In Russ.).
16. Parsentev O. S. Obespecheniye kachestva ochistki nemagnitnykh sypuchikh sred v transportnykh sistemakh kombinirovannym zhelezootdelitelem [Ensuring the quality of cleaning of non-magnetic granular media in transport systems with a combined iron separator]. Lugansk, 2021. 206 p. (In Russ.).
17. Bochkarev O. V. O namagnichivanii postoyannykh magnetov ot impul'snykh kondensatornykh ustanovok [On the magnetization of permanent magnets from pulsed capacitor units] // *Elektrotehnika. Electrical Engineering*. 1971. No. 6. P. 52–53. (In Russ.).
18. Tikhomirov P. M. Raschet transformatorov [Calculation of transformers]. Moscow, 1986. 528 p. (In Russ.).
19. Koshkin N. I., Shirkevich M. G. Spravochnik po elementarnoy fizike [Handbook of elementary physics]. Moscow, 1988. 256 p. (In Russ.).
20. Branspiz Yu. A. Teoriya rascheta silovogo vozdeystviya magnitnogo polya na magnetiki [The theory of calculation of the force impact of a magnetic field on magnets]. Lugansk, 1997. 128 p. (In Russ.).
21. Kukukina I. G., Fedorov O. V. Didakticheskiye metody KSO [Didactic methods of CSR] // *Innovatsionnyye tekhnologii v obrazovatel'noy deyatel'nosti. Innovative Technologies in Educational Activities*. Nizhny Novgorod, 2023. P. 247–251. DOI: 10.46960/intech_2022_247. EDN: MBQSSB. (In Russ.).

PARSENTEV Oleg Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Power Engineering Department, Lugansk State University named after Vladimir Dal, Lugansk.

SPIN-code: 7974-9547

AuthorID (RSCI): 1216808

ORCID: 0009-0005-1639-0730

Correspondence address: parsentev@mail.ru

MUSAEV Timur Abdulayevich, Candidate of Technical Sciences, Head of Power Losses Analysis Department, «Grid Company» JSC, Kazan.

SPIN-code: 9406-8249

AuthorID (RSCI): 1067018

ORCID: 0000-0002-0868-3841

Correspondence address: musaevkgeu@rambler.ru

For citations

Parsentev O. S., Musaev T. A. Quality assurance multi-component environments moved belt conveyors energy saving pulsed magnetic extraction // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 86–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-86-92.

Received August 31, 2023.

© O. S. Parsentev, T. A. Musaev

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СХЕМ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ

В статье представлена классификация предохранителей, рубильников, автоматических и пакетных выключателей. Определены законы изменения вероятностных характеристик надежности исследуемых аппаратов, а также кабельных линий низкого напряжения. Определены виды функций изменения основных параметров надежности и показаны соответствующие графические зависимости. Проведено сравнение полученных результатов значений вероятности времени безотказной работы с требованиями ГОСТ и паспортными данными. Исследуемые вероятностные параметры низковольтных аппаратов и кабельных линий проверены на соответствие принятому закону распределения случайных величин.

Ключевые слова: система внутрицехового электроснабжения, вероятность времени безотказной работы, вероятность времени отказа, предохранитель, рубильник, автоматический выключатель, пакетный выключатель, кабельная линия.

Введение. В настоящее время, с развитием новых типов оборудования [1, 2], целесообразной становится разработка и уточнение имеющихся алгоритмов определения вероятностных параметров оборудования систем внутрицехового электроснабжения. В современных условиях, как правило, при отказах электроустановок производят их замену, а не проводят ремонты [3].

При этом актуальной является разработка алгоритмов и моделей для увеличения достоверности вероятностных оценок параметров надежности электроустановок и повышения качества эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения [4, 5]. Как известно, режимы эксплуатации электрооборудования также влияют на надежность работы схем цеховых сетей [6, 7].

Научной новизной предлагаемой статьи является уточнение алгоритмов оценки надежности функционирования оборудования внутризаводского электроснабжения с использованием эксплуатационных данных [8–10].

Практическая значимость данной статьи состоит в разработке алгоритмов уточненной оценки характеристик надежности электроустановок низкого напряжения [11–13]. При этом проведен анализ расчетных и эксплуатационных данных исследуемой информации функциональных параметров работы и выхода из строя элементов оборудования цеховых сетей [14–16].

На рис. 1–4 представлена разработанная классификация основных характеристик предохраните-

лей, рубильников, автоматических и пакетных выключателей.

На рис. 5 приведена схема участка цеховой сети с установкой исследуемого электрооборудования:

- предохранителей ПР1–ПР4;
- рубильников Р1, Р2;
- автоматических выключателей АВ1–АВ5;
- пакетных выключателей ПВ1–ПВ5;
- кабельных линий КЛ1–КЛ11.

Постановка задачи. Для исследования проанализируем эксплуатационные характеристики низковольтных электроустановок:

- предохранителей ППН-33 (завода-изготовителя АО «Корневский завод низковольтной аппаратуры», Курская область, пгт Корнево);
 - рубильников РЕ19-41 («Курский электроаппаратный завод» (КЭАЗ), г. Курск);
 - автоматических выключателей ВА13 (КЭАЗ, г. Курск);
 - пакетных выключателей ПВ3-16 (ЕКФ, г. Москва);
- а также кабелей АВВГ-0,4 кВ (ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ, г. Орел, г. Москва, г. Екатеринбург).

Вычислим значение вероятности времени безотказной работы — $P(t)$ и значение вероятности времени появления отказа $Q(t)$ [17]:

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{средн}} - t_u}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}, \quad (1)$$

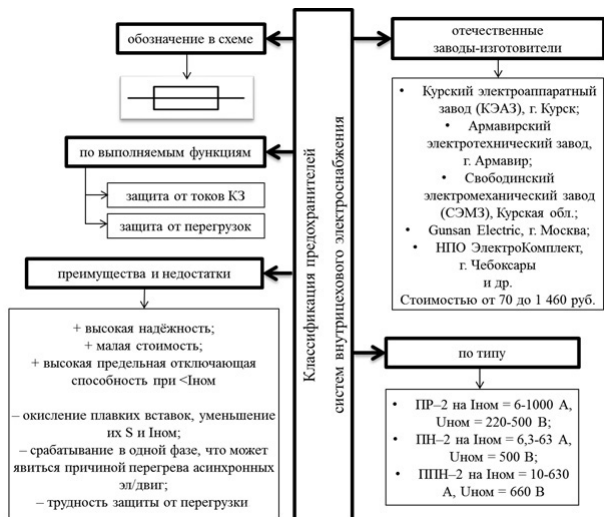


Рис. 1. Классификация низковольтных предохранителей систем внутризаводского электроснабжения

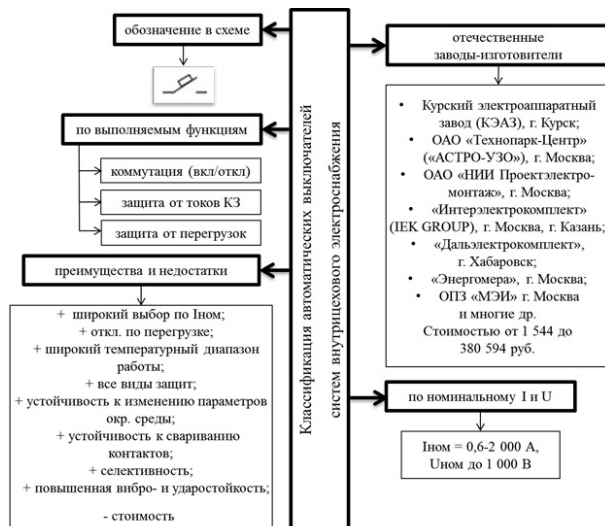


Рис. 3. Классификация автоматических выключателей систем внутризаводского электроснабжения

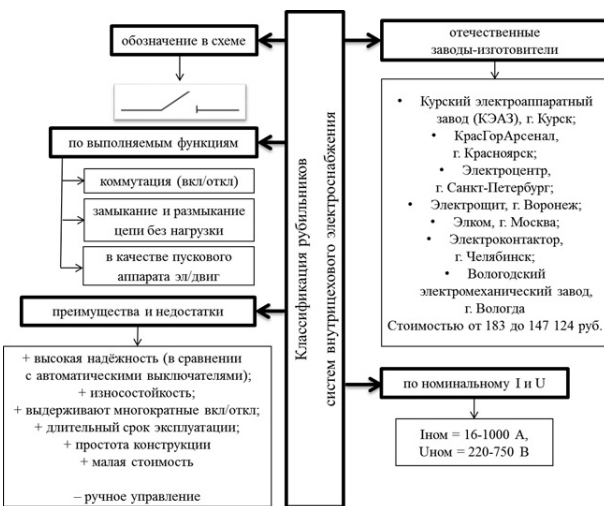


Рис. 2. Классификация рубильников систем внутризаводского электроснабжения

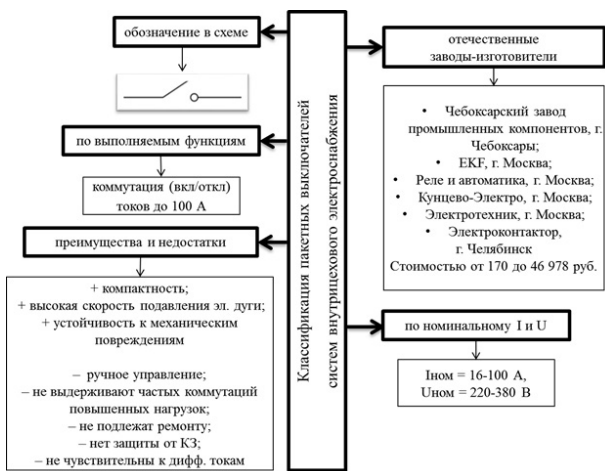


Рис. 4. Классификация пакетных выключателей систем внутризаводского электроснабжения

$$Q(t) = 1 - P(t) = \int_0^t e^{-\frac{(t_i - T_{ср\text{едн}})^2}{2\sigma_{скв}^2}} dt \quad (2)$$

где t_i — значение времени экспериментального исследования, г.;

$T_{ср\text{едн}}$ — значение среднего времени наработки до выхода из строя электрооборудования, г.;

$\sigma_{скв}$ — значение среднеквадратического отклонения времени наработки до выхода из строя, г.;

F — значение функции Лапласа.

Экспериментальные значения величин функций $P^*(t_i)$ и $Q^*(t_i)$:

$$P^*(t_i) = \frac{N_{общ} - n_{i,сум}(t)}{N_{общ}} \quad (3)$$

$$Q^*(t_i) = 1 - P^*(t_i) = \frac{n_{i,сум}(t)}{N_{общ}} \quad (4)$$

где $n_{i,сум}(t)$ — суммарная величина вышедших из строя единиц оборудования, шт.;

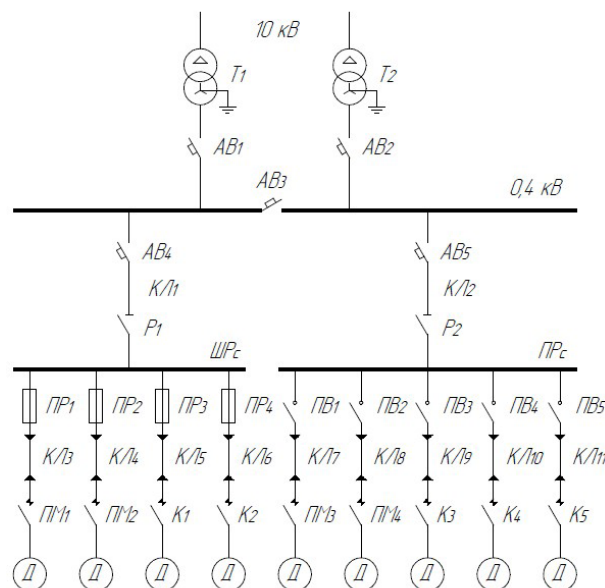


Рис. 5. Схема участка цеховой сети

$N_{\text{общ}}$ — значение суммарной величины исследуемых единиц оборудования, шт.

Для предохранителей ППН-33, $I_{\text{ном}} = 2-160$ А значение времени исследования принимаем $t_u = 16$ лет, число вышедших из строя единиц оборудования — 190, число наблюдаемых единиц оборудования — 281. Вычислим $P_{\text{np}}^*(t_i)$ и $Q_{\text{np}}^*(t_i)$:

$$P_{\text{np}}^*(t = 1...4) = \frac{281-0}{281} = 1,000$$

$$Q_{\text{np}}^*(t = 1...4) = \frac{0}{281} = 0,000$$

$$P_{\text{np}}^*(t = 5) = \frac{281-1}{281} = 0,996$$

$$Q_{\text{np}}^*(t = 5) = \frac{1}{281} = 0,004$$

$$P_{\text{np}}^*(t = 6) = \frac{281-2}{281} = 0,993$$

$$Q_{\text{np}}^*(t = 6) = \frac{2}{281} = 0,007$$

$$P_{\text{np}}^*(t = 7) = \frac{281-4}{281} = 0,986$$

$$Q_{\text{np}}^*(t = 7) = \frac{4}{281} = 0,014$$

$$P_{\text{np}}^*(t = 8) = \frac{281-7}{281} = 0,975$$

$$Q_{\text{np}}^*(t = 8) = \frac{7}{281} = 0,025$$

Данные вычислений представлены в табл. 1. Тогда время средней наработки на отказ [17]:

$$\bar{T}_{\text{средн.нр}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{общ.нр}}} t_{i\text{нр}}}{N_{\text{общ.нр}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{общ.нр}}} n_{i\text{нр}} \cdot t_{\text{ср}i}}{N_{\text{общ.нр}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{общ.нр}}$ — общее число всех исследуемых предохранителей, шт.;

$n_{i\text{нр}}$ — величина отказавших предохранителей на i -ом интервале.

Не рассматривая первые 6 лет наблюдений (т.к. число вышедших из строя предохранителей за каждый год примерно равно нулю), вычислим величину среднеквадратического отклонения параметра времени безотказной работы [17]:

$$\sigma_{\text{сквнр}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_{i\text{нр}} - T_{\text{средн.нр}})^2}{t}}. \quad (6)$$

Таблица 1

Результаты исследования работоспособности предохранителей ППН-33 за интервал наблюдений = 16 годам

Интервал наблюдений, t_i , годы	Общее число аппаратов, шт.			Значение функций распределения вероятностей по эксплуатационным данным	
	вышедших из строя за каждый год наблюдений n_i	общее число неработоспособных $n_{i,\text{сум}}(t)$	работоспособных, I_i	$P_{\text{np}}^*(t_i)$	$Q_{\text{np}}^*(t_i)$
				$P_{\text{np}}^*(t_i) = \frac{N_{\text{общ}} - n_{i,\text{сум}}(t)}{N_{\text{общ}}}$	$Q_{\text{np}}^*(t_i) = 1 - P^*(t_i)$
1	0	0	281	1,000	0,000
2	0	0	281	1,000	0,000
3	0	0	281	1,000	0,000
4	0	0	281	1,000	0,000
5	1	1	280	0,996	0,004
6	1	2	279	0,993	0,007
7	2	4	277	0,986	0,014
8	3	7	274	0,975	0,025
9	5	12	269	0,957	0,043
10	8	20	261	0,929	0,071
11	16	36	245	0,872	0,128
12	22	58	223	0,794	0,206
13	25	83	198	0,705	0,295
14	31	114	167	0,594	0,406
15	39	153	128	0,456	0,544
16	37	190	91	0,324	0,676

Для предохранителей ППН-33:

$$\bar{T}_{\text{средн.нр}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{общ}}} n_{i, \text{нр}} \cdot t_{\text{средн.нр}}}{N_{\text{общ.нр}}} = \frac{7 \cdot 2 + 8 \cdot 3 + 9 \cdot 5 + 10 \cdot 8 + 11 \cdot 16 + 12 \cdot 22 + 13 \cdot 25 + 14 \cdot 31 + 15 \cdot 39 + 16 \cdot 37}{190} = \frac{2539}{190} = 13,3$$

$$\sigma_{\text{скв.нр}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(t_{i, \text{нр}} - T_{\text{средн.нр}})^2}}{n}} = \sqrt{\frac{\sqrt{(7-13,3)^2} + \sqrt{(8-13,3)^2} + \sqrt{(9-13,3)^2} + \sqrt{(10-13,3)^2} + \sqrt{(11-13,3)^2} + \sqrt{(12-13,3)^2} + \sqrt{(13-13,3)^2} + \sqrt{(14-13,3)^2} + \sqrt{(15-13,3)^2} + \sqrt{(16-13,3)^2}}{16}} = 3,1$$

Таким образом, по результатам вычислений $\sigma_{\text{скв.нр}} = 3$ года; $T_{\text{средн.нр}} = 13$ лет.

Теоретическая функция вероятности времени безотказной работы рассчитывается по формулам (1) – (2). Определим $P_{\text{нр}}(t)$ и $Q_{\text{нр}}(t)$ для предохранителей ППН-33:

$$P_{\text{нр}}(t = 1) = \frac{F(5,4)}{F(5,769)} = \frac{1,000}{1,000} = 1,000$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 1) = 0,000 ;$$

$$P_{\text{нр}}(t = 5) = \frac{F(3,8)}{F(5,769)} = \frac{1,000}{1,000} = 1,000$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 5) = 0,000 ;$$

$$P_{\text{нр}}(t = 7) = \frac{F(3,1)}{F(5,769)} = \frac{0,999}{1,000} = 0,999$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 7) = 1 - 0,999 = 0,001 ;$$

$$P_{\text{нр}}(t = 8) = \frac{F(2,7)}{F(5,769)} = \frac{0,996}{1,000} = 0,996$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 8) = 1 - 0,996 = 0,004 ;$$

$$P_{\text{нр}}(t = 9) = \frac{F(2,3)}{F(5,769)} = \frac{0,989}{1,000} = 0,989$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 9) = 1 - 0,989 = 0,011 .$$

Таблица 2

Результаты оценок характеристик надежности для предохранителей ППН-33

Интервал наблюдений, t_i годы	Значение $\frac{T_{\text{средн}} - t}{\sigma_{\text{скв}}}$	Значение функции $F\left(\frac{T_{\text{средн}} - t}{\sigma_{\text{скв}}}\right)$	$\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}$	$F\left(\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}\right)$	Функция распределения	
					$P_{\text{нр}}(t)$	$Q_{\text{нр}}(t)$
					$P_{\text{нр}}(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{средн}} - t_i}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}$	$Q_{\text{нр}}(t) = 1 - P(t)$
1	5,4	1,000	5,769	1,000	1,000	0,000
2	5,0	1,000			1,000	0,000
3	4,6	1,000			1,000	0,000
4	4,2	1,000			1,000	0,000
5	3,8	1,000			1,000	0,000
6	3,5	1,000			1,000	0,000
7	3,1	0,999			0,999	0,001
8	2,7	0,996			0,996	0,004
9	2,3	0,989			0,989	0,011
10	1,9	0,973			0,973	0,027
11	1,5	0,938			0,938	0,062
12	1,2	0,876			0,876	0,124
13	0,8	0,779			0,779	0,221
14	0,4	0,650			0,650	0,350
15	0,0	0,500			0,500	0,500
16	-0,4	0,350			0,350	0,650

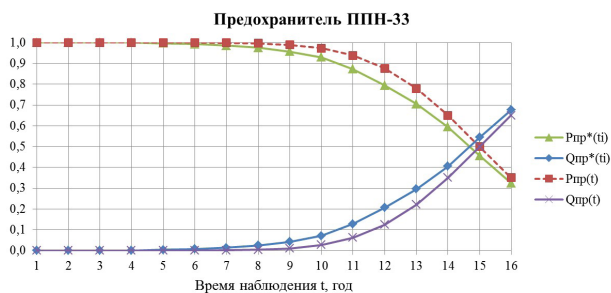


Рис. 6. Графические зависимости изменения во времени $P_{пр}^*(t)$, $Q_{пр}^*(t)$, $P_{пр}(t)$, $Q_{пр}(t)$ для предохранителей ППН-33

Данные вычислений приведены в табл. 2.

На рис. 6 даны графические зависимости изменения во времени $P_{пр}^*(t)$, $Q_{пр}^*(t)$, $P_{пр}(t)$ и $Q_{пр}(t)$ для предохранителей ППН-33.

Результаты экспериментов. По данным экспериментальных исследований и ГОСТ 17242-86, в интервале первых одиннадцати лет работы аппаратов (при паспортном сроке службы, равном десяти годам) $P_{пр}(t)$ исследуемых предохранителей ППН-33 оценивается величиной, не менее 0,872, что показывает сохранение нормативных параметров в течение паспортного срока эксплуатации.

Таблица 3

Результаты исследований параметров отказов электрооборудования

Тип и марка электроустановок	Число неработоспособных n , шт.	Общее число исследуемых образцов $N_{общ}$, шт.	Интервал экспериментальных наблюдений $t_{наб}$, лет	Время средней наработки до отказа $T_{средн}$, лет	Значение среднеквадратического отклонения $\sigma_{ср}$, лет
Предохранитель ППН-33	190	281	16	13	3
Рубильник РЕ19-41	145	162	23	20	3,6
Автоматический выключатель ВА13	215	281	15	13	2,5
Пакетный выключатель ПВ3-16	117	205	21	18	2,6
Кабельная линия АВВГ-0,4 кВ	66	73	35	30	1,6

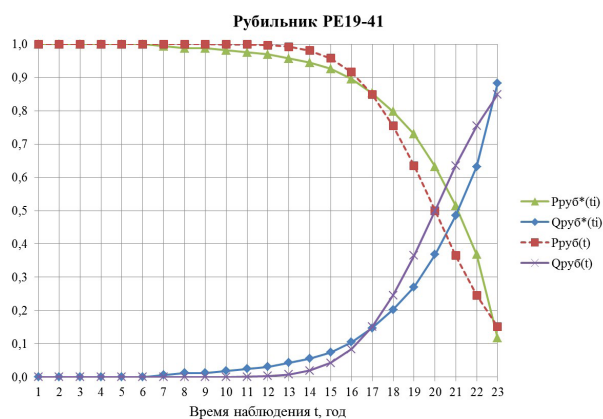


Рис. 7. Графические зависимости изменения во времени $P_{руб}^*(t)$, $Q_{руб}^*(t)$, $P_{руб}(t)$, $Q_{руб}(t)$ для рубильников РЕ19-41

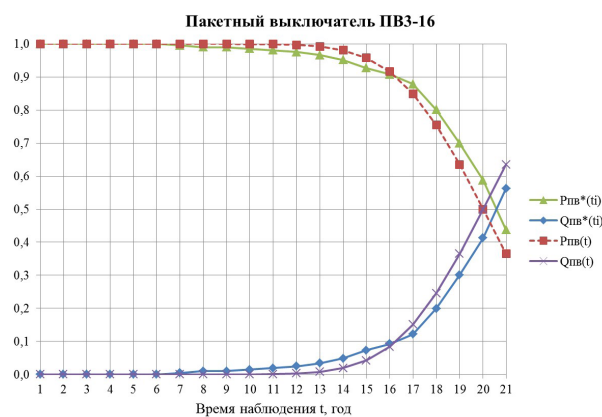


Рис. 9. Графические зависимости изменения во времени $P_{пв}^*(t)$, $Q_{пв}^*(t)$, $P_{пв}(t)$, $Q_{пв}(t)$ для пакетных выключателей ПВ3-16

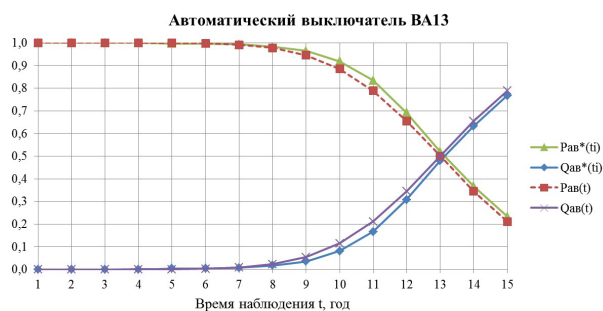


Рис. 8. Графические зависимости изменения во времени $P_{ав}^*(t)$, $Q_{ав}^*(t)$, $P_{ав}(t)$, $Q_{ав}(t)$ для автоматических выключателей ВА13

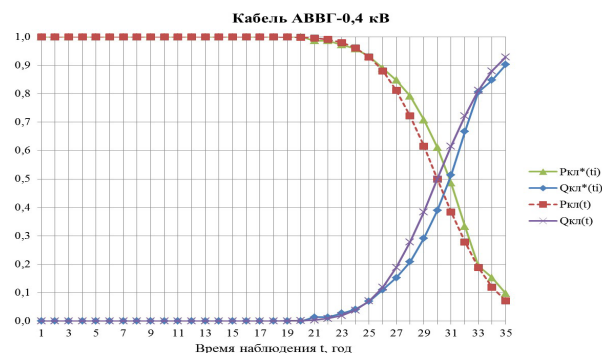


Рис. 10. Графические зависимости изменения во времени $P_{кл}^*(t)$, $Q_{кл}^*(t)$, $P_{кл}(t)$, $Q_{кл}(t)$ для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ

Результаты исследования параметров отказов электрооборудования представлены в табл. 3.

На рис. 7–10 представлены графики вероятностей времени безотказной работы и появления от-каза для:

- рубильников РЕ19-41 с $I_{ном}$ до 1000 А;
- автоматических выключателей ВА13 с $I_{ном} = 0,6–63$ А;
- пакетных выключателей ПВ3-16 с $I_{ном} = 16–100$ А;

и кабелей АВВГ-0,4 кВ сечением $S=2,5–240$ мм².

Для рубильников РЕ19-41 интервал времени наблюдения равен $t = 23$ года, число неработоспособных аппаратов за данный интервал — 145, общее число наблюдаемых — 162.

По данным экспериментальных исследований и ГОСТ 12434-83 в интервале первых пятнадцати лет работы (при паспортном сроке службы аппаратов, равном десяти годам) $P_{выс}(t)$ исследуемых рубильников РЕ19-41 оценивается величиной не менее 0,975, что показывает сохранение нормативных параметров в течение паспортного срока эксплуатации.

Для автоматических выключателей ВА13 время наблюдения принято равным 15 годам, количество отказавших элементов за данный интервал — 215, общее количество рассматриваемых элементов — 281.

Данные рис. 8 показывают, что, в соответствии с ГОСТ 12434-83 и ГОСТ 9098-78, вероятность безотказной работы автоматических выключателей ВА13 остается не ниже 0,8 в течение 11 лет, что подтверждает сохранение данного параметра для паспортного срока службы аппаратов, равного 10 годам.

Для пакетных выключателей ПВ3-16 интервал времени наблюдения составил $t=21$ год, число неработоспособных за данный интервал — 117, общее число исследуемых — 205.

Для пакетных выключателей, по результатам исследований и по данным ГОСТ 12434-83 $P_{пр}(t)$, оценивается величиной, равной не менее 0,908 в интервале первых шестнадцати лет работы (при паспортном значении 0,8), что показывает сохранение данного параметра допустимому значению для паспортного периода эксплуатации в пять лет).

Для кабелей АВВГ-0,4 кВ в интервале исследования $t=35$ годам число неработоспособных линий составляет 66 при общем их числе, равном 73.

Для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ по результатам исследований и данным ГОСТ-12434-83 $P_{ка}(t)$ оценивается величиной не менее 0,847 в интервале первых 27 лет работы (при паспортном значении срока эксплуатации в 25 лет), что показывает соответствие данного параметра допустимой величине для нормативного периода эксплуатации.

Алгоритмы проверки установленного закона распределения исследуемых параметров электрооборудования. Используя критерий Колмогорова, рассчитаем расхождение между теоретическими и экспериментальными данными D_n :

$$D_n = |Q_{np}(t_i) - Q_{np}(t)|. \quad (7)$$

Вычислим случайную величину:

$$y_n = D_n \sqrt{n} = |Q_{np}(t_i) - Q_{np}(t)| \cdot \sqrt{n}, \quad (8)$$

где n — число неработоспособных электроустановок за исследуемый период.

Рассчитаем расхождение результатов и случайную величину у 1...16 для предохранителей ППН-33:

$$D_{1,2,3,4} = |0,000 - 0,000| = 0,000$$

$$y_{1,2,3,4} = 0,000 \cdot \sqrt{190} = 0,000;$$

Таблица 4

Результаты проверки вероятности времени появления отказов предохранителей ППН-33 по критерию Колмогорова

Интервал наблюдений, t_i , годы	Экспериментальные результаты расчета $Q_{np}^*(t_i)$	Теоретические результаты расчета $Q_{np}(t)$	Расхождение $D_n = Q_{np}^*(t_i) - Q_{np}(t) $	Случайная величина $y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции $P(y_n)$
1	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
5	0,004	0,000	0,004	0,048	1,000
6	0,007	0,000	0,007	0,094	1,000
7	0,014	0,001	0,013	0,182	1,000
8	0,025	0,004	0,021	0,294	0,999
9	0,043	0,011	0,032	0,444	0,988
10	0,071	0,027	0,044	0,606	0,855
11	0,128	0,062	0,066	0,912	0,377
12	0,206	0,124	0,082	1,132	0,147
13	0,295	0,221	0,074	1,027	0,243
14	0,406	0,350	0,055	0,764	0,604
15	0,544	0,500	0,044	0,613	0,845
16	0,676	0,650	0,026	0,364	0,999

$$D_5 = |0,004 - 0,000| = 0,004$$

$$y_5 = 0,004 \cdot \sqrt{190} = 0,048 ;$$

$$D_6 = |0,004 - 0,003| = 0,001$$

$$y_6 = 0,001 \cdot \sqrt{190} = 0,014 ;$$

$$D_7 = |0,007 - 0,000| = 0,007$$

$$y_7 = 0,007 \cdot \sqrt{190} = 0,094 ;$$

$$D_8 = |0,025 - 0,004| = 0,021$$

$$y_8 = 0,021 \cdot \sqrt{190} = 0,294.$$

В табл. 4 приведены результаты проверки функции вероятности времени появления отказов предохранителей ППН-33 по критерию Колмогорова.

Исключим три значения функции за 11 – 13 годы наблюдения, где $P(y_n)$ имеет минимальные значения, т.е. расхождение экспериментальных и теоретических результатов расчета $>0,066$. Полученные результаты (табл. 4) показывают, что наименьшее допустимое значение функции $P(y_n) = P(0,764) = 0,604$. Другие значения $>0,845$, что является удовлетворительным условием ($>0,8$) при определении вида закона распределения исследуемых случайных величин в результате сравнения экспериментальных и теоретических функций.

Критерий Пирсона (или критерий χ^2) [18] применяется для проверки гипотезы H о том, что случайная величина подчиняется нормальному закону распределения [19]. При $\chi^2 > \chi^2_{табл}$ гипотезу H отвергают, при $\chi^2 \leq \chi^2_{табл}$ — гипотезу принимают.

При проверке по критерию Пирсона (χ^2) воспользуемся формулой [18, 19]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Q^*(t_i) - Q(t))^2}{Q(t)}, \quad (9)$$

где $Q^*(t_i)$ — экспериментальные результаты расчета; $Q(t)$ — теоретические результаты расчета.

Исключив первые шесть значений, где $Q_{np}(t) = 0$, получаем:

$$\begin{aligned} \chi^2_{np} = & \sum_{i=7}^{16} \frac{(0,014 - 0,001)^2}{0,001} + \frac{(0,025 - 0,004)^2}{0,004} + \\ & + \frac{(0,043 - 0,011)^2}{0,011} + \frac{(0,071 - 0,027)^2}{0,027} + \\ & + \frac{(0,128 - 0,062)^2}{0,062} + \frac{(0,206 - 0,124)^2}{0,124} + \\ & + \frac{(0,295 - 0,221)^2}{0,221} + \frac{(0,406 - 0,350)^2}{0,350} + \\ & + \frac{(0,544 - 0,500)^2}{0,500} + \frac{(0,676 - 0,650)^2}{0,650} = 0,628 \end{aligned}$$

Распределение χ^2_{np} определяется числом степеней свободы [19]:

$$s = n - z - 1, \quad (10)$$

где z — число параметров распределения.

Для предохранителей ППН-33: $s = 10 - 2 - 1 = 7$, где $z = 2$, так как вычислялось два параметра надежности: время безотказной работы и время по-

явления отказа. Далее по справочной таблице [19] определим $\chi^2_{табл,np} = 2,17$ (для $z = 2$, вероятности 0,95).

$$\chi^2_{np} \leq \chi^2_{табл,np} (0,628 \leq 2,17)$$

При проверке по критерию Пирсона имеем $\chi^2_{np} \leq \chi^2_{табл,np}$, следовательно, выборочные данные наблюдений достоверны, соответствуют нормальному закону распределения и согласуются с фактическими данными. Нет оснований отвергать гипотезу H о нормальности распределения.

Нормальный закон распределения можно считать верно подобранным и оптимальным для расчетов вероятности времени безотказной работы и вероятности времени появления отказов электрооборудования.

Заключение. В представленной статье показана разработанная классификация основных низковольтных коммутационных аппаратов — предохранителей, рубильников, автоматических и пакетных выключателей. Целесообразнее использовать автоматические выключатели по высокому уровню надежности и выполняемым функциям, которые, в свою очередь, могут заменить систему предохранитель, рубильник, пакетный выключатель. Автоматические выключатели также имеют широкую область применения, выпускаются отечественной промышленностью в большом ассортименте на $I = 0,6 - 2000$ А, универсальны и функциональны.

Определены закономерности изменения значений $P_{np}^*(t_i)$, $Q_{np}^*(t_i)$, $P_{np}(t)$ и $Q_{np}(t)$ для предохранителей ППН-33; $P_{руб}^*(t_i)$, $Q_{руб}^*(t_i)$, $P_{руб}(t)$, $Q_{руб}(t)$ для рубильников РЕ19-41; $P_{AB}^*(t_i)$, $Q_{AB}^*(t_i)$, $P_{AB}(t)$, $Q_{AB}(t)$ для автоматических выключателей ВА13; $P_{nb}^*(t_i)$, $Q_{nb}^*(t_i)$, $P_{nb}(t)$, $Q_{nb}(t)$ для пакетных выключателей ПВ3-16 и $P_{ка}^*(t_i)$, $Q_{ка}^*(t_i)$, $P_{ка}(t)$, $Q_{ка}(t)$ для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ.

При этом полученные данные рекомендуется использовать для корректировки регламентов проведения текущего обслуживания и капитальных ремонтов электроустановок.

Установлено, что параметры надежности исследуемого электрооборудования цеховых сетей при фактических режимах эксплуатации соответствуют паспортным срокам службы.

Проведенная проверка исследуемых случайных величин показала, что теоретические и эмпирические функции параметров надежности подчиняются нормальному закону распределения.

По критерию Колмогорова: допустимое значение функции $P(y_n) > 0,845$, что является удовлетворительным условием ($>0,8$) при определении вида закона распределения исследуемых случайных величин в результате сравнения экспериментальных и теоретических функций. По критерию Пирсона: $\chi^2_{np} \leq \chi^2_{табл,np}$ ($0,628 \leq 2,17$), следовательно, нет оснований отвергать проверяемую гипотезу о соответствии нормальному закону распределения параметров.

Библиографический список

1. Сафин А. Р., Петров Т. И., Копылов А. М. Метод проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник КГЭУ. 2020. № 2 (46). С. 45–53. EDN: EUUONN.
2. Petrov T. I., Safin A. R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. 01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801016.

3. Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Горлов А. Н. [et al.]. Исследование качества функционирования электрических аппаратов низкого напряжения в составе электротехнических комплексов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2021. № 6. С. 3–15. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15.
4. Абрамкин Р. В. Модель функционирования узла связи при отказах элементов системы электроснабжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 177–182. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-177-182.
5. Луковенко А. С., Зеньков И. В. Методы расчета надежности системы электроснабжения // Вестник ИрГТУ. 2021. № 1 (156). С. 57–65. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-57-65.
6. Афанасьев П. А., Ивахненко А. Г. Верификация методов испытаний низковольтного оборудования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 343–348. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-343-349.
7. Бык Ф. Л., Какоша Ю. В., Мышкина Л. С. Фактор надежности при проектировании распределительной сети // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. № 6. С. 43–54. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-43-54.
8. Виноградов А. В., Большев В. Е., Виноградова А. В. [и др.]. Техничко-экономические способы повышения эффективности систем электроснабжения сельских потребителей // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 47. С. 59–67. EDN: CDLHP.
9. Грачева Е. И., Наумов О. В., Садыков Р. Р. [и др.]. Моделирование параметров функциональных характеристик цеховых сетей // Технические науки — от теории к практике. 2015. № 12 (48). С. 105–114. EDN: VDWRQZ.
10. Шпиганович А. Н., Шпиганович А. А., Квашнина Г. В. Обеспечение надежности функционирования систем электроснабжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 12-3. С. 27–33. EDN: XDEJPP.
11. Fotuhi-Firuzabad M., Afshar S., Farrokhzad D. [et al.]. Reliability centered maintenance program initiation on electric distribution networks // 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, Korea (South). 2009. P. 1–4. DOI: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356922.
12. Gono R., Rusek S., Kratky M. [et al.]. Reliability analysis of electric distribution system // 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.
13. Xiaoyan S., Hangtian X. Analysis on influence factors of the reliability of electric power communication networks // 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). 2016. P. 49–52. DOI: 10.1109/ICEICT.2016.7879650.
14. Садыков Р. Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 5-6. С. 98–108.
15. Конохова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий // Библиотечка электротехника: прил. к журн. «Энергетик». Вып. 12 (36). Москва: Энергопрогресс: Энергетик, 2001. 93 с.
16. Котеленко С. В. Интеллектуальные решения низковольтного оборудования распределительных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 69–71. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-69-72.
17. Петрова Р. М., Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И. [и др.]. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 1 (57). С. 93–105.
18. Грачева Е. И., Садыков Р. Р., Хуснутдинов Р. Р. [и др.]. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2019. № 1-2. С. 13–17.
19. Иванова В. М., Калинина В. Н., Нешумова Л. А. [и др.]. Математическая статистика. Москва: Высшая школа, 1981. 371 с.

ПЕТРОВА Рената Маратовна, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань.

SPIN-код: 3243-4727

Адрес для переписки: 1998renata@mail.ru

ГРАЧЕВА Елена Ивановна, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» КГЭУ, г. Казань.

SPIN-код: 2676-5593

AuthorID (РИНЦ): 692465

ORCID: 0000-0002-5379-847X

AuthorID (SCOPUS): 57211789327

Адрес для переписки: grachieva.i@bk.ru

Для цитирования

Петрова Р. М., Грачева Е. И. Алгоритмы оценки основных параметров надежности низковольтного оборудования схем цеховых сетей // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023 г.

© Р. М. Петрова, Е. И. Грачева

ALGORITHMS FOR ESTIMATING THE MAIN RELIABILITY PARAMETERS OF LOW-VOLTAGE EQUIPMENT OF SHOP-FLOOR NETWORK SCHEMES

The article presents the classification of fuses, breakers, circuit breakers and packet switches. The laws of change of probabilistic reliability characteristics of the studied devices, as well as low-voltage cable lines are determined. Types of functions of change of basic reliability parameters are determined and corresponding graphical dependences are shown. The comparison of the obtained results of the values of probability of failure-free operation time with the requirements of GOST and passport data is carried out. The investigated probabilistic parameters of low-voltage devices and cable lines are checked for compliance with the accepted law of distribution of random variables.

Keywords: power supply system, probability of uptime, probability of failure time, fuse, breaker, circuit breaker, packet breaker, cable line.

References

1. Safin A. R., Petrov T. I., Kopylov A. M. Metod proyektirovaniya i topologicheskoy optimizatsii rotorov sinkhronnykh dvigateley s postoyannymi magnitami [Method of design and topological optimization of rotors of synchronous motors with permanent magnets] // Vestnik KGEU. *Bulletin of KSEU*. 2020. No. 2 (46). P.45–53. EDN: EUUONN. (In Russ.).
2. Petrov T. I., Safin A. R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization [Modification of the synchronous motor model for topological optimization] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. 01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801016. (In Engl.).
3. Abdullazyanov E. Yu., Gracheva E. I., Gorlov A. N. [et al.]. Issledovaniye kachestva funktsionirovaniya elektricheskikh apparatov nizkogo napryazheniya v sostave elektrotekhnicheskikh kompleksov [Research of the quality of functioning of low-voltage electric devices as a part of electrical complexes] // Izvestiya vuzov. *Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021. No. 6. P. 3–15. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15. (In Russ.).
4. Abramkin R. V. Model' funktsionirovaniya uzla svyazi pri otkazakh elementov sistemy elektrosnabzheniya [The model of the functioning of the communication node in case of failures of elements of the power supply system] // Izvestiya TulGU. *Tekhnicheskkiye nauki. Izvestiya TulGU. Technical Science*. 2021. No. 12. P. 177–182. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-177-182. (In Russ.).
5. Lukovenko A. S., Zenkov I. V. Metody rascheta nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Methods for calculating the reliability of power supply systems] // Bulletin of ISTU. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021. No. 1 (156). P. 57–65. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-57-65. (In Russ.).
6. Afanasyev P. A., Ivakhnenko A. G. Verifikatsiya metodov ispytaniy nizkovol'tnogo oborudovaniya [Verification of low-voltage equipment test methods Izvestiya Tula State University] // Izvestiya TulGU. *Tekhnicheskkiye nauki. Izvestiya TulGU. Technical Science*. 2021. No. 12. P. 343–348. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-343-349. (In Russ.).
7. Byk F. L., Kakosha Yu. V., Myshkina L. S. Faktor nadezhnosti pri proyektirovanii raspredelitel'noy seti [Reliability factor in the design of a distribution network Power engineering: research, equipment, technology] // Izvestiya vuzov. *Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2020. No. 6. P. 43–54. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-43-54. (In Russ.).
8. Vinogradov A. V., Bol'shev V. E., Vinogradova A. V. [et al.]. Tekhniko-ekonomicheskiye sposoby povysheniya effektivnosti sistem elektrosnabzheniya sel'skikh potrebiteley [Technical and economic ways to improve the efficiency of power supply systems for rural consumers] // Vestnik agrarnoy nauki Dona. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2019. No. 47. S. 59–67. EDN: CDLIHP. (In Russ.).
9. Gracheva E. I., Naumov O. V., Sadykov R. R. [et al.]. Modelirovaniye parametrov funktsional'nykh kharakteristik tsekhovykh setey [Parameters modeling of functional characteristics of shopfloor nets] // Tekhnicheskkiye nauki — ot teorii k praktike. *Technical Sciences — from Theory to Practice*. 2015. No. 12 (48). P. 105–114. EDN: VDWRQZ. (In Russ.).
10. Shpiganovich A. N., Shpiganovich A. A., Kvashnina G. V. Obespecheniye nadezhnosti funktsionirovaniya sistem elektrosnabzheniya [Operational reliability of power systems with a combined connection of the element] // Izvestiya TulGU. *Tekhnicheskkiye nauki. Izvestiya TulGU. Technical Science*. 2016. No. 12-3. P. 27–33. EDN: XDEJPP. (In Russ.).
11. Fotuhi-Firuzabad M., Afshar S., Farrokhzad D. [et al.]. Reliability centered maintenance program initiation on electric distribution networks // 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, Korea (South). 2009. P. 1–4. DOI: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356922. (In Engl.).
12. Gono R., Rusek S., Kratky M. [et al.]. Reliability analysis of electric distribution system // 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2011.5874842. (In Engl.).

13. Xiaoyan S., Hangtian X. Analysis on influence factors of the reliability of electric power communication networks // 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). 2016. P. 49–52. DOI: 10.1109/ICEICT.2016.7879650. (In Engl.).

14. Sadykov R. R. Otsenka nadezhnosti nizkovol'tnykh tsekhovykh setey promyshlennogo elektrosnabzheni [Valuation of reliability of low voltage commercial networks of industrial power supply] // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2017. No. 5-6. P. 98–108. (In Russ.).

15. Konyukhova E. A., Kireyeva E. A. Nadezhnost' elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Reliability of power supply of industrial enterprises] // Bibliotekha elektrotehnika. *Library of Electrical Engineering*. Issue 12 (36). Moscow, 2001. 93 p. (In Russ.).

16. Konyukhova E. A., Kireyeva E. A. Nadezhnost' elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Intelligent solutions for low-voltage equipment of distribution networks] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. *Izvestiya TulGU. Technical Science*. 2021. No. 12. P. 69–71. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-69-72. (In Russ.).

17. Petrova R. M., Abdullazyanov E. Yu., Gracheva E. I. [et al.]. Issledovaniye veroyatnostnykh kharakteristik nadezhnosti elektrooborudovaniya vnutritsekhovykh sistem elektrosnabzheniya [Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2023. Vol. 15, no. 1 (57). P. 93–105. (In Russ.).

18. Gracheva E. I., Sadykov R. R., Khusnutdinov R. R. [et al.]. Issledovaniye parametrov nadezhnosti nizkovol'tnykh kommutatsionnykh apparatov po ekspluatatsionnym dannym promyshlennykh predpriyatiy [Investigation of the reliability

parameters of low-voltage switching devices according to the operational data of industrial enterprises] // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2019. No. 1-2. P. 13–17. (In Russ.).

19. Ivanova V. M., Kalinina V. N., Neshumova L. A. [et al.]. Matematicheskaya statistika [Mathematical statistics]. Moscow, 1981. 371 p. (In Russ.).

PETROVA Renata Maratovna, Graduate Student of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan.

SPIN-code: 3243-4727

Correspondence address: 1998renata@mail.ru

GRACHEVA Elena Ivanovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, KSPEU, Kazan.

SPIN-code: 2676-5593

AuthorID (RSCI): 692465

ORCID: 0000-0002-5379-847X

AuthorID (SCOPUS): 57211789327

Correspondence address: grachieva.i@bk.ru

For citations

Petrova R. M., Gracheva E. I. Algorithms for estimating the main reliability parameters of low-voltage equipment of shop-floor network schemes // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.

Received July 17, 2023.

© R. M. Petrova, E. I. Gracheva

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ОДНОЭЛЕМЕНТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ

Изолятор — электротехническое устройство, предназначенное для электрической изоляции и механического крепления электроустановок или их отдельных частей, находящихся под разными электрическими потенциалами. Являясь элементом энергосистемы, выполняет важную роль в обеспечении ее надежного функционирования. В настоящее время вопрос осуществления диагностики и мониторинга изоляторов по-прежнему остается актуальным. В статье приведены статистические данные отказов на воздушных линиях и перечислены методы и устройства для обнаружения повреждения изоляции. Проблема исследования заключается в отсутствии надежного и экономически эффективного устройства для заблаговременного определения разрушения изолятора под напряжением. Решением является ранее предложенный метод диагностики одноэлементных изоляторов по температуре. Автором предложена схема диагностического устройства, описан ее принцип работы в нормальном и аварийном режимах. Диагностическое устройство, выполненное по предложенной схеме, простое, работает под напряжением и без вмешательства эксплуатационного персонала.

Ключевые слова: изолятор, температура, мониторинг, диагностика, устройство, компаратор.

Введение. Электроэнергия стала неотъемлемой частью нашей жизни. Для выработки и передачи её используют целые энергетические комплексы, которые состоят из разных элементов. Для осуществления бесперебойной передачи энергии необходимо поддерживать их надёжную работу. Своевременно выявить неисправность в элементах сети можно с помощью технической диагностики. Она позволяет определить остаточный срок службы изоляции, спрогнозировать развитие дефекта, вычислить место его возникновения.

По статистическим данным [1] отказы на воздушных линиях (ВЛ) возникают из-за износа и старения элементов ВЛ, а также воздействия окружающей среды на них. Снижение электрической прочности изоляции часто возникает вследствие экстремальных погодных условий: интенсивности грозовой деятельности, воздействия гололедно-ветровых нагрузок, повышения температуры воздуха. Летом возникновение аварийных ситуаций происходит в 2–3 раза чаще, чем зимой [2].

В период цифровизации и автоматизации энергокомплекса актуально производить обследование элементов ВЛ во время эксплуатации без перерыва передачи электроэнергии.

В связи с этим научные работы направлены на разработку различных способов и устройств диагностики и мониторинга технического состояния элементов ВЛ [3–5].

Для обнаружения развивающихся дефектов и определения остаточного ресурса изоляции используют следующие методы:

— периодические и внеочередные визуальные осмотры [6, 7], которые проводят согласно требованиям Правил и должны соответствовать Правилам организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики [8, 9]. В ходе проведения визуальных дистанционных осмотров используют ультрафиолетовые дефектоскопы: ФИЛИН-6 [10], DayCor Luminar HD, тепловизоры «Сосна», Testo 885 [11], Flir T640, ThermoCAM, а также пирометры. Однако данные приборы не дают точных данных о состоянии изоляции и требуют соблюдения определенных условий во время измерения, что усложняет процесс диагностики;

— измерение угла диэлектрических потерь $\tan\delta$ [12, 13];

— измерение распределения напряжения, которые проводят с использованием штанги или мегаомметра и не позволяют выявить скрытые дефекты изоляции;

— измерение частичных разрядов в изоляции. Недавно разработанный метод, который широко развивается и осваивается [14, 15];

— измерение тока утечки [16, 17];

— измерение ёмкости [18];

— испытания повышенным напряжением [19].

Таким образом, вопрос диагностики и мониторинга состояния изоляции по сей день остаётся актуальным.

Постановка задачи. Проблема исследования заключается в определении предпробойного состояния изолятора во время его работы. Это целесообразно сделать, измеряя температуры изо-

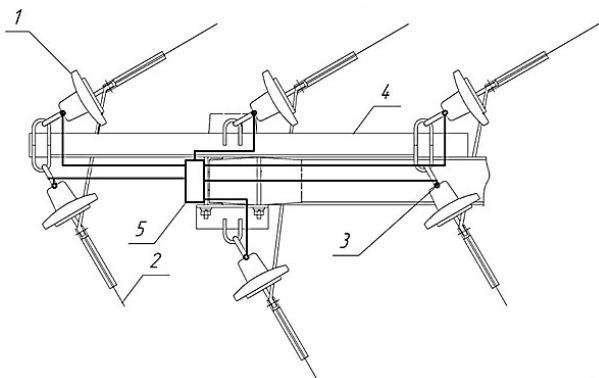


Рис. 1. Устройство для ВЛЭП, реализующее способ диагностики одноэлементных подвесных изоляторов (1 — подвесной изолятор, 2 — линейный провод ВЛЭП, 3 — датчик температуры, 4 — траверса, 5 — ДУ)

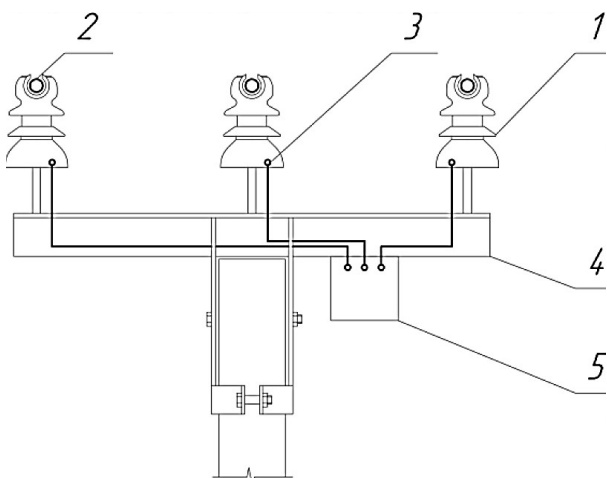


Рис. 2. Устройство для одноэлементных штыревых и опорных изоляторов (1 — штыревой изолятор, 2 — линейный провод ВЛЭП, 3 — датчик температуры, 4 — траверса, 5 — ДУ)

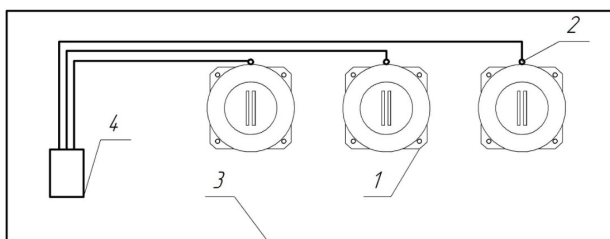


Рис. 3. Устройство для ВЛЭП, реализующее способ диагностики одноэлементных проходных изоляторов (1 — проходной изолятор, 2 — датчик температуры, 3 — стена, 4 — ДУ)

ляторов каждой фазы и сравнивая их между собой.

Для её устранения авторами ранее был предложен способ диагностики состояния одноэлементных изоляторов по температуре для класса напряжения 6–35 кВ [20]. Задачей устройства является простое и надежное определение поврежденного изолятора с учетом внешних погодных условий за счет сравнения температуры изоляторов, расположенных на одной опоре и находящихся в одинаковых условиях. Сигнал о предпробойном состоянии при достижении выше критической температуры изолято-

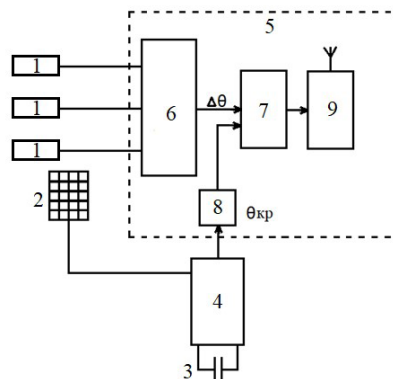


Рис. 4. Укрупнённая схема устройства диагностики (1 — датчик температуры, 2 — солнечная панель, 3 — ионистор, 4 — блок питания, 5 — ДУ, включающее в себя 6 — максиселектор, 7 — схема сравнения, 8 — эталон, 9 — передатчик)

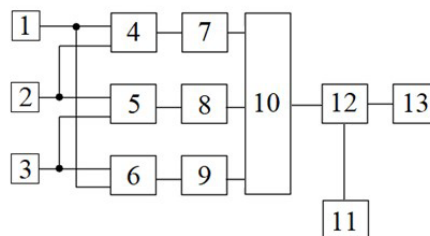


Рис. 5. Структурная схема диагностического устройства

ра передаётся только в момент его возникновения в диспетчерский пункт.

Устройство и принцип его работы. Устройство диагностики одноэлементных подвесных (рис. 1), штыревых и опорных (рис. 2), а также проходных (рис. 3) изоляторов является универсальным и состоит из датчиков температуры, которые располагаются на изоляторах со стороны траверсы (нулевого потенциала) и диагностического устройства (ДУ). Три сигнала, полученных с датчиков температуры, расположенных на изоляторах, сравниваются между собой в ДУ. Полученная наибольшая разница температур сравнивается с выставленной уставкой. При превышении её передаётся сигнал эксплуатационному персоналу, что означает наличие развития дефекта в изоляции [20]. Для изоляторов из разных материалов требуются разные уставки по температуре, которые следует уточнить в дальнейших исследованиях.

Была предложена укрупнённая схема [21] устройства диагностики (рис. 4).

Разработка схемы диагностического устройства и принцип его работы. В соответствии с [21] была разработана структурная схема диагностического устройства, представленная на рис. 5, где 1, 2, 3 — датчики температуры фаз А, В и С одноэлементных изоляторов соответственно; 4, 5, 6 — вычитатели, которые определяют попарную разницу температур между изоляторами фаз А–В; В–С; С–А; 7, 8, 9 — блоки вычисления модуля значений попарных разниц температур между изоляторами фаз А–В; В–С; С–А; 10 — максиселектор, сравнивающий значения модулей разниц температур между изо-

Таблица 1

Оценочная таблица температурных дефектов в изоляторах

Диапазон значений, °C	Оценка дефекта
$0 < \Delta T < 1$	Норма (отсутствие дефекта).
$1 \leq \Delta T \leq 5$	Наличие дефекта в самой ранней стадии развития. Требуется наблюдение и учёт при очередной диагностике для изучения времени развития дефекта.
$5 \leq \Delta T \leq 35$	Наличие дефекта в начальной стадии развития. Требуется принятие мер при очередном текущем ремонте.
$35 \leq \Delta T \leq 85$	Наличие сильно развитого дефекта. Требуется принятие мер по устранению дефекта в течение 1 месяца.
$\Delta T > 85$	Дефект в аварийной стадии развития. Требуется принятие мер немедленно в сроки, не превышающие 1 месяца.

ляторами и определяющий наибольшую; 11 — блок уставок; 12 — компаратор, сравнивающий наибольшую разницу температур между изоляторами с уставкой, 13 — исполнительный орган.

Рассмотрим на примере принцип работы диагностического устройства в нормальном режиме. Допустим, что температура изолятора фазы А равна 2 °C, тогда это же значение будет отображено на соответствующем датчике температуры 1, закреплённом на фазе А ($t_A = 2$ °C). Температура изолятора фазы В 3 °C ($t_B = 3$ °C), фазы С 0 °C ($t_C = 0$ °C). Далее в вычитателях 4, 5, 6 определяется соответственно попарная разница температур между изоляторами:

$$\Delta T_{A-B} = t_A - t_B = 2 - 3 = -1 \text{ °C},$$

$$\Delta T_{B-C} = t_B - t_C = 3 - 0 = 3 \text{ °C},$$

$$\Delta T_{C-A} = t_C - t_A = 0 - 2 = -2 \text{ °C}.$$

После полученные значения поступают в соответствующие блоки 7, 8, 9, где определяется модуль ранее вычисленных разностей фаз:

$$|\Delta T_{A-B}| = |-1| = 1 \text{ °C},$$

$$|\Delta T_{B-C}| = |3| = 3 \text{ °C},$$

$$|\Delta T_{C-A}| = |-2| = 2 \text{ °C}.$$

Затем в максиселекторе 10 определяется наибольшая разница температур, которая поступает на компаратор 12. В блоке уставок 11 сформирована величина, соответствующая критическому значению разности температур фаз изоляторов, при которых начинают происходить большие токи утечек. В данном случае, например, задано значение уставки 5 °C, что, в соответствии с табл. 1 [22], является значением, при котором у изолятора имеется дефект в самой ранней стадии развития. В компараторе 12 сравниваются сигнал, поступивший от максиселектора с уставкой 11. В данном примере, т.к. $3 \text{ °C} < 5 \text{ °C}$, то значение уставки не превышено, следовательно, блок 13 не работает и диагностическое устройство не передаст сигнал эксплуатационному персоналу.

В аварийном режиме, когда повреждается изолятор фазы С, примем следующие значения: $t_A = 30$ °C, $t_B = 31$ °C, $t_C = 50$ °C. Тогда разница температур:

$$\Delta T_{A-B} = t_A - t_B = 30 - 31 = -1 \text{ °C},$$

$$\Delta T_{B-C} = t_B - t_C = 31 - 50 = -19 \text{ °C},$$

$$\Delta T_{C-A} = t_C - t_A = 50 - 30 = 20 \text{ °C}.$$

Модули ранее вычисленных разностей фаз определенные в блоках 7, 8, 9:

$$|\Delta T_{A-B}| = |-1| = 1 \text{ °C},$$

$$|\Delta T_{B-C}| = |-19| = 19 \text{ °C},$$

$$|\Delta T_{C-A}| = |20| = 20 \text{ °C}.$$

В максиселекторе 10 определяется наибольшая разница температур, поступающая на компаратор 12, в котором сравнивается сигнал с уставкой 11. В данном случае $20 \text{ °C} > 5 \text{ °C}$, поэтому сработает диагностическое устройство и сигнал поступит эксплуатационному персоналу. Таким образом, изолятор имеет дефект в начальной стадии развития и требуется принятие мер при очередном текущем ремонте в соответствии с [22], в котором приведены данные по температурным зависимостям нормального и дефектного состояния изоляторов. Исходя из них, можно судить об изоляционных свойствах материала (табл. 1).

Расчет питания диагностического устройства на солнечном элементе. Устройство диагностики построено на операционных усилителях с микропотреблением и с током 3 мА при питании $U_{\text{п}} = 9 \dots 12$ В. Поэтому в течение суток в ждущем режиме потребляемая энергия составит:

$$A_{\text{пот}} = U_{\text{п}} \cdot I_{\text{пот}} \cdot t_{\text{сут}} = 10 \cdot 0,003 \cdot 24 = 0,72 \text{ Вт} \cdot \text{час}. \quad (1)$$

Таким образом, при соединении двух солнечных элементов с параметрами $U_{\text{п}} = 5$ В, $P_{\text{п}} = 0,4$ Вт последовательно они могут обеспечить $U_{\text{п}} = 10$ В при токе зарядки $I_{\text{пот}} = 0,4/5 = 80$ мА. Учитывая, что самый короткий солнечный день в Омской области составляет 7 часов 10 мин и то, что Солнце с эффективным КПД бывает в это время около 5 часов, рассчитаем, какую энергию можем получить от этих элементов по формуле (1):

$$A_{\text{пот}} = U_{\text{п}} \cdot I_{\text{пот}} \cdot t_{\text{сут}} = 10 \cdot 0,08 \cdot 5 = 4 \text{ Вт} \cdot \text{час},$$

что почти с 4-кратным запасом перекрывает требуемый суточный диапазон.

Выберем ионистор СИОН, необходимый для накопления и хранения энергии. Из формулы (2)

$$A_{\text{хран}} = (C_{\text{ион}} \cdot (U_{\text{п}})^2) / 2 \quad (2)$$

найдем минимально необходимую емкость ионистора, учитывая, что $1 \text{ Вт} \cdot \text{час} = 3600 \text{ Дж}$:

$$C_{\text{ион}} = (2 \cdot A_{\text{хран}}) / (U_{\text{п}})^2 = (2 \cdot 1 \cdot 3600) / 100 = 72 \text{ Ф}.$$

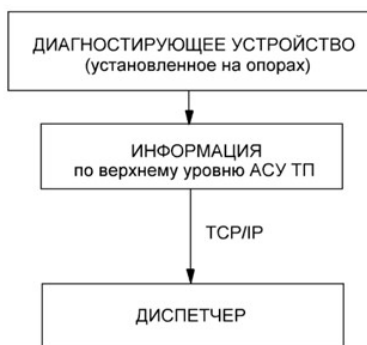


Рис. 6. Схема передачи данных эксплуатационному персоналу

Для этой цели можно использовать ионистор или аккумулятор напряжением 12 В и емкостью не менее $C_{AK} = 1,5$ А·час.

Для передачи информации эксплуатационному персоналу могут быть использованы все существующие виды и протоколы передачи данных посредством преобразования сигнала и выводом его на верхний уровень (рис. 6), согласно МЭК 870-5-104 [23]. Например, можно использовать канал сотового оператора в виде одноразового sms-сообщения, которое передается в момент срабатывания ДУ.

Заключение. С использованием представленного диагностического устройства для одноэлементных изоляторов ВЛЭП по температуре возможно постоянное контролирование их состояния для обнаружения дефектов на ранних стадиях и своевременной замены перед возникновением повреждений. Преимущество данного диагностического устройства — относительная простота и его работа под напряжением без вмешательства эксплуатационного персонала.

Таким образом, предложенная схема диагностического устройства является одним из вариантов решения для создания устройства удаленной бесконтактной системы диагностики изоляторов, которая может быть применена на воздушной линии электропередачи (Smart Grid), управление которой производится на подстанции (цифровая подстанция). Благодаря непрерывному мониторингу состояния изоляции в реальном времени, можно своевременно принимать различные меры для осуществления нормального функционирования энергосистемы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (Договор 915ГССС15-L/80877 от 15.12.2022).

Библиографический список

- Ахмадеев А. А. Анализ причин аварийных отключений воздушных линий электропередач и мероприятия по их снижению // Тинчуринские чтения: материалы XIV Междунар. молодеж. науч. конф. В 3 т. Казань: Изд-во КГЭУ, 2019. Т. 1, № 2. С. 258–263. EDN: RANOFТ.
- Белов С. И., Петров П. С. Прогнозирование аварийных отключений в электрических сетях 35–220 кВ // Агроинженерия. 2017. № 4 (80). С. 77–82. EDN: ZEGBNF.
- Иванов Д. А., Садыков М. Ф., Ярославский Д. А. [и др.]. Система контроля акустического излучения разрядных процессов на электрической подстанции для целей диагностики технического состояния изоляционного оборудования // Из-

вестия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 11. С. 1596–1599. DOI: 10.31857/S0367676521110120. EDN: QJXROU.

- Иванов Д. А., Голенищев-Кутузов А. В., Галиева Т. Г. [и др.]. Система мониторинга состояния высоковольтной изоляции // Состояние и перспективы развития электро- и тепло-технологии (XXI Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-тех. конф., посвященной 140-летию изобретения электросварки Н. Н. Бенардосом, Иваново, 02–04 июня 2021 г. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2021. Т. 1. С. 81–84. EDN: MGISFM.
- Han Z., Hu J., He J. Online Monitoring of Insulator Failure Using Micro Electric-field Sensor // 2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Shanghai, 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEMPE57831.2023.10139364.
- Сизых Ю. А. Новый стандарт ГОСТ Р 58087-2018 «Паспорт воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше» // Энергоэксперт. 2018. № 4 (68). С. 58–61. EDN: NHSEDZ.
- РД 34.20.504-94. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35–800 кВ: утв. PAO «ЕЭС России» 19.09.1994. Москва: НЦ ЭНАС, 2017. 200 с. ISBN 5-93196-369-3.
- Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации и о внесении изменений в приказ Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. № 757, от 12 июля 2018 г. № 548: приказ Министерства энергетики РФ от 04.10.2022 г. № 10170. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
- Об утверждении Правил технического обслуживания устройств и комплексов релейной защиты и автоматики и внесении изменений в требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики», утвержденные приказом Минэнерго России от 25 октября 2017 г. № 1013: приказ Министерства энергетики РФ от 13.07.2020 г. № 555. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
- Волков В. Г., Гиндин П. Д., Карпов В. В. [и др.]. Оптические приборы с рабочим ультрафиолетовым диапазоном спектра // Контенант. 2019. Т. 18, № 1–1. С. 61–74. EDN: IOVUCP.
- Мараев А. М. Диагностика изоляторов и жил токопроводов с помощью УФ-дефектоскопа и тепловизора // Энергоэксперт. 2020. № 1 (73). С. 68–71. EDN: SBRGX1.
- Dolnik B., Šárpatky L., Havranet P. [et al.]. Sensing method using multiple quantities for diagnostic of insulators in different ambient conditions // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 4. P. 1376. DOI: 10.3390/s22041376.
- Bashir N., Ahmad H., Suddin M. S. Ageing studies on transmission line glass insulators using dielectric dissipation factor test // 2010 Conference Proceedings IPEC. Singapore, 2010. P. 1062–1066. DOI: 10.1109/IPECON.2010.5696973.
- Gataullin A. M. Insulators electrical strength estimation under AC applied voltage // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). IEEE, Chelyabinsk, 2019. P. 35–39. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877654.
- Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А. [и др.]. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-32-38. EDN: IDVJOF.
- Putra N. R. M., Sartika N., Rachmawati R. The study on leakage current waveform characteristics and computer simulation of ceramic insulator under artificial tropical condition // 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). IEEE, Xi'an, 2018. P. 320–323. DOI: 10.1109/ICPADM.2018.8401273.
- Пат. 219963 Российская Федерация, МПК H 01 C 13/00. Конструкция резистивного датчика для диагностики опорных

и штыревых изоляторов воздушной линии электропередачи / Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Поляков Д. А., Никитин К. И. № 2023105800; заявл. 14.03.23; опубл. 16.08.23, Бюл. № 23.

18. Андреевков Е. С., Шунаев С. А. Разработка конструкции датчика напряжения для системы диагностики подвешенной изоляции линий электропередач 110 кВ // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 54–59. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-54-59. EDN: ZWYUOJ.

19. Методика испытания воздушных линий электропередачи до 10 кВ. URL: <https://23etl.ru/metodica-ispitanie-vozdushnih-linij/> (дата обращения: 27.08.2023).

20. Пат. 2788070 Российская Федерация, МПК G01R 31/50. Способ диагностики одноэлементных изоляторов ВЛЭП и устройство для его реализации / Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Поляков Д. А., Никитин К. И. № 2022105467; заявл. 01.03.22; опубл. 16.01.23, Бюл. № 2.

21. Терещенко Н. А., Холмов М. А., Трофименко С. В. [и др.]. Устройство диагностики одноэлементных изоляторов ВЛЭП по температуре // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Омск, 25–27 мая 2022 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 78–82. EDN: DOTOBG.

22. Поляков В. С. Технологии тепловизионной диагностики электрооборудования и опыт их использования. Санкт-Петербург: Изд-во ПЭИПК, 1997. 23 с.

23. ГОСТ Р МЭК 60870-5-104-2004. Устройства и системы телемеханики. Часть 5. Протоколы передачи. Раздел 104. Доступ к сети для ГОСТ Р МЭК 870-5-101 с использованием стандартных транспортных профилей. Введ. 2005–07–01. Москва: Стандартинформ, 2004. 46 с.

ТЕРЕЩЕНКО Надежда Андреевна, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4017-2286

AuthorID (РИНЦ): 947723

AuthorID (SCOPUS): 57216615006

Адрес для переписки: nadezhda.tereshchenko@mail.ru

Для цитирования

Терещенко Н. А. Диагностическое устройство одноэлементных изоляторов воздушной линии электропередачи по температуре // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 103–109. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-103-109.

Статья поступила в редакцию 28.08.2023 г.

© Н. А. Терещенко

DIAGNOSTIC DEVICE OF SINGLE-ELEMENT INSULATORS OF OVERHEAD TRANSMISSION LINE BY TEMPERATURE

Insulator, electrical device designed for electrical isolation and mechanical fastening of electrical installations or their separate parts, which are under different electrical potentials. As an element of the power system, it plays an important role in ensuring its reliable operation. At present the issue of diagnostics and monitoring of insulators is still topical. The article provides statistical data of failures on overhead lines and lists methods and devices for detecting insulation damage. The research problem is the lack of a reliable and cost-effective device for early detection of insulator failure under voltage. The solution is the previously proposed method of diagnosing single-element insulators by temperature. The author proposed a scheme of the diagnostic device, described its principle of operation in normal and emergency modes. The diagnostic device made according to the proposed scheme is simple, works under voltage and without the intervention of operating personnel.

Keywords: insulator, temperature, monitoring, diagnostics, device, comparator.

Acknowledgments

The work is carried out with the support of the Innovation Promotion Fund (Agreement 915ГССС15-L/80877 dated December 15, 2022).

References

1. Akhmedeyev A. A. Analiz prichin avariynykh otklyucheniyy vozduzhnykh liniy elektroperedach i meropriyatiya po ikh snizheniyu [Analysis of the causes of emergency shutdowns of overhead power lines and measures to reduce them] // *Tinchurinskiye Chteniya. Tinchurin Readings*. In 3 vols. Kazan, 2019. Vol. 1, no. 2. P. 258–263. EDN: RAHOFT. (In Russ.).
2. Belov S. I., Petrov P. S. Prognozirovaniye avariynykh otklyucheniyy v elektricheskikh setyakh 35–220 kV [Forecasting emergency disconnections in power networks of 35–220 kv] // *Agroinzheneriya. Agroengineering*. 2017. No. 4 (80). P. 77–82. (In Russ.).
3. Ivanov D. A., Sadykov M. F., Yaroslavskiy D. A. [et al.]. Sistema kontrolya akusticheskogo izlucheniya razryadnykh protsessov na elektricheskoy podstantsii dlya tseyey diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya izolyatsionnogo oborudovaniya [System for monitoring the acoustic radiation of discharge processes at an electric substation to diagnose the technical state of insulators] // *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2021. Vol. 85, no. 11. P. 1596–1599. DOI: 10.31857/S0367676521110120. EDN: QJXROU. (In Russ.).
4. Ivanov D. A., Golenishchev-Kutuzov A. V., Galiyeva T. G. [et al.]. Sistema monitoringa sostoyaniya vysokovol'tnoy izolyatsii [Monitoring system of the high voltage insulation condition] // *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (XXI Benardosovskiy chteniya). State and Prospects for the Development of Electrical and Thermal Technology (XXI Benardos Readings)*. Ivanovo, 2021. Vol. 1. P. 81–84. EDN: MGISFM. (In Russ.).
5. Han Z., Hu J., He J. Online Monitoring of Insulator Failure Using Micro Electric-field Sensor // 2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Shanghai, 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEMPE57831.2023.10139364. (In Engl.).
6. Sizykh Yu. A. Novyy standart GOST R 58087-2018 «Pasport vozduzhnykh liniy elektroperedachi napryazheniyem 35 kV i vyshe» [New standard GOST R 58087-2018 «Passport of overhead power lines with voltage of 35 kV and above»] // *Energoekspert. Energyexpert*. 2018. No. 4 (68). P. 58–61. (In Russ.).
7. Tipovaya instruktsiya po ekspluatatsii vozduzhnykh liniy elektroperedachi napryazheniyem 35–800 kV. Moscow, 2017. 200 p. ISBN 5-93196-369-3. (In Russ.).
8. Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stantsiy i setey Rossiyskoy Federatsii i o vnesenii izmeneniy v prikazy Min•energo Rossii ot 13 Sentyabrya 2018 g. No. 757: prikaz Ministerstva energetiki RF ot 04.10.2022 g. No. 10170 [On approval of the Rules for the technical operation of power plants and networks of the Russian Federation and on amendments to the orders of the Ministry of Energy of Russia dated September 13, 2018 No. 757: Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated October 4, 2022. No. 10170]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).
9. Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv i kompleksov releynoy zashchity i avtomatiki i vnesenii izmeneniy v trebovaniya k obespecheniyu nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem, nadezhnosti i bezopasnosti ob'yektov elektroenergetiki i energoprinyimayushchikh ustanovok «Pravila organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta ob'yektov elektroenergetiki», utverzhdennyye prikazom Min•energo Rossii ot 25 Oktyabrya 2017 g. No. 1013: prikaz Ministerstva energetiki RF ot 13.07.2020 g. No. 555 [On approval of the Rules for the maintenance of devices and complexes of relay protection and automation and amendments to the requirements for ensuring the reliability of electric power systems, the reliability and safety of electric power facilities and power receiving installations «Rules for organizing the maintenance and repair

of electric power facilities», approved by order of the Ministry of Energy of Russia dated October 25, 2017 No. 1013; Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 13, 2020 No. 555]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).

10. Volkov V. G., Gindin P. D., Karpov V. V. [et al.]. Opticheskiye pribory s rabochim ul'trafioletovym diapazonom spektra [Optical devices with ultraviolet region of the spectrum] // Kontenant. *Contenant*. 2019. Vol. 18, no. 1–1. P. 61–74. (In Russ.).

11. Marayev A. M. Diagnostika izolyatorov i zhil tokoprovodov s pomoshch'yu UF-defektoskopa i teplovizora [Diagnostics of insulators and conductors of current conductors using a UV flaw detector and a thermal imager] // Energoekspert. *Energexpert*. 2020. No. 1 (73). P. 68–71. EDN: SBRGX1. (In Russ.).

12. Dolnik B., Šárpatky L., Havranet P. [et al.]. Sensing method using multiple quantities for diagnostic of insulators in different ambient conditions // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 4. P. 1376. DOI: 10.3390/s22041376. (In Engl.).

13. Bashir N., Ahmad H., Suddin M. S. Ageing studies on transmission line glass insulators using dielectric dissipation factor test // 2010 Conference Proceedings IPEC. Singapore, 2010. P. 1062–1066. DOI: 10.1109/IPEC.2010.5696973. (In Engl.).

14. Gataullin A. M. Insulators electrical strength estimation under AC applied voltage // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). IEEE, Chelyabinsk, 2019. P. 35–39. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877654. (In Engl.).

15. Polyakov D. A., Nikitin K. I., Tereshchenko N. A., Novoselov A. S., Bilevich Ya. P. Issledovaniye chastichnykh razryadov v opornykh izolyatorakh [Analysis of partial discharges in supporting insulators] // Omskiy Nauchnyy Vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2020. No. 1 (169). P. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-32-38. EDN: IDVJOF. (In Russ.).

16. Putra N. R. M., Sartika N., Rachmawati R. The study on leakage current waveform characteristics and computer simulation of ceramic insulator under artificial tropical condition // 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). IEEE, Xi'an, 2018. P. 320–323. DOI: 10.1109/ICPADM.2018.8401273. (In Engl.).

17. Patent No. 219963 Russian Federation, IPC H 01 C 13/00. Konstruktsiya rezistivnogo datchika dlya diagnostiki opornykh i shtyrevykh izolyatorov vozduшной linii elektropredachi [Design of a resistive sensor for diagnosing support and pin insulators of overhead power lines] / Tereshchenko N. A., Miroshnik V. Yu., Polyakov D. A., Nikitin K. I. No. 2023105800. (In Russ.).

18. Andreykov E. S., Shunayev S. A. Razrabotka konstruktsii datchika napryazheniya dlya sistemy diagnostiki podvesnoy izolyatsii liniy elektropredach 110 kV [Designing a voltage sensor for the diagnostic system of 110 kV overhead power line

suspension insulation] // Vestnik MEI. *Vestnik MEI*. 2017. No. 6. P. 54–59. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-54-59. (In Russ.).

19. Metodika ispytaniye vozdushnykh liniy elektropredachi do 10 kV [Methodology for testing overhead power lines up to 10 kV]. URL: <https://23etl.ru/metodica-ispytanie-vozdushnih-linij/> (accessed: 27.08.2023). (In Russ.).

20. Patent No. 2788070 Russian Federation, IPC G 01 R 31/50. Sposob diagnostiki odnoelementnykh izolyatorov VLEP i ustroystvo dlya ego realizatsii [A method for diagnosing single-element insulators of overhead power lines and a device for its implementation] / Tereshchenko N. A., Miroshnik V. Yu., Polyakov D. A., Nikitin K. I. No. 2022105467. (In Russ.).

21. Tereshchenko N. A., Kholmov M. A., Trofimenko S. V. [et al.]. Ustroystvo diagnostiki odnoelementnykh izolyatorov VLEP po temperature [Device for diagnostics of single-element insulators of overhead power lines by temperature] // Aktual'nyye Voprosy Energetiki. *Current Energy Issues*. Omsk, 2022. P. 78–82. EDN: DOTOBG. (In Russ.).

22. Polyakov V. S. Tekhnologii teplovizionnoy diagnostiki elektrooborudovaniya i opyt ikh ispol'zovaniya [Technologies for thermal imaging diagnostics of electrical equipment and experience in their use]. Saint Petersburg, 1997. 23 p. (In Russ.).

23. GOST R MEK 60870-5-104-2004. Ustroystva i sistemy telemekhaniki. Chast' 5. Protokoly predachi. Razdel 104. Dostup k seti dlya GOST R MEK 870-5-101 s ispol'zovaniyem standartnykh transportnykh profiley [Telemechanics devices and systems. Part 5. Transmission protocols. Section 104. Network access for GOST R IEC 870-5-101 using standard transport profiles]. Moscow, 2004. 46 p. (In Russ.).

TERESHCHENKO Nadezhda Andreyevna, Graduate Student of Theoretical and General Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4017-2286

AuthorID (RSCI): 947723

AuthorID (SCOPUS): 57216615006

Correspondence address: nadezhda.tereshchenko@mail.ru

For citations

Tereshchenko N. A. Diagnostic device of single-element insulators of overhead transmission line by temperature // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 103–109. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-103-109.

Received August 28, 2023.

© N. A. Tereshchenko



ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.328
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-110-118
EDN: PGYOVY

С. В. БИРЮКОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ И РАССТОЯНИЯ ДО ИСТОЧНИКА ПОЛЯ

Рассмотрена новая концепция построения измерителя напряженности электрического поля. Концепция заключается в том, что наряду с измерением модуля вектора напряженности электрического поля одновременно инструментальному определению подлежит погрешность результата измерения и расстояние до источника поля. В основу измерителя поля положен новый сдвоенный датчик и метод измерения напряженности электрического поля. Возможности метода измерения определять погрешность и расстояние до источника поля обеспечивает сдвоенный электроиндукционный сферический датчик. Особенностью сдвоенного датчика является способность одновременно выдавать два измеренных в одной точке поля значения напряженности, полученных с разными по знаку погрешностями. Эта особенность позволила получать результат измерения как среднее значение и двух измеренных и тем самым уменьшить погрешность его измерения. Наличие двух одновременно измеренных значений напряженности поля также позволило получить эмпирическую формулу для определения относительного расстояния до источника в каждой точке измерений. Полученные значения относительных расстояний сделали возможным по известным формулам определить погрешность результата измерения и расстояние от центра датчика до источника поля. Возможность измерителя поля одновременно инструментально определять погрешность результата измерения и расстояние до источника поля рассматривается впервые.

Ключевые слова: измеритель, прибор, метод измерения, напряженность электрического поля, датчик, сдвоенный датчик, погрешность измерения, расстояние до источника поля.

Введение. Измерители напряженности электрического поля (ЭП) промышленной частоты позволяют обеспечить контроль над интенсивностью ЭП техногенной природы. Техногенные поля создаются вокруг мощных энергетических систем промышленной частоты напряжением 500, 750 и 1150 кВ и выше. К таким энергетическим системам можно отнести электрические подстанции (ПС), линии электропередач (ЛЭП) и др. Электрические поля указанных источников оказывают негативное воздействие как на технические объекты, так и на растительный и животный мир [1, 2]. В связи с этим были разработаны санитарные нормы и правила [3], регламентирующие время нахождения в зонах электрических полей ЛЭП и ПС высокого и сверхвысокого напряжения. Для проведения контроля и измерения напряженности ЭП в России используется большой перечень приборов [4–12]. Однако они имеют большую погрешность ~20 %, и ни один из них не позволяет инструментально определять как погрешность результата измерения, так и расстояние от датчика до источника поля. Последнее важно для исключения контакта с источником поля. Поэтому целью данной работы будет рассмотрение концепции создания измерителя напряженности ЭП с определением погрешности результата измерений и расстояния от датчика до источника поля.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели сформулируем следующие задачи:

- 1) выбрать метод измерения напряженности ЭП, позволяющий определять погрешность результата измерений и расстояние до источника поля;
- 2) разработать структурную схему измерителя напряженности ЭП, реализующего выбранный метод измерений;
- 3) выбрать датчик напряженности ЭП, пригодный для реализации метода измерений в измерителе напряженности ЭП;
- 4) проверить численным экспериментом работоспособность измерителя напряженности, используя выбранный метод измерения.

Выбор и теоретическое обоснование метода измерений. Существует большое многообразие методов измерений напряженности ЭП [13–23]. В основном они направлены на повышение чувствительности и точности измерений, упрощения процесса измерений и многое другое. Среди них можно выделить три новых метода: метод измерения по среднему значению [20, 21], метод измерения датчиком сдвоенного типа [22] и метод измерения с использованием датчика сдвоенного типа [23]. Все новые методы используют электроиндукционный сферический датчик сдвоенного типа. Такой датчик позволяет получать в одной точке поля

с напряженностью E_0 два измеренных значения напряженностей E_1 и E_2 , отличающихся от напряженности E_0 на значение погрешностей δ_1 и δ_2 . При этом неотъемлемым условием измерения является противоположность по знаку погрешностей δ_1 и δ_2 . Эти методы определяют среднее между измеренными значениями E_1 и E_2 и тем самым уменьшают погрешность измерения исходного ЭП E_0 . Однако метод измерения по среднему значению [20, 21] реализует не все возможности сдвоенного датчика, позволяющего в одной точке поля получать два значения напряженностей E_1 и E_2 . Развитием метода измерений по среднему значению являются два других метода [22, 23]. Метод измерения датчиком сдвоенного типа [22] наряду с определением среднего значения позволяет определять также погрешность среднего значения, принимаемого за результат измерения, но не позволяет определять расстояние от датчика до источника поля. Описанный в работе [23] метод измерения с использованием датчика сдвоенного типа позволяет определять среднее значение результата измерений, его погрешность, а также расстояние от датчика до источника поля. В связи с этим для построения измерителя напряженности ЭП воспользуемся методом измерений, приведенным в работе [23].

В основе метода измерений лежит сдвоенный датчик напряженности ЭП [24]. Поскольку сдвоенный датчик совмещает два двойных датчика в одном, то он вырабатывает два выходных сигнала, пропорциональных значениям напряженностям E_1 и E_2 , измеренных в одной точке поля с противоположными по знаку погрешностями δ_1 и δ_2 . С учетом этих погрешностей можно записать

$$E_1 = E_0(1 + \delta_1) \text{ и } E_2 = E_0(1 + \delta_2). \quad (1)$$

Тогда среднее значение из них, принимаемое за результат измерения, определится как

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2} = E_0 \left(1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right) = E_0(1 + \delta), \quad (2)$$

где

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad (3)$$

погрешность результата измерения E .

Для первого и второго датчиков, входящих в состав сдвоенного датчика, значения погрешностей δ_1 и δ_2 в зависимости от пространственного диапазона измерений a и углового размера θ_0 чувствительных элементов датчиков определяются по формуле, приведенной в работе [2],

$$\delta(a, \theta_0) = \left[\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_0} \left(2 - \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 - 2a \cos \theta_0 + a^2}} - \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 + 2a \cos \theta_0 + a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100, \quad (4)$$

где $a = R/d$ — пространственный диапазон измерений (относительное расстояние до источника поля); R — радиус сферического корпуса датчика; d — расстояние от центра сферического корпуса датчика до источника поля. Для первого и второго датчиков угловые размеры чувствительных элемен-

тов соответственно равны $\theta_0 = 45^\circ$ и $\theta_0 = 90^\circ$ [25, 26].

С учетом угловых размеров чувствительных элементов первого и второго датчиков упростим выражение (4) и запишем для каждого из них выражения погрешностей $\delta_1(a)$ и $\delta_2(a)$

$$\delta_1(a) = \left[\frac{4}{3a^2} \left(1 - \frac{(1 - a^2)(\sqrt{1 + \sqrt{2}a + a^2} + \sqrt{1 - \sqrt{2}a + a^2})}{2\sqrt{1 + a^4}} \right) - 1 \right] \cdot 100, \quad (5)$$

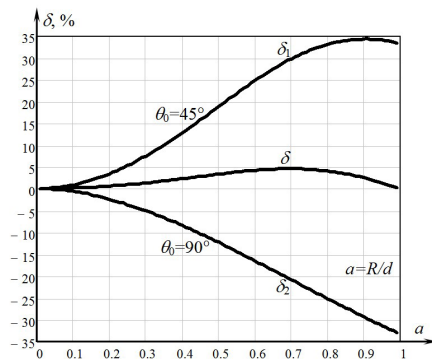


Рис. 1. Графики погрешностей $\delta_1(a)$ и $\delta_2(a)$ первого и второго датчиков и результирующей погрешности сдвоенного датчика $\delta(a)$

$$\delta_2(a) = \left[\frac{2}{3a^2} \left(1 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100. \quad (6)$$

Построим по выражениям (5), (6) и (3) графики погрешностей $\delta_1(a)$ и $\delta_2(a)$ для первого и второго датчиков и график результирующей погрешности $\delta(a)$ и представим их на рис. 1.

Из графиков рис. 1 следует, что погрешность $\delta_1(a)$ первого датчика положительная. Её максимальное значение $\delta_{1\max}(0,9) = 34,37\%$ во всем пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$. Погрешность $\delta_2(a)$ второго датчика отрицательная и во всем пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 1$ её максимальное значение $\delta_{2\max}(0,99) = -32,94\%$. Противоположность по знаку погрешностей $\delta_1(a)$ и $\delta_2(a)$ требуется для реализации метода измерений и позволяет получить среднее значение напряженности E с погрешностью $\delta(a)$ меньше наименьшей погрешности одного из измеренных значений напряженностей E_1 и E_2 . При этом во всем пространственном диапазоне максимальное значение $\delta_{\max}(0,7) = 4,57\%$.

Через погрешности $\delta_1(a)$ и $\delta_2(a)$ по выражениям (1) вычисляются значения напряженностей $E_1(a)$ и $E_2(a)$ в каждой точке измерения. Эти значения можно использовать не только для определения среднего значения, но и для определения расстояния до источника поля и погрешности результата измерений. Покажем это. Введем в рассмотрение коэффициент $k_0(a)$ и рассчитаем его для каждой точки шага измерений по формуле

$$k_0(a) = \frac{E_1(a)}{E_2(a)}. \quad (7)$$

Для расчетов значения a будем выбирать из пространственного диапазона $0 \leq a \leq 1$. Начальное зна-

чение и шаг выборки возьмем равным 0,05. Результаты расчетов запишем в табл. 1.

По данным табл. 1 установлена эмпирическая формула функциональной зависимости a^* от k_0

$$a^* = R/d = 1,123 \sqrt{k_0 - 0,94} - 0,21, \quad (8)$$

где a^* — параметр a , определенный по эмпирической формуле (8).

По значениям коэффициентов k_0 (см. табл. 1) и эмпирическому выражению (8) можно определить для каждой точки измерения относительное расстояние a^* до источника поля. Это позволит через относительное расстояние a^* определить:

1) расстояние d от центра датчика до источника поля

$$d = R/a^*; \quad (9)$$

2) по выражениям (5) и (6) погрешности $\delta_1(a)$ и $\delta_2(a)$ двух измеренных значений E_1 и E_2 в каждой точке измерений.

Таким образом, рассмотренный метод измерений может быть использован для построения измерителя напряженности ЭП с возможностью определения:

1) результата измерения E по выражению (2) как среднее значение из E_1 и E_2 ;

2) погрешности результата измерения δ по выражению (3) с использованием выражений (5) и (6);

3) расстояния от центра датчика до источника поля по выражению (9) с использованием выражения (8).

Структурная схема измерителя напряженности ЭП. Выбранный метод измерения положен в основу разработки измерителя напряженности ЭП, структурная схема которого представлена на рис. 2.

Структурная схема измерителя состоит из сдвоенного датчика 1, измерительного устройства 2, вычислительного устройства 3 и устройства отображения информации 4.

Измерительное устройство 2 измеряет и преобразует выходные сигналы со сдвоенного датчика 1 (сдвоенный датчик будет рассмотрен ниже) в измерительные сигналы, пропорциональные напряженностям E_1 и E_2 , одновременно измеренных в одной точке поля.

Далее эти измерительные сигналы поступают на вычислительное устройство 3, в котором они последовательно обрабатываются в модуле 5 по выражениям (2) и (7), в модуле 6 по выражениям (8) и (9) и в модуле 7 по выражениям (3), (5) и (6). Результаты вычисленных значений напряженности поля E , погрешности измерения δ и расстояния до источника поля d выводятся на устройство отображения информации.

Таким образом, выбранный метод измерения реализован в измерителе напряженности ЭП с воз-

Таблица 1

Значения коэффициента k_0 в зависимости от пространственного диапазона измерения a

a	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
k_0	1,004	1,015	1,033	1,058	1,091	1,131	1,178	1,231	1,29	1,355
a	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	
k_0	1,423	1,495	1,568	1,64	1,711	1,779	1,843	1,901	1,954	

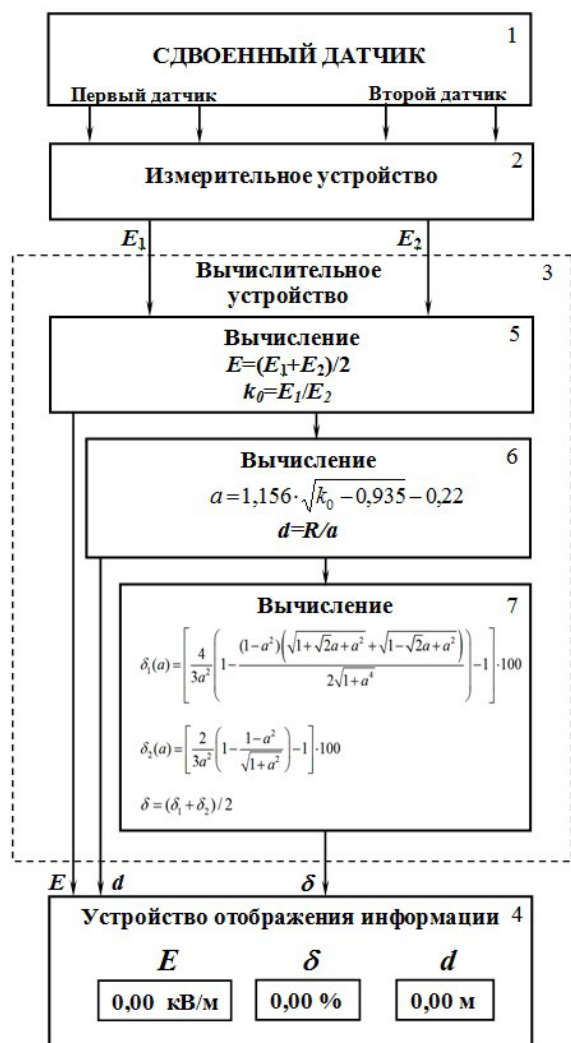


Рис. 2. Структурная схема измерителя напряженности ЭП

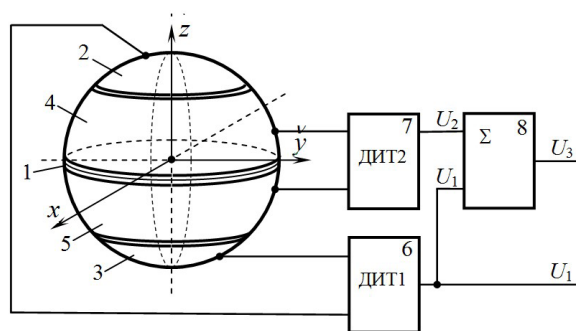


Рис. 3. Схема сдвоенного датчика напряженности ЭП

можно определить погрешности измерения и расстояния до источника поля.

Сдвоенный датчик напряженности электрического поля. В структурной схеме измерителя напряженности ЭП предусматривается сдвоенный датчик. Его конструктивной особенностью является совмещение двух двойных датчиков в одном. Такой датчик позволяет одновременно измерять два значения напряженностей E_1 и E_2 в данной точке поля, получаемых с противоположными по знаку погрешностями. Техническое решение такого датчика приведено в работе [23] и представлено на рис. 3.

Сдвоенный датчик включает в себя механическую конструкцию и измерительное устройство 2, представленное на рис. 2.

В основе механической конструкции датчика лежат проводящий сферический корпус 1, два чувствительных элемента 2 и 3 в форме сферических сегментов и два чувствительных элемента 4 и 5 в форме сферических слоёв.

Измерительное устройство 2 (см. рис. 3) включает два дифференциальных интегратора тока (ДИТ1) 6, (ДИТ2) 7 и сумматор 8. Сферические сегменты 2 и 3 выполнены с угловыми размерами $\theta_0 = 45^\circ$ и входят в состав механической конструкции первого датчика. Сферические слои 4 и 5 являются частями чувствительных элементов (2+4) и (3+5), в сумме образующие полусферы с угловым размером $\theta_0 = 90^\circ$, входящими в состав механической конструкции второго датчика. Проводящие чувствительные элементы 2–5 датчика изолированы между собой и сферическим корпусом 1. Под действием ЭП на проводящих чувствительных элементах 2–5 датчика индуцируются электрические заряды, пропорциональные напряженности ЭП E_0 . Для снятия электрических зарядов с чувствительных элементов датчика используются дифференциальные интеграторы тока 6 и 7. С их помощью снимаются разность зарядов с диаметрально противоположных чувствительных элементов датчика и преобразуются в напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$, пропорциональные напряженности ЭП E_0 . Напряжение $U_1(t) = kE_1$ является выходным напряжением первого датчика. Выходное напряжение $U_3(t) = kE_2$ второго датчика получается суммированием напряжений $U_1(t)$ и $U_2(t)$ сумматором 8, объединяющим электрические заряды с чувствительных элементов датчика (2+4) и (3+5).

Таким образом, измеряя напряжения $U_1(t)$ и $U_3(t)$, можно одновременно измерить напряженности поля E_1 и E_2 , необходимые для реализации метода измерений в измерителе напряженности ЭП.

Проверка работы измерителя напряженности ЭП. Проведем численный эксперимент. Для этого по формулам (5) и (6) рассчитаем погрешности измерений $\delta_1(a)$ и $\delta_2(a)$. Для расчетов значения a будем выбирать из пространственного диапазона $0 \leq a \leq 1$. Начальное значение возьмем $a = 0,1$, а шаг выборки выбираем равным 0,2. Результаты расчета запишем в табл. 2. В неё же запишем погрешность $\delta(a)$ результата измерений, рассчитанную по выражению (3).

Воспользовавшись выражением (1), представим напряженности E_1 , E_2 и E для каждой точки пространственного диапазона измерений в виде относительных величин $E_1^* = E_1/E_0$, $E_2^* = E_2/E_0$ и $E^* = E/E_0$. Результаты представлений запишем в табл. 3.

Рассчитаем по выражению (7) коэффициент k_0 для каждой точки пространственного диапазона измерений и запишем его в табл. 4.

Подставляя в эмпирическую формулу (8) коэффициенты k_0 определим приближенные значения параметра a и обозначим их как a^* . Результаты расчетов запишем в табл. 5.

По значениям параметра a^* (см. табл. 5) и выражениям (5) и (6) рассчитаем погрешности δ_1^* и δ_2^* значений напряженностей E_1^* и E_2^* первым и вторым датчиками, а также по выражению (3) погрешность δ^* результата измерений E^* . Результаты расчетов запишем в табл. 6.

Сравнение численных значений погрешностей, рассчитанных по теоретическим и эмпирическим

Таблица 2

Теоретические значения погрешностей $\delta_1(a)$, $\delta_2(a)$ и $\delta(a)$

a	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
$\delta_1, \%$	0,87	7,56	18,93	29,92	34,37	33,52
$-\delta_2, \%$	0,58	4,91	12,22	20,79	29,32	32,94
$\delta, \%$	0,16	1,33	3,34	4,57	2,53	0,29

Таблица 3

Значения напряженностей

a	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
E_1	1,008	1,076	1,190	1,3	1,344	1,336
E_2	0,994	0,95	0,878	0,792	0,706	0,67
E	1	1,014	1,034	1,046	1,026	1,004

Таблица 4

Расчетные значения коэффициентов

a	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
k_0	1,014	1,133	1,355	1,64	1,904	1,994

Таблица 5

Значения параметра a , рассчитанные по эмпирической формуле (8)

a	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
a^*	0,095	0,283	0,513	0,73	0,893	0,943
$\gamma, \%$	-0,5	-5,7	2,6	4,3	-0,8	4,8

Таблица 6

Эмпирические значения погрешностей δ_1^* , δ_2^* и δ^* , рассчитанные через a^*

a	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
a^*	0,095	0,283	0,513	0,73	0,893	0,943
$\delta_1^*, \%$	0,787	6,758	18,931	29,923	34,367	33,527
$-\delta_2^*, \%$	0,523	4,397	12,219	20,79	29,319	32,942
$\delta^*, \%$	0,132	1,181	3,356	4,566	2,524	0,293

значениям параметров a и a^* и приведенных в табл. 2 и табл. 6, показывает хорошее их согласование.

Таким образом, выбранный метод измерения может быть положен в основу построения измерителя напряженности ЭП, позволяющего измерять не только напряженности ЭП E с малой погрешностью δ , но и инструментально определять как погрешности измерения E , так и расстояния до источника поля d , как $d = R/a^*$.

Обсуждение результатов. В большинстве своем выпускаемые отечественной промышленностью приборы для измерения напряженности ЭП [4–12]

направлены на измерение вектора напряженности поля и его составляющих. В них в основном используются методы направленного [4–7] и не направленного приёма [7–12], заключающиеся либо в помещении датчика прибора в точку измерений и его ориентации по направлению поля, либо просто в помещении датчика прибора в точку измерений.

Представленный в работе метод измерений расширяет возможности измерителей ЭП и позволяет создавать приборы, измеряющие не только основной параметр — напряженность поля, но

и определяющие погрешность измерения основного параметра и расстояние до источника поля. Эти возможности метода сильно отличают его от известных методов измерений. Созданию нового метода измерений предшествовало появление в номенклатуре датчиков — датчиков нового типа, а именно сдвоенных датчиков. Сдвоенные датчики расширяют возможности одинарных и двойных датчиков. Они позволяют одновременно измерять в одной точке поля два значения напряженностей с противоположными по знаку погрешностями. Эта способность сдвоенного датчика позволила создать новый метод измерений и на его основе построить измеритель напряженности ЭП, позволяющий не только измерять модуль вектора напряженности с повышенной точностью, но и инструментально определять его погрешность в данной точке измерений и расстояние до источника поля.

Выводы и заключение. В работе рассмотрена концепция создания измерителя напряженности электрического поля с определением погрешности результата измерений и расстояния до источника поля. Для реализации этой концепции:

1) выбран метод измерения напряженности ЭП, обеспечивающий инструментальное определение погрешности результата измерений и расстояния до источника поля;

2) разработана структурная схема измерителя напряженности ЭП, реализующая выбранный метод измерений;

3) выбран сдвоенный датчик напряженности ЭП, позволяющий реализовать метод измерений в измерителе напряженности;

4) проведен численный эксперимент, подтвердивший работоспособность измерителя напряженности ЭП.

В заключение отметим, что дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование сдвоенных датчиков напряженности ЭП с целью снижения погрешности измерения измерителем поля.

Библиографический список

1. Коробкова В. П., Морозов Ю. А., Столяров М. Д. [и др.]. Воздействие электрического поля распределительных устройств 500 и 750 кВ на обслуживающий персонал и средства для его защиты // Подстанции переменного тока: междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Москва: Энергоатомиздат, 1974. С. 33–43.
2. Шкарина Ю. П. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: пер. док. междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-86). Москва: Энергоатомиздат, 1988. 104 с. ISBN 5-283-02447-4.
3. СанПиН 2.2.4.1191-03. «Электромагнитные поля в производственных условиях». URL: <https://musomiy.ru/wp-content/uploads/2019/01/sanpin-2.2.4.1191-03.pdf> (дата обращения: 20.06.2023).
4. Измеритель ближнего электромагнитного поля ЭЛОН. URL: https://ppxr.ru/rub/html/pribori/pkosiot/5_09/ (дата обращения: 15.06.2023).
5. Измеритель напряженности электрического и магнитного полей промышленной частоты ПЗ-50. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17638-19-p3-50/> (дата обращения: 15.06.2023).
6. Прибор для измерения электрического поля ИНЭП-50. URL: http://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass_INAP.DOC (дата обращения: 10.04.2023).
7. Измеритель напряженности ЭП промышленной частоты ГРАДАН. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel_napryazhennosti_elektricheskogo_polya_promishlennoy_chastoti_gradan_ot_kompanii_elektroenergetika.html (дата обращения: 04.06.2023).
8. Изотропный измеритель электромагнитного поля ПЗ-60. URL: <https://ciklon-pribor.ru/pdf/p3-60%20pasp.pdf#28> (дата обращения: 07.07.2023).
9. Изотропный анализатор поля EFA-3. URL: https://elektrotanya.com/files/e_efa3.pdf (дата обращения: 08.07.2023).
10. Портативный анализатор электромагнитного поля EFA-300. URL: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291_efa-300_at_ru.pdf (дата обращения: 08.06.2023).
11. Измеритель электрического поля промышленной частоты BE-50. URL: <https://ntm.ru/products/44/7261> (дата обращения: 08.06.2023).
12. Измеритель параметров электрического и магнитного полей BE-метр. URL: https://priborysgk.ru/upload/shop_3/2/0/9/item_209/shop_property_file_209_189.pdf (дата обращения: 10.07.2023).
13. Юркевич В. М., Кондратьев Б. Л. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // Измерительная техника. 1980. № 5. С. 57–59.
14. Чугунов С. А., Юркевич В. М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // Измерительная техника. 1981. № 1. С. 33–35.
15. Кондратьев Б. Л., Юркевич В. М. Измерения в электрическом поле с выравниванием потенциалов // Труды Московского энергетического института. 1979. Т. 432. С. 20–22.
16. Колдекотт Р., Деворе Р. В., Себо С. А. Измерение электрических полей на подстанциях сверхвысокого напряжения // Электрические станции, сети и системы. Экспресс-информация. 1977. № 19. С. 10–26.
17. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 Hz // Rev. gen. elec. 1988. No. 7. P. 27–38.
18. Бирюков С. В. Метод измерения напряженности электрического поля путем выравнивания составляющих // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (Датчик-2002): сб. материалов XIV науч.-техн. конф. с участием зарубеж. специалистов. Москва: Изд-во МИЭМ, 2002. С. 25–26.
19. Бирюков С. В. Методы измерения напряженности неоднородных электрических полей вблизи источников поля трехкоординатными датчиками // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2003. № 4. С. 22–25. EDN: HTUFYJ.
20. Пат. 2773868 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/08, G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля сдвоенным датчиком / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. № 2021120230; заявл. 09.07.2021; опубл. 14.06.2022, Бюл. № 17.
21. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Метод измерения напряженности неоднородных электрических полей по среднему значению // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74. EDN: VISFYM.
22. Пат. 2774654 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля датчиком сдвоенного типа / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. № 2021120704; заявл. 14.07.2021; опубл. 21.06.2022. Бюл. № 18.
23. Пат. 2776097 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля с использованием датчика сдвоенного типа / Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. № 2021120706; заявл. 14.07.2021; опубл. 13.07.2022. Бюл. № 20.
24. Пат. 210806 U1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами / Бирюков С. В., Тюкина Л. В. № 2022101437; заявл. 24.01.2022; опубл. 05.05.2022. Бюл. № 13.

25. Щигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.

26. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for Scientific Research. 1978. Vol. 49 (7). P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

Бирюков С. В. Концепция создания измерителя напряженности электрического поля с определением погрешности результата измерений и расстояния до источника поля // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-110-118.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023 г.

© С. В. Бирюков

THE CONCEPT OF CREATING AN ELECTRIC FIELD STRENGTH METER WITH THE DETERMINATION OF THE ERROR OF THE MEASUREMENT RESULT AND THE DISTANCE TO THE FIELD SOURCE

A new concept of constructing an electric field strength meter is considered. The concept lies in the fact that along with the measurement of the modulus of the electric field strength vector, the error of the measurement result and the distance to the field source are subject to simultaneous instrumental determination. The field meter is based on a new dual sensor and a method for measuring the electric field strength. The ability of the measurement method to determine the error and the distance to the field source is provided by a dual electroinduction spherical sensor. A feature of a dual sensor is the ability to simultaneously output two field strength values measured at one point, obtained with errors of different signs. This feature made it possible to obtain the measurement result as an average value and two measured values, and thereby reduce the measurement error. The presence of two simultaneously measured values of the field strength also made it possible to obtain an empirical formula for determining the relative distance to the source at each measurement point. The obtained values of the relative distances made it possible to determine the error of the measurement result and the distance from the center of the sensor to the field source using known formulas. The possibility of a field meter to simultaneously instrumentally determine the error of the measurement result and the distance to the field source is considered for the first time.

Keywords: meter, instrument, measurement method, electric field strength, sensor, dual sensor, measurement error, distance to the field source.

References

1. Korobkova V. P., Morozov Yu. A., Stolyarov M. D. [et al.]. Vozdeystviye elektricheskogo polya raspredelitel'nykh ustroystv 500 i 750 kV na obsluzhivayushchiy personal i sredstva dlya ego zashchity [Impact of the electric field of 500 and 750 kV switchgears on operating personnel and means for their protection] // Podstantsii Peremennogo Toka. *AC Substations*. Moscow, 1974. P. 33–43. (In Russ.).
2. Shkarina Yu. P. Vliyaniye elektroustanovok vysokogo napryazheniya na okruzhayushchuyu sredu [Impact of high voltage electrical installations on the environment]. Moscow, 1988. 104 p. (In Russ.).
3. SanPiN 2.2.4.1191-03. «Elektromagnitnyye polya v proizvodstvennykh usloviyakh» [SanPiN 2.2.4.1191-03. «Electromagnetic fields in industrial conditions»]. URL: <https://musormiy.ru/wp-content/uploads/2019/01/sanpin-2.2.4.1191-03.pdf> (accessed: 20.06.2023). (In Russ.).
4. Izmeritel' blizhnego elektromagnitnogo polya ELON. [Near electromagnetic field meter ELON]. URL: https://ppxp.ru/rub/html/pribori/pkosiot/5_09/ (accessed: 15.06.2023). (In Russ.).
5. Izmeritel' napryazhennosti elektricheskogo i magnitnogo polya promyshlennoy chastoty PZ-50 [Industrial frequency electric and magnetic field strength meter PZ-50]. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17638-19-p3-50/> (accessed: 15.06.2023). (In Russ.).
6. Pribor dlya izmereniya elektricheskogo polya IN•EP-50 [Electric field measuring device INEP-50]. URL: http://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass_INAP.DOC (accessed: 10.04.2023). (In Russ.).
7. Izmeritel' napryazhennosti EP promyshlennoy chastoty GRADAN [Industrial frequency ED voltage meter GRADAN]. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel_napryazhennosti_elektricheskogo_polya_promishlennoy_chastoti_gradan_ot_kompanii_elektroenergetika.html (accessed: 04.06.2023). (In Russ.).
8. Izotropnyy izmeritel' elektromagnitnogo polya P3-60 [Isotropic electromagnetic field meter P3-60]. URL: <https://ciklon-pribor.ru/pdf/p3-60%20pasp.pdf28> (accessed: 07.07.2023). (In Russ.).
9. Izotropnyy analizator polya EFA-3 [Isotropic field analyzer EFA-3]. URL: https://elektrotanya.com/files/e_efa3.pdf (accessed: 08.07.2023). (In Russ.).
10. Portativnyy analizator elektromagnitnogo polya EFA-300 [Portable electromagnetic field analyzer EFA-300]. URL: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291_efa-300_at_ru.pdf (accessed: 08.06.2023). (In Russ.).
11. Izmeritel' elektricheskogo polya promyshlennoy chastoty BE-50 [Power frequency electric field meter BE-50]. URL: <https://ntm.ru/products/44/7261> (accessed: 08.06.2023). (In Russ.).
12. Izmeritel' parametrov elektricheskogo i magnitnogo polya VE-metr [Meter of parameters of electric and magnetic fields

BE-meter]. URL: https://priborysgk.ru/upload/shop_3/2/0/9/item_209/shop_property_file_209_189.pdf (accessed: 10.07.2023). (In Russ.).

13. Yurkevich V. M., Kondrat'yev B. L. O metodike izmereniya napryazhennosti i drugikh kharakteristik elektricheskogo polya [About the technique for measuring the intensity and other characteristics of the electric field] // *Izmeritel'naya Tekhnika. Izmeritel'naya Tekhnika*. 1980. No. 5. P. 57–59. (In Russ.).

14. Chugunov S. A., Yurkevich V. M. Rasshireniye zony izmereniya parametrov elektricheskogo polya pri primeneni zondovogo metoda [Expanding the area for measuring electric field parameters when using the probe method] // *Izmeritel'naya Tekhnika. Izmeritel'naya Tekhnika*. 1981. No. 1. P. 33–35. (In Russ.).

15. Kondrat'yev B. L., Yurkevich V. M. Izmereniya v elektricheskom pole s vyravnivaniyem potentsialov [Electric field measurements with potential equalization] // *Trudy Moskovskogo Energeticheskogo Instituta. Trudy Moskovskogo Energeticheskogo Instituta*. 1979. Vol. 432. P. 20–22. (In Russ.).

16. Koldekott P., Devore R. V., Sebo S. A. Izmereniye elektricheskikh poley na podstantsiyakh sverkhvysokogo napryazheniya [Measuring electric fields at ultra-high voltage substations] // *Elektricheskiye Stantsii Seti i Sistemy. Ekspres Informatsiya. Electric Power Stations Networks and Systems. Express Information*. 1977. No. 19. P. 10–26. (In Russ.).

17. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ electrique alternatif 50 Hz // *Rev. gen. elec.* 1988. No. 7. P. 27–38. (In Engl.).

18. Biryukov S. V. Metod izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya putem vyravnivaniya sostavlyayushchikh [Method for measuring electric field strength by equalizing components] // *Datchiki i Preobrazovateli Informatsii Sistem Izmereniya, Kontrolya i Upravleniya (Datchik-2002). Sensors and Information Converters for Measurement, Monitoring and Control Systems (Sensor-2002)*. Moscow, 2002. P. 25–26. (In Russ.).

19. Biryukov S. V. Metody izmereniya napryazhennosti neodnorodnykh elektricheskikh poley vblizi istochnikov polya trekhkoordinatnymi datchikami [Methods of measuring non-uniform electric field intensity close to field sources by using three-coordinate sensors] // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*. 2003. No. 4. P. 22–25. EDN: HTUFYJ. (In Russ.).

20. Patent 2773868 Russian Federation, IPC G 01 R 29/08, G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya sdvoennym datchikom [A method for measuring the electric field strength with a dual sensor] // Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120230. (In Russ.).

21. Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. Metod izmereniya napryazhennosti neodnorodnykh elektricheskikh poley

po srednemu znacheniyu [Method for measuring intensity of inhomogeneous electrical fields by average value] // *Omskiy Nauchnyy Vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 4 (178). P. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74. EDN: VISFYM. (In Russ.).

22. Patent 2774654 S1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya datchikom sdvoennogo tipa [Method for measuring electric field strength with a dual-type sensor] // Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120704. (In Russ.).

23. Patent 2776097 S1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya s ispol'zovaniyem datchika sdvoennogo tipa [Method for measuring electric field strength using a dual-type sensor] // Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120706. (In Russ.).

24. Patent 210806 U1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sdvoennyy datchik dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya s sostavnymi chuvstvitel'nymi elementami [Dual sensor for measuring electric field strength with composite sensing elements] // Biryukov S. V., Tyukina L. V. No. 2022101437. (In Russ.).

25. Shchiglovskiy K. B., Aksel'rod V. S. Pribory dlya izmereniya parametrov elektrostati-cheskogo polya i ikh kalibrovka [Instruments for measuring electrostatic field parameters and their calibration] // *Izmeritel'naya Tekhnika. Izmeritel'naya Tekhnika*. 1978. No. 5. P. 63–65. (In Russ.).

26. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // *Instruments for Scientific Research*. 1978. Vol. 49 (7). P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497. (In Engl.).

BIRYUKOV Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

For citations

Biryukov S. V. The concept of creating an electric field strength meter with the determination of the error of the measurement result and the distance to the field source // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 110–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-110-118.

Received July 17, 2023.

© S. V. Biryukov

ПОВЫШЕНИЕ КОНТРАСТА И ТОЧНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИНТЕРЕСА НА ОРТОФОТОПЛАНАХ МЕСТНОСТИ, ПОСТРОЕННЫХ ПО ИСКАЖЕННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье рассматриваются и сравниваются методики устранения искажений на исходных изображениях с беспилотного летательного аппарата, целью которых является увеличение контраста и точности определения координат объектов интереса относительно фона. Проведены авиационные работы с целью получения исходных изображений подстилающей поверхности с различными временами экспозиции, а также данных с навигационного модуля беспилотного летательного аппарата. Осуществлена камеральная обработка полученных материалов, рассчитаны точные центры фотографирования каждого из изображений и построены ортофотопланы местности. Оценен контраст и точность определения координат объектов интереса относительно фона на ортофотопланах местности, построенных по исходным и восстановленным различными методами изображениям.

Ключевые слова: ортофотоплан местности, изображение, точность, контраст, объект интереса, искажение, беспилотный летательный аппарат.

Введение. В данной работе под контрастом понимается — относительный контраст. То есть контраст, который отражает степень различия между темным и светлым элементами изображения. Проблема низкого контраста объектов интереса на ортофотопланах местности возникает в том случае, когда беспилотный летательный аппарат (БПЛА) совершает полет на низкой высоте и высокой скорости либо при съемке в условиях недостаточной освещенности сцены. На изображениях возникает искажение — смаз, который уменьшает контраст объектов интереса на ортофотопланах. Это приводит к тому, что дешифрирование объектов интереса и их локализация становятся проблематичными. В связи с этим проблема повышения контраста на изображениях, полученных с БПЛА, в ряде случаев является весьма актуальной.

Получение исходных данных. Для получения исходных изображений с БПЛА и результатов спутниковых измерений был выбран участок местности с нанесенной дорожной разметкой, которая была

Таблица 1

Основные параметры полетного задания

Параметр	Значение параметра
Высота полета, м	100
Скорость полета, м/с	9
Продольное перекрытие изображений	80 %
Поперечное перекрытие изображений	70 %
Экспозиция, с	1/640, 1/400, 1/320, 1/240, 1/160, 1/100, 1/80, 1/60, 1/50, 1/25, 1/10, 1/5, 1/2

использована в качестве объекта интереса, так как она обладает большим контрастом по отношению к фону (асфальту). Перед проведением авиационных работ были точно определены координаты

Ошибка определения координат в контрольных точках в зависимости от времени экспозиции

Значение экспозиции, с	1/640	1/320	1/160	1/80	1/25	1/10	1/5	1/2
Ошибка, см	5,3	6,65	6,9	7,8	12,38	25,1	54,63	129,2



Рис. 1. Объекты интереса при различных временах экспозиции: а) 1/25 с; б) 1/10 с; в) 1/5 с; г) 1/2 с

Таблица 3

Априорные данные

Параметр	Значение
Высота полета, м	100
Скорость полета, м/с	9
Размер кадра, пиксели	3648×5472
Фокусное расстояние, мм	8,8 мм/24 мм (эквивалент 35 мм)
Физический размер матрицы, мм	13,2×8,8
Угол обзора, градусы	84°

краев и углов разметки с использованием высокоточного геодезического прибора, который имеет действующую метрологическую поверку [1]. Всего были определены координаты восьми контрольных точек. Затем было составлено полетное задание (табл. 1). Высота полета, скорость и перекрытие снимков оставались неизменными, а время экспозиции изменялось от 1/640 с до 1/2 с.

В ходе выполнения полетного задания было получено 13 видеорядов, показывающих исследуемую местность. Каждый видеоряд состоит из изображений, снятых с различными временами экспозиции.

Камеральная обработка. После анализа материалов аэрофотосъемки в ходе камеральной обработки было получено 13 ортофотопланов местности. Обработка материалов производилась по методике, описанной в [2, 3]. Ошибка определения координат в контрольных точках на ортофотоплане была оценена по сравнению с результатами инструментальных измерений и представлена в табл. 2.

Из табл. 2 можно сделать вывод, что ошибка определения координат в контрольных точках превышает 10 см при экспозиции 1/25 с. Эта ошибка является критической при использовании ортофотопланов местности масштаба 1:500, которые долж-

ны быть более точными и иметь высокое разрешение.

На рис. 1 приведены изображения объектов интереса при различных временах экспозиции.

Моделирование ФРТ. Для повышения контраста на изображениях необходимо определить функцию рассеяния точки (ФРТ). В настоящее время БПЛА оснащены инерциальной системой и выполняют полет по заранее запланированному маршруту. Обычно их движение прямолинейное и равномерное. В результате этого мы можем заранее знать некоторую информацию о характере ФРТ.

Исходя из этого, ФРТ представляет собой след, оставленный малоразмерным объектом на изображении. Размер этого следа равен расстоянию, пройденному БПЛА за время экспонирования камеры, то есть за время экспозиции, выраженное в пикселях [4, 5].

В табл. 3 представлены априорные данные о полете БПЛА и параметры сенсора камеры, необходимые для вычисления размера и направления ФРТ.

Зная параметры сенсора камеры, фокусное расстояние и высоту полета БПЛА в момент создания изображения, мы можем вычислить размер пиксела на местности. Так, при высоте полета 100 м размер пиксела на местности равен 2,7 см. Зная скорость полета и время экспозиции, вычисляем расстояние в пикселях, пройденное БПЛА за время экспонирования матрицы. В табл. 4 представлены результаты вычислений.

По результатам анализа (табл. 4) можно сделать вывод, что существенное расстояние (13 пикселей) БПЛА проходит начиная со времени экспозиции 1/25 с и более. Учитывая направление движения БПЛА, ФРТ можно представить в виде линии, совпадающей с направлением полета.

Повышение контраста на искусственно искаженных изображениях. Получив ФРТ, мы искусственно исказили несмазанные изображения исследуемого полигона, которые были получены при времени экспозиции 1/640 с. Затем по этим изображениям был построен ортофотоплан местности.

Таблица 4

Результат вычисления расстояния, пройденного БПЛА за время срабатывания затвора камеры

Время экспонирования, с	1/640	1/320	1/160	1/80	1/25	1/10	1/5	1/2
Пройденное БПЛА расстояние, пиксели	0,41	1,02	2,08	4,16	13,33	33,33	66,67	166,67

Сравнительная характеристика двух профилей

Характеристика	Неискаженное (1/640 с)	Искусственно искаженное (1/25 с)
СКО определения координат в контрольных точках, см	5,3	10,4
Контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона	11,2	4,78
Размер смаза, пиксели	0,41	13,3



Рис. 2. Изображение объекта интереса с искусственным смазом с временем экспозиции 1/25 с

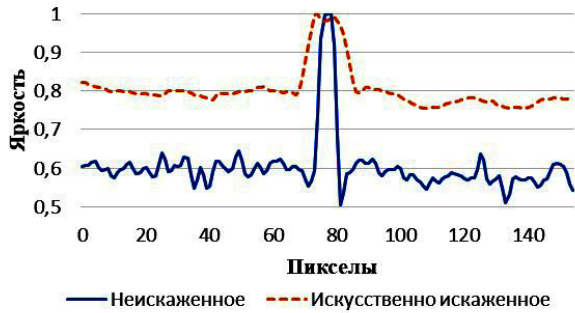


Рис. 3. Профиль яркости объекта интереса относительной яркости фона исходного и искусственно искаженного изображений

Установлено, что заданная ФРТ соответствует экспозиции 1/25 с. На рис. 2 представлено изображение объекта интереса на полученном ортофотооплаке местности с линией выбора строки для анализа профиля яркости.

На рис. 3 приведен нормированный профиль относительной яркости объекта интереса исходного и искусственно искаженного изображений.

В табл. 5 представлены сравнительные характеристики двух профилей яркости.

Общая ошибка определения координат в контрольных точках составила 10,4 см, что примерно

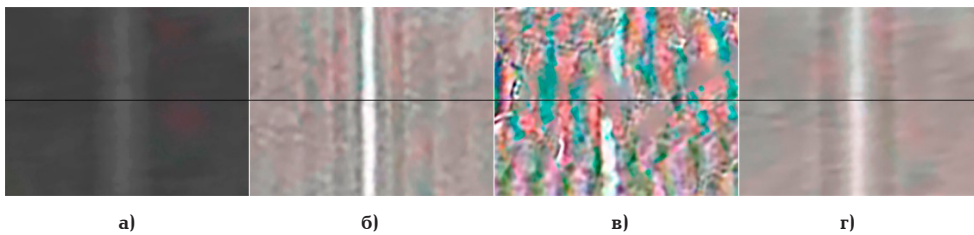


Рис. 4. Результат восстановления различными методами: а) винеровская фильтрация; б) фильтрация Люси-Ричардсона; в) фильтрация Тихонова; г) слепая деконволюция

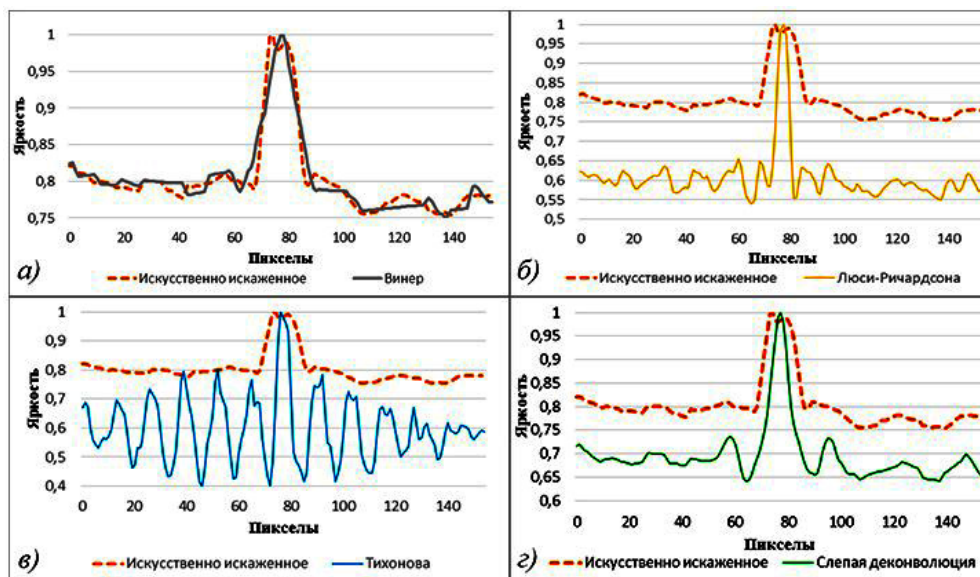


Рис. 5. Профили яркости объекта интереса после восстановления: а) винеровская фильтрация; б) фильтрация Люси-Ричардсона; в) фильтрация Тихонова; г) слепая деконволюция

Сравнительная характеристика профилей яркости искусственно искаженного и восстановленных изображений различными методами

Характеристика	Искусственно искаженное	Винер	Люси – Ричардсон	Тихонов	Слепая деконволюция
СКО определения координат в контрольных точках, см	10,4	5,2	5,9	5,7	4,6
Контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона	11,2	6,37	10,27	3,53	10,33
СКО яркости фона	3,19	1,7	5,77	23,8	4,7

равно ошибке их определения в контрольных точках на изображениях с выдержкой 1/25 с.

Для уменьшения смаза на искусственно искаженных изображениях и улучшения точности определения координат в контрольных точках каждое исходное изображение подверглось обработке с использованием известных методов устранения смаза и повышения контраста в изображениях.

Винеровский фильтр [6] характеризуется тем, что при восстановлении изображения сглаживается.

На рис. 4а приведен объект интереса на ортофотоплане местности, построенном по изображениям, восстановленным фильтром Винера с линией выбора строки для анализа профиля яркости.

На рис. 5а представлен профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона искусственно искаженного изображения и восстановленного фильтром Винера.

Из графика видно, что пик стал более острым, а фон и линия более сглаженными.

В табл. 6 представлены сравнительные характеристики двух профилей.

Из табл. 6 видно, что восстановление смазанных изображений по Винеру с использованием априорной информации о ФРТ уменьшает ошибку координат на контрольных точках в два раза.

Фильтр Люси–Ричардсона является итеративным [7]. По этой причине следует выяснить не только априорную информацию о ФРТ, но и выбрать оптимальное количество итераций.

В ходе моделирования были восстановлены одиночные изображения, в которых использовалось разное количество итераций (от 1 до 44). В результате анализа полученных изображений выяснилось, что оптимальным количеством итераций для фильтра Люси – Ричардсона является значение 20. Если применять большее количество итераций, смаз на изображении остается неизменным, а вместо этого начинают преобладать артефакты на изображении. На рис. 4б приведен объект интереса на ортофотоплане местности, построенном по изображениям, восстановленным фильтром Люси – Ричардсона с априорной информацией о ФРТ при 20 итерациях. Показана линия выбора строки для анализа профиля яркости.

На рис. 5б представлен профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного фильтром Люси – Ричардсона.

Из рис. 5б видно, что контраст яркости объекта интереса и яркости фона заметно увеличился. Наряду с этим отчетливо наблюдается значительное увеличение артефактов на изображении.

В табл. 6 представлены сравнительные характеристики двух профилей.

Восстановление изображения фильтром Люси – Ричардсона уменьшило ошибку определения координат в контрольных точках в 1,76 раза.

Фильтрация по методу Тихонова. Характеризуется резким увеличением артефактов на изображении [8]. На рис. 5в приведен объект интереса на ортофотоплане местности, построенном по изображениям, восстановленным фильтром Тихонова с использованием априорной информации о ФРТ. Показана линия выбора строки для анализа профиля яркости.

Из рис. 4в видно, что артефакты на изображении достигают критических значений, что делает процесс дешифровки объектов затруднительным.

На рис. 5в представлен профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного фильтром Тихонова.

В табл. 6 представлена сравнительная характеристика двух профилей.

Применение фильтрации Тихонова для каждого смазанного изображения видеоряда привело к уменьшению ошибки координат в контрольных точках в 1,83 раза. Однако СКО яркости фона достигло 23,8, что отражает большое количество артефактов на восстановленном изображении.

Метод слепой деконволюции. Как и метод Люси – Ричардсона, является итеративным, поэтому необходимо подобрать оптимальное количество итераций [9, 10]. После восстановления одиночного изображения по известной ФРТ с количеством итераций от 1 до 14 выяснилось, что наиболее оптимальный результат получается при количестве итераций, равном 6. На рис. 4г приведен объект интереса на ортофотоплане местности, построенный по изображениям, восстановленным методом слепой деконволюции с априорной информацией о ФРТ и количеством итераций, равным 6. Показана линия выбора строки для анализа профиля яркости.

Результат восстановления по методу слепой деконволюции похож на результат винеровской фильтрации, но, в отличие от него, объекты интереса имеют более выраженный контраст по отношению к фону.

На рис. 5г представлен профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного методом слепой деконволюции.

В табл. 6 представлены сравнительные характеристики двух профилей яркости.



Рис. 6. Изображение объекта интереса на ортофотоплане местности по реальным снимкам

Применение метода слепой деконволюции для каждого смазанного изображения видеоряда привело к уменьшению ошибки координат в контрольных точках в 2,26 раза. СКО яркости фона достигло 4,7, что говорит о низком уровне артефактов на изображении. По своим характеристикам результат получился близким к фильтрации по методу Винера.

Наибольший контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона наблюдается у изображений, восстановленных по методу Люси – Ричардсона (10,27) и слепой деконволюции (10,33).

Обработка реальных искаженных изображений. Для обработки реальных изображений со смазом выбраны изображения, полученные при значении экспозиции 1/25 с. Такой выбор обусловлен тем, что ранее использовались искусственно искаженные изображения с ФРТ, которая соответствует смазу 1/25 с. Соответственно, сравнение полученных результатов будет более адекватным.

На рис. 6 представлено изображение объекта интереса из ортофотоплана местности, построенного по реальным изображениям со смазом и линией выбора строки для анализа профиля яркости.

Как и ранее, каждое исходное изображение восстанавливалось четырьмя различными методами.

На рис. 7 представлены изображения объектов интереса из ортофотопланов местности, построенных по изображениям, восстановленным различными методами.

В табл. 7 представлены сравнительные характеристики профилей яркости реального и восстановленных изображений различными методами.

Из табл. 7 следует, что наименьшая ошибка определения координат в контрольных точках наблюдается при фильтрации алгоритмом Люси – Ричардсона и равняется 5,11 см вместо 12,38 см на исходном изображении.

Наибольший контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона наблюдается при фильтрации методом слепой деконволюции и равен 21,1 вместо 10,51 у исходного. Наибольшее СКО яркости фона достигается при фильтрации по методу Тихонова, что говорит о наличии ярко выраженных артефактов на восстановленных изображениях.

Заключение. Была проведена обработка искаженных изображений с целью увеличения контраста объектов интереса и повышения точности определения их географических координат. Результаты обработки искусственно искаженных и реальных изображений с БПЛА согласуются между собой. Представленные методы предобработки реальных изображений с БПЛА повысили их качество по критерию повышения контраста и точности локализации (определения координат) объектов интереса. Наилучший результат по точности определения координат объектов интереса показала обработка реальных искаженных изображений фильтром Люси – Ричардсона (ошибка определения координат в контрольных точках уменьшилась с 12,38 см до 5,11 см), а наибольший контраст получен после предобработки изображений по методу слепой деконволюции (с 10,51 до 21,1). Работа имеет практическую значимость для обработки и анализа данных, полученных с БПЛА, и может быть использована в различных областях, таких как геодезия, картография и экология.

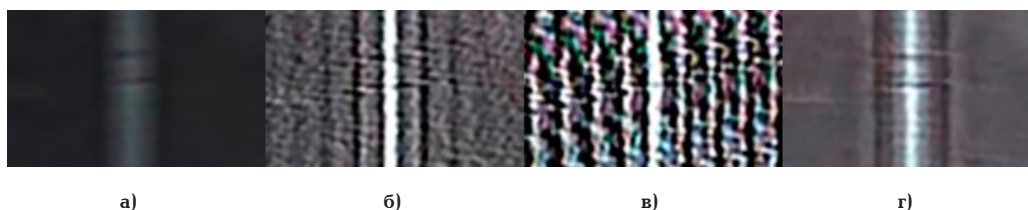


Рис. 7. Изображения объекта интереса на восстановленных ортофотопланах местности: а) винеровская фильтрация; б) фильтрация Люси – Ричардсона; в) фильтрация Тихонова; г) слепая деконволюция

Таблица 7

Сравнительная характеристика профилей яркости реального и восстановленных изображений различными методами

Характеристика	Реальные изображения	Винер	Люси – Ричардсон	Тихонов	Слепая деконволюция
СКО определения координат в контрольных точках, см	12,38	7,18	5,11	9,1	5,99
Контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона	10,51	13,8	4,5	1,44	21,1
СКО яркости фона	2,78	1,76	19,78	66,32	5,58

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

Библиографический список

1. Захлебн А. С. Построение ортофотоплана местности с использованием БПЛА вертолетного типа DJI PHANTOM 4 // Электронные средства и системы управления: материалы докл. в междунар. науч.-прак. конф. 2018. № 1–2. С. 159–161. EDN: ZEMEMP.
2. Захлебн А. С. Метод обработки материалов аэрофото-съемки для построения геопривязанного ортофотоплана местности с телевизионной камеры беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 PRO // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2021. № 4 (53). С. 26–35. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-26-35.
3. Kapustin V., Movchan A., Kuryachiy M. [et al.]. Activepulse television measuring systems images space-time filtration by // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1488. P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1488/1/012032.
4. Гуркина Е. Д., Белов Ю. С. Коррекция размытых изображений // Международный студенческий научный вестник. 2017. № 5. С. 30. EDN: ZNLNGL.
5. Браславская О. Б., Гендрин И. Ю., Квач А. С. Сравнение двух методов расчета функции размытия точки и оптической передаточной функции // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 9–2. С. 215–216. EDN: RWIFMF.
6. Медведков Н. В., Трубаков А. О. Исследование метри-качества результатов инверсной фильтрации Винера для размытых и прямолинейно смазанных изображений // КОГРАФ-2021: сб. материалов 31-й Всерос. науч.-прак. конф. по графическим информационным технологиям и системам, Нижний Новгород, 19–22 апреля 2021. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2021. С. 51–58. DOI: 10.46960/43791586_2021_51. EDN: YANYHA.
7. Брейкина К. В., Умняшкин С. В. Оценка качества изображения при компенсации смаза по методу Люси–Ричардсона // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2020. Т. 25, № 2. С. 167–174. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-2-167-174. EDN: GDDQFI.
8. Данилина Е. А., Елфимов В. Т. Оптимизация решения задачи восстановления изображения методом Тихонова // Молодежный научно-технический вестник. 2016. № 2. С. 34. EDN: VRWZRH.
9. Медведков Н. В., Трубаков А. О. Решение задачи «слепой» деконволюции с помощью генетического алгоритма // КОГРАФ-2022 по графическим информационным технологиям и системам: сб. материалов 32-й Всерос. науч.-прак. конф., Нижний Новгород, 18–21 апреля 2022. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2022. С. 39–47. DOI: 10.46960/kograp_2022_39. EDN: AIEBRU.
10. Коробейников А. Г., Федосовский М. Е., Алексанин С. А. Разработка автоматизированной процедуры для решения задачи восстановления смазанных цифровых изображений // Кибернетика и программирование. 2016. № 1. С. 270–291. DOI: 10.7256/2306-4196.2016.1.17867. EDN: VKQHCD.

ЗАХЛЕБИН Александр Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник лаборатории телевизионной автоматки Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), г. Томск.

SPIN-код: 7268-2196

AuthorID (РИНЦ): 976293

Адрес для переписки: aegosnimok@gmail.com

КУРЯЧИЙ Михаил Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления, старший научный сотрудник лаборатории телевизионной автоматки ТУСУР, г. Томск.

SPIN-код: 1827-7872

AuthorID (РИНЦ): 530114

ORCID: 0000-0002-3970-5644

AuthorID (SCOPUS): 56926935000

Адрес для переписки: kur@tu.tusur.ru

КАПУСТИН Вячеслав Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления, заведующий лабораторией телевизионной автоматки ТУСУР, г. Томск.

SPIN-код: 7584-3518

AuthorID (РИНЦ): 897739

ORCID: 0000-0002-2293-0511

AuthorID (SCOPUS): 56926934100

КАМЕНСКИЙ Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления, доцент кафедры цифрового телевидения ТУСУР, г. Томск.

SPIN-код: 9572-4278

AuthorID (РИНЦ): 1057825

ORCID: 0000-0001-6587-7776

AuthorID (SCOPUS): 57191031758

МОВЧАН Андрей Кириллович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник лаборатории телевизионной автоматки ТУСУР, г. Томск.

SPIN-код: 7690-0947

AuthorID (РИНЦ): 975781

AuthorID (SCOPUS): 57203239393

Для цитирования

Захлебн А. С., Курячий М. И., Капустин В. В., Каменский А. В., Мовчан А. К. Повышение контраста и точности локализации объектов интереса на ортофотопланах местности, построенных по искаженным изображениям с беспилотного летательного аппарата // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 119–126. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-119-126.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023 г.

© А. С. Захлебн, М. И. Курячий, В. В. Капустин,

А. В. Каменский, А. К. Мовчан

INCREASING THE CONTRAST AND ACCURACY OF LOCALIZATION OF OBJECTS OF INTEREST ON ORTHOPHOTOMAPS OF THE TERRAIN BUILT FROM DISTORTED IMAGES FROM AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

In this article, we will consider and compare methods for eliminating distortions in the original images obtained from an unmanned aerial vehicle. The main goal of these methods is to increase the contrast and accuracy of determining the coordinates of objects of interest relative to the background. To conduct the study, aerial work is performed, during which initial images of the underlying surface with different exposure times are obtained, as well as data from the unmanned aerial vehicle navigation module. Further, cameral processing of the received materials is carried out. The exact centers for photographing each image are calculated and orthophotomaps of the area are built. Then we have evaluated the contrast and accuracy of determining the coordinates of objects of interest relative to the background on the orthophotomaps of the area built from the original and restored images using various methods.

Keywords: terrain orthomosaic, image, accuracy, contrast, object of interest, distortion, unmanned aerial vehicle.

Acknowledgments

The study is supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10200 at TUSUR.

References

1. Zakhlebin A. S. Postroyeniye ortofotoplana mestnosti s ispol'zovaniyem BPLA vertoletnogo tipa DJI PHANTOM 4 [Creation of an orthophotomap of the area using the DJI PHANTOM 4 helicopter type UAV] // *Elektronnyye Sredstva I Sistemy Upravleniya. Electronic Devices and Control Systems*. 2018. No. 1–2. P. 159–161. EDN: ZEMEMP. (In Russ.).
2. Zakhlebin A. S. Metod obrabotki materialov aerofotos'yemki dlya postroyeniya geopriv'yazannogo ortofotoplana mestnosti s televizionnoy kamery bespilotnogo letatel'nogo apparata DJI Phantom 4 PRO [A method of processing aerial photography materials for building a georeferenced orthomosaic of the terrain from a television camera of the unmanned aerial vehicle DJI Phantom 4 PRO] // *Doklady Akademii Nauk Vyshey Shkoly Rossiyskoy Federatsii. Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2021. No. 4 (53). P. 26–35. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-4-26-35. (In Russ.).
3. Kapustin V., Movchan A., Kuryachiy M. [et al.]. Activepulse television measuring systems images space-time filtration by // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1488. P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1488/1/012032. (In Engl.).
4. Gurkina E. D., Belov Yu. S. Korrektsiya razmytykh izobrazheniy [Image motion deblurring] // *Mezhdunarodnyy Studencheskiy Nauchnyy Vestnik. International Student Scientific Herald*. 2017. No. 5. P. 30. EDN: ZNLNGL. (In Russ.).
5. Braslavskaya O. B., Gendrina I. Yu., Kvach A. S. Sravneniye dvukh metodov rascheta funktsii razmytiya tochki i opticheskoy peredatochnoy funktsii [The comparison of two methods for determining of point spread function (PSF) and optical transfer function (OTF)] // *Izvestiya vuzov. Fizika. Izvestiya vuzov. Fizika*. 2013. Vol. 56, no. 9–2. P. 215–216. EDN: RWIFMF. (In Russ.).
6. Medvedkov N. V., Trubakov A. O. Issledovaniye metrik kachestva rezul'tatov inversnoy fil'tratsii Vinera dlya razmytykh i pryamolineyno smazannykh [Research of quality metrics for results of wiener inverse filtering of blurred and linear motion blurred images] // *KOGRAF-2021. COGRAPH-2021*. Nizhny

Novgorod, 2021. P. 51–58. DOI: 10.46960/43791586_2021_51. EDN: YANYHA. (In Russ.).

7. Brejkina K. V., Umnyashkin S. V. Ocenka kachestva izobrazheniya pri kompensacii smaza po metodu Lyusi — Richardsona [Evaluation of Image Quality with Lucy-Richardson Blur Compensation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika. News of Higher Educational Institutions. Electronics*. 2020. No. 2 (25). P. 167–174. (In Russ.).

8. Danilina E. A., Elfimov V. T. Optimizatsiya resheniya zadachi vosstanovleniya izobrazheniya metodom Tikhonova [Optimization of the solution of the image restoration problem by the Tikhonov method] // *Youth Scientific and Technical Bulletin*. 2016. No. 2. P. 34. (In Russ.).

9. Medvedkov N. V., Trubakov A. O. Reshenie zadachi «slepoy» dekonvolyuicii s pomoshch'yu geneticheskogo algoritma [Optimization of the solution to the image restoration problem using Tikhonov's method] // *KOGRAF-2022. COGRAPH-2022*. Nizhny Novgorod, 2022. P. 39–47. DOI: 10.46960/kograph_2022_39. EDN: AIEBRU. (In Russ.).

10. Korobeynikov A. G., Fedosovskiy M. E., Aleksanin S. A. Razrabotka avtomatizirovannoy protsedury dlya resheniya zadachi vosstanovleniya smazannykh tsifrovyykh izobrazheniy [Development of an automated procedure for solving the problem of restoring blurry digital images] // *Kibernetika i Programirovaniye. Cybernetics and Programming*. 2016. No. 1. P. 270–291. DOI: 10.7256/2306-4196.2016.1.17867. EDN: VKQHCD. (In Russ.).

ZAKHLEBIN Aleksandr Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Television and Management Department, Junior Researcher of Laboratory of Television Automation, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk.

SPIN-code: 7268-2196

AuthorID (RSCI): 976293

Correspondence address: aerosnimok@gmail.com

KURYACHIY Mikhail Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Television and Management Department, Senior Researcher of Laboratory of Television Automation, TUSUR, Tomsk.

SPIN-code: 1827-7872

AuthorID (RSCI): 530114

ORCID: 0000-0002-3970-5644

AuthorID (SCOPUS): 56926935000

Correspondence address: kur@tu.tusur.ru

KAPUSTIN Vyacheslav Valeryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Television and Management Department, Head of Laboratory of Television Automation, TUSUR, Tomsk.

SPIN-code: 7584-3518

AuthorID (RSCI): 897739

ORCID: 0000-0002-2293-0511

AuthorID (SCOPUS): 56926934100

KAMENSKIY Andrey Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Television and Management Department, Associate Professor of Digital Television Department, TUSUR, Tomsk.

SPIN-code: 9572-4278

AuthorID (RSCI): 1057825

ORCID: 0000-0001-6587-7776

AuthorID (SCOPUS): 57191031758

MOVCHAN Andrey Kirillovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Television and Management Department, Junior Researcher of Laboratory of Television Automation, TUSUR, Tomsk.

SPIN-code: 7690-0947

AuthorID (RSCI): 975781

AuthorID (SCOPUS): 57203239393

For citations

Zakhlebin A. S., Kuryachiy M. I., Kapustin V. V., Kamenskiy A. V., Movchan A. K. Increasing the contrast and accuracy of localization of objects of interest on orthophotomaps of the terrain built from distorted images from an unmanned aerial vehicle // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 1 (189). P. 119–126. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-119-126.

Received August 23, 2023.

© A. S. Zakhlebin, M. I. Kuryachiy, V. V. Kapustin,

A. V. Kamenskiy, A. K. Movchan

ЦИФРОВОЙ СГЛАЖИВАЮЩИЙ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫЙ РЕКУРСИВНО- СЕПАРАБЕЛЬНЫЙ ФИЛЬТР ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ РАЗМЕРАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АПЕРТУРЫ

Развитие телевизионных систем является важным фактором для многих отраслей, занимающихся получением, обработкой, хранением и передачей изображений. На сегодняшний день актуальной задачей в применении подобных систем является улучшение качества изображений, полученных с помощью цифровых фото- и видеокамер. Для решения этой задачи могут быть использованы цифровые рекурсивно-сепарабельные сглаживающие фильтры. В работе приводится описание процесса работы алгоритма изменения размера сканирующей многоэлементной апертуры сглаживающего трапецеидального рекурсивно-сепарабельного фильтра обработки цифровых изображений. Приведены результаты оценки его быстродействия относительно того же алгоритма, реализованного через классическую двумерную свертку при различных размерах тестовых изображений. Оценено влияние размеров апертуры разработанного фильтра на изменение отношения сигнал/шум. Алгоритм был реализован в вычислительной среде MATLAB.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, рекурсивно-сепарабельные фильтры, повышение четкости, оценка качества, быстродействие.

Введение. В настоящее время развитие и распространение телевизионных систем видеонаблюдения является неотъемлемой частью жизни современного человека [1]. Актуальной задачей является улучшение качества изображений, полученных с помощью цифровых фото- и видеокамер, рентгеновских аппаратов, активно-импульсных телевизионно-измерительных систем и других цифровых устройств. В решении этой задачи активно применяются цифровые фильтры, так как одним из основных преимуществ цифровых фильтров является их возможная адаптивность. Они позволяют пользователю настраивать параметры фильтрации в соответствии с конкретными требованиями и желаемыми результатами. Благодаря этому фильтры могут быть применены к различным типам изображений и ситуациям. Они помогают преобразовать нечеткие изображения в четкие и высококачественные, что способствует более точной и полной интерпретации полученных данных [2]. В зависимости от предметной области и задач, решаемых в ней, используются те или иные методы цифровой обработки изображений. Их можно разделить по эффекту, оказываемому на обрабатываемое изображение: коррекция

цветопередачи, при неправильном определении баланса белого; определение и подчеркивание контуров изображения; коррекция дисторсии; устранение шумов; устранение хроматических aberrаций и др. [3].

Целью данной работы является представление алгоритма изменения размера сканирующей многомерной апертуры для цифрового сглаживающего трапецеидального рекурсивно-сепарабельного (СТРС) фильтра обработки изображений.

Описание исходного фильтра. В базовом виде фильтр генерирует маску размером 7×7 элементов за счет коэффициентов строчного (СР) и кадрового (КР) рециркуляторов [4, 5]. Заданные в них значения служат для формирования размера апертуры обработки. Соответственно, для размера 7×7 используются два СР с коэффициентами 6 и 2 и два КР с коэффициентами 6 и 2. Структурная схема исходного фильтра представлена на рис. 1, где: $x(n_1, n_2)$ — входные данные; $z_{1,2}^{-2}$ — задержка на два элемента или строки; $z_{1,2}^{-3}$ — задержка на три элемента или строки; n — текущий номер отсчета сигнала, включая нулевой отсчет ($n = 0, 1, \dots$); M_1 — направление по строкам; M_2 — направление

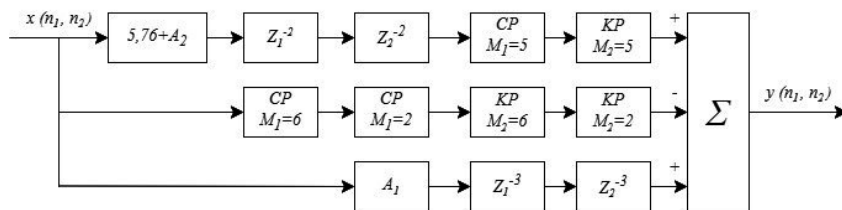


Рис. 1. Структурная схема СТРС фильтра

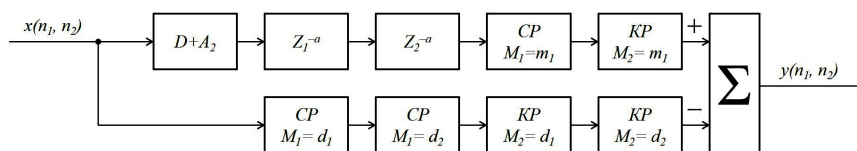


Рис. 2. Структурная схема модифицированного СТРС фильтра

Таблица 1

Параметры, определяемые в ходе внутренних расчетов алгоритма

Параметр	Значение				
	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
Размер апертуры	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
D	16	9	7,11	6,25	5,76
a	1	1	1	1	1
m_1	1	2	3	4	5
d_1	2	3	4	5	6
d_2	2	2	2	2	2

по кадру; $y(n_1, n_2)$ — выходные данные; A_1 — коэффициент увеличения центрального элемента матрицы на введённое значение; A_2 — коэффициент увеличения всей положительной части апертуры (5×5).

С подробным описанием и исследованием этого фильтра можно ознакомиться в работе «Быстродействующий трапецеидальный рекурсивно-сепаративный фильтр обработки изображений» [6].

Модифицированный СТРС фильтр. Поскольку, за счет своей формы, СТРС фильтр имеет большое усечение положительной части, он оказывает сглаживающий эффект на обработанное изображение, что приводит к росту отношения сигнал/шум. Ввиду этого и того факта, что использование коэффициента, отвечающего за подъем центрального элемента маски фильтра, не оказывает значительного влияния на параметры обрабатываемого изображения, целесообразно отказаться от его использования. Это позволит модифицированному алгоритму построения СТРС фильтра осуществлять построение апертур в четной размерности. Изменение размерности маски СТРС фильтра будет осуществляться пользователем путем его задания в начале использования алгоритма. Размер маски задается путем задания положительных значений начиная с 3-х, поскольку у маски должен присутствовать положительный центр. Далее ограничением является только то, что задаваемые размеры должны указываться целыми числами. Структурная схема модифицированного СТРС фильтра представлена на рис. 2, она позволяет задавать требуемый размер апертуры обработки.

В структурной схеме присутствуют следующие элементы: $x(n_1, n_2)$ — входные данные; z_1^{-a} и z_2^{-a} —

задержка на a элементов или строк; n — текущий номер отсчёта сигнала, включая нулевой отсчёт ($n = 0, 1, \dots$); M_1 — направление по строкам; M_2 — направление по кадру; $y(n_1, n_2)$ — выходные данные; A_2 — коэффициент увеличения всей положительной части апертуры; D — дополнительный коэффициент, приводящий сумму положительной и отрицательной части матрицы к нулю; m_1 — размеры CP и KP, формирующих положительную часть маски фильтра; d_1 и d_2 — размеры CP и KP, формирующих основную матрицу фильтра.

В ходе выполнения внутренних расчетов алгоритм определяет значение переменных параметров D, a, m_1, d_1, d_2 и формирует маску заданной размерности. В табл. 1 представлены параметры, определяемые в ходе выполнения внутренних расчетов алгоритма. На рис. 3 представлены сформированные маски размерностью от 3×3 до 7×7 элементов.

Программная реализация модифицированного СТРС фильтра. Алгоритм реализован с использованием пакета прикладных программ MATLAB [7].

Входные данные для работы алгоритма:

- исходное изображение;
- размер маски (h);
- коэффициент подъема центральной апертуры формируемой маски.

Выходные данные работы алгоритма — изображение с примененной фильтрацией. После ввода входных данных автоматически производится расчёт размеров CP и KP, формирующих основную маску. Алгоритм расчёта размеров CP и KP представлен на рис. 4. На основании рассчитанных размеров CP и KP происходит определение размеров и формирование основной матрицы.

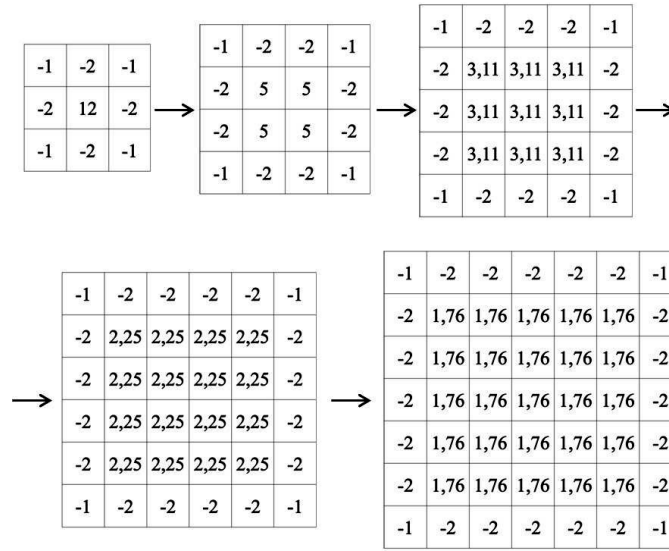


Рис. 3. Процесс изменения апертury фильтра в зависимости от заданной размерности (от 3×3 до 7×7 элементов)

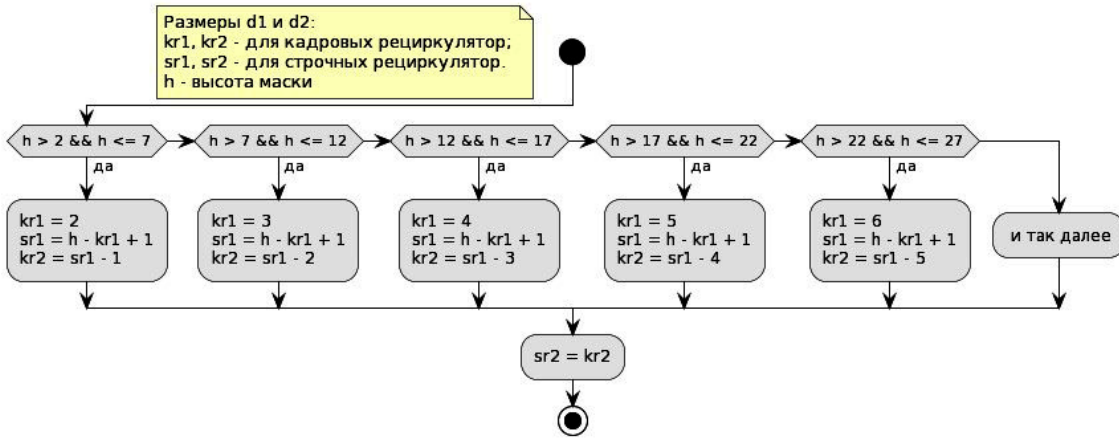


Рис. 4. Алгоритм расчёта размеров СР и КР

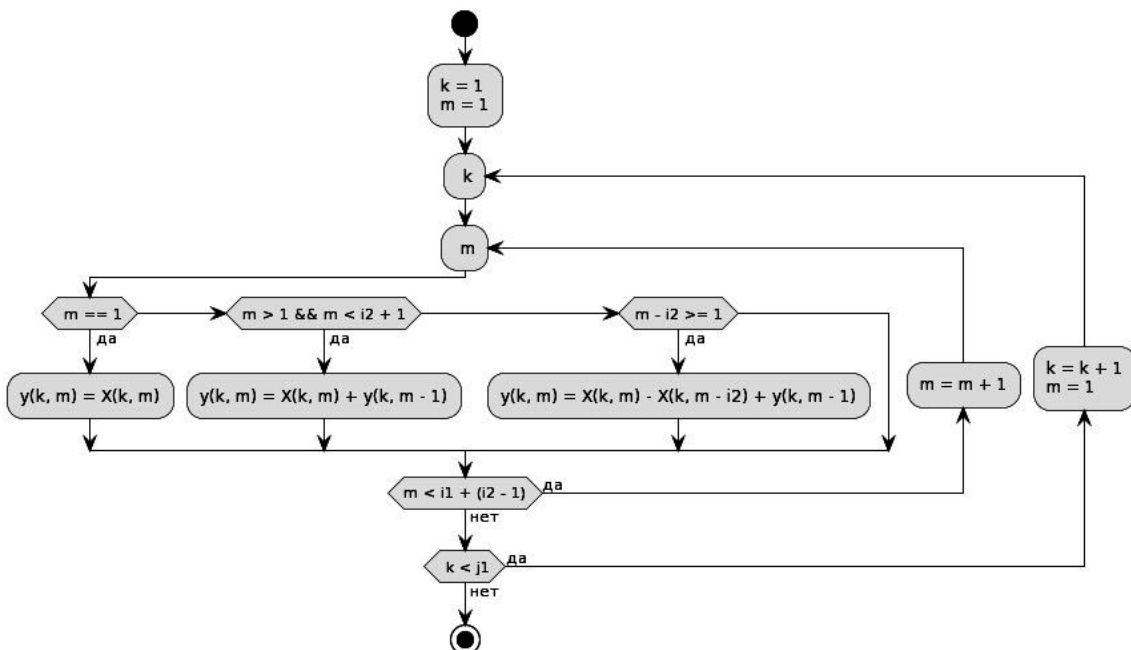


Рис. 5. Алгоритм работы строчного рециркулятора

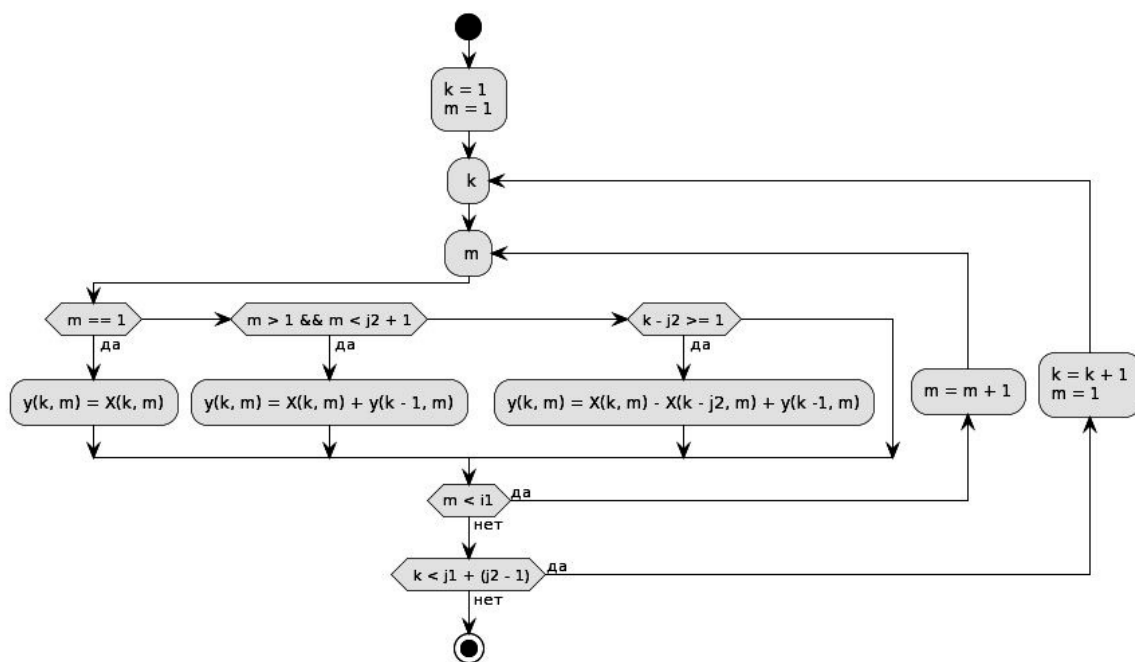


Рис. 6. Алгоритм работы кадрового рециркулятора

Следующим шагом алгоритм выполняет формирование отрицательной матрицы.

Для формирования отрицательной матрицы, согласно структурной схеме (рис. 2), необходимо последовательно выполнить работу 2-х строчных и 2-х кадровых рециркуляторов с рассчитанными размерами.

Алгоритм работы рециркуляторов основан на вложенных циклах: по ширине и высоте расширенного изображения (рис. 5, рис. 6).

На рис. 5 и рис. 6 используются следующие обозначения: k — позиция текущего элемента по горизонтали; m — позиция текущего элемента по вертикали; i_1, i_2 — общее количество элементов по горизонтали во входной и выходной матрицах; j_1, j_2 — общее количество элементов по вертикали во входной и выходной матрицах; $X(k, m)$ — входная матрица; $y(k, m)$ — выходная матрица.

В результате работы этой части фильтра реализуется отрицательная матрица. Сама матрица имеет положительные элементы, но будет использоваться с отрицательным знаком при суммировании двух ветвей фильтра.

Для формирования положительной части необходимо рассчитать дополнительный коэффициент приведения суммы положительной и отрицательной частей D матрицы к нулю и произвести последовательное выполнение процедур обработки СР и КР для исходного изображения с учетом этого коэффициента.

Расчёт коэффициента D производится на основе полученных размеров рециркуляторов:

$$D = \frac{S_0}{P},$$

где D — коэффициент приведения; $S_0 = (sr_1 \cdot kr_1) \cdot (sr_2 \cdot kr_2)$ — сумма элементов матрицы при свертке с единицей; $P = sr_2 \cdot kr_2$ — сумма элементов при свертке положительной матрицы.

Коэффициент D является дополнительным слагаемым для коэффициента увеличения всей поло-

жительной части апертуры A_2 при умножении исходного изображения:

$$A = A_2 + D,$$

где A — общий коэффициент преобразования изображения.

После расчёта коэффициента и умножения исходного изображения на коэффициент A , в соответствии со структурной схемой (рис. 2), для получения положительной матрицы последовательно выполняются процедуры одним строчным (рис. 5) и одним кадровым (рис. 6) рециркуляторами с размерами m_1 и m_2 . В результате формируется положительная матрица работы фильтра.

Положительная и отрицательная матрицы суммируются в соответствии со структурной схемой (рис. 2), в результате формируется обработанное изображение.

Оценка быстродействия. Быстродействие — время, затраченное для обработки полного кадра изображения [8]. Алгоритмы оценки быстродействия подразделяются по виду затраченного ресурса: объём затраченной памяти или скорость (время выполнения алгоритма). Зачастую, эти показатели взаимосвязаны: задачу можно решить быстро, используя большой объём памяти, или медленнее, занимая меньший объём. Из этой зависимости вытекает задача оценки объёмно-временной сложности. При таком подходе алгоритм оценивается как с точки зрения скорости выполнения, так и с точки зрения потребляемой памяти. Но так как в рамках работы оцениваются кадры с одного видеоролика с одинаковым весом, то быстродействие можно определить только по затраченному времени [9].

Первый эксперимент заключался в сравнении работы алгоритма СТРС фильтра при рекурсивно-сепарабельной (РС) реализации и классической двумерной свертке (КДС), при изменении размеров апертуры обработки. Были выбраны следующие размеры апертуры обработки: 3×3; 4×4; 5×5; 6×6; 7×7; 8×8; 9×9; 10×10; 11×11; 12×12 и 27×27 элемен-

Таблица 2

Результаты измерения быстродействия
в рамках первого эксперимента

Коэффициент фильтрации	Время обработки, с	
	Функция в MATLAB	
	РС СТРС	ҚДС СТРС
3×3	8,71	12,21
4×4	8,48	12,44
5×5	8,46	12,67
6×6	8,40	12,98
7×7	8,56	13,00
8×8	8,43	13,55
9×9	8,41	13,83
10×10	8,49	13,90
11×11	8,51	14,45
12×12	8,59	14,84
27×27	9,03	23,53

тов. В исследовании было задействовано тестовое изображение размером 1032×720 элементов. Для исследования была взята вычислительная платформа со следующими характеристиками: процессор AMD A8-3850 APU with Radeon(tm) HD Graphics 2,90 GHz; оперативное запоминающее устройство 8 Гб.

Результаты измерения быстродействия фильтра РС СТРС и ҚДС СТРС представлены в табл. 2.

Из результатов эксперимента следует, что алгоритм СТРС фильтра при РС реализации работает быстрее, чем при ҚДС. При размерах апертуры от 3×3 до 12×12 элементов время обработки колеблется от 8,40 с до 8,71 с, в то время как при ҚДС от 12,21 с до 14,84 с. Рост апертуры до размерности 27×27 элементов показал выигрыш РС реализации относительно ҚДС в 2,61 раза.

В рамках второго эксперимента оценено влияние размеров тестового изображения на время обработки при росте размеров апертуры обработки. Тестовые изображения были выбраны следующих размеров: 640×480; 1280×720; 1280×1024; 1920×1080; 3000×2000 элементов. Исследование проводилось на вычислительной платформе со следующими харак-

теристиками: процессор 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12400F 2,50 GHz; оперативная память 32 Гб. Для обработки были взяты апертуры размерностью 7×7, 15×15, 25×25, 49×49 и 75×75 элементов. В рамках исследования обработка каждой размерностью апертуры осуществлялась 10 раз и находилось их среднее значение. В табл. 3 представлены результаты изменения времени обработки.

Из результатов следует, что, при росте размеров апертуры обработки, время работы РС алгоритма незначительно возрастает, а в ҚДС алгоритме наблюдается значительный рост времени обработки. То же можно отметить и при росте размеров обрабатываемого изображения.

Оценка отношения сигнал/шум. Signal-to-Noise Ratio (SNR) — отношение сигнал/шум (ОСШ), выраженное в децибелах, используется как мера качества восстановления изображений и определяется через среднее значение яркости и стандартное отклонение между двумя изображениями [10, 11]. Оценка ОСШ проводилась с использованием программного обеспечения (ПО) ImageJ. ImageJ — открытое ПО для обработки и анализа цифровых изображений. В ПО ImageJ, на тестовом изображении выбиралась область, по которой происходило измерение дальности до объекта и строилась гистограмма. По полученной гистограмме ПО ImageJ определяло данные о среднем значении яркости и стандартном отклонении. На основе этих данных по области измерения производился расчет ОСШ по выражению

$$\text{ОСШ}_{\text{АБ}} = 20 \lg(M/\sigma), \quad (1)$$

где M — среднее значение яркости; σ — стандартное отклонение [12].

Эксперимент заключался в изменении размерности фильтра и исследовании влияния изменения апертуры на результаты обработки.

Тестовые изображения, представленные на рис. 7, были получены на испытательном полигоне при помощи активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) [13], подробное описание получения видеоданных представлено в работе [14]. Изображения, сформированные АИ ТИС, используются для наблюдения за объектами при плохих условиях видимости и определения расстояния до этих объектов. Наличие шумов на фор-

Таблица 3

Результаты измерения быстродействия в рамках второго эксперимента

Время обработки, с	Размер тестового изображения	Тип алгоритма	Размер апертуры обработки				
			7×7	15×15	25×25	49×49	75×75
			640×480	РС СТРС	0,02	0,06	0,12
ҚДС СТРС	0,11	0,25		0,75	7,94	15,09	
1280×720	РС СТРС	0,06	0,17	0,37	2,00	3,42	
	ҚДС СТРС	0,16	0,74	3,17	13,64	44,20	
1280×1024	РС СТРС	0,08	0,18	0,56	2,99	4,6	
	ҚДС СТРС	0,45	1,56	4,65	29,69	75,40	
1920×1080	РС СТРС	0,09	0,35	0,75	3,46	5,60	
	ҚДС СТРС	0,55	1,96	6,40	41,17	90,05	
3000×2000	РС СТРС	0,52	0,83	2,47	7,42	15,60	
	ҚДС СТРС	1,81	9,49	27,40	120,10	247,35	



Рис. 7. Тестовые изображения: а — объект № 1; б — объект № 2; в — объект № 3

мируемых изображениях приводит к неточности определения расстояния до объектов наблюдения. Постобработка полученных изображений фильтрами для устранения шумов и повышения четкости повышает точность определения расстояния.

Представленные на рис. 7 исходные изображения, в ходе эксперимента были обработаны фильтрами СТРС с размерами масок 3×3, 5×5, 7×7, 9×9, 11×11, 13×13, 15×15, 25×25, 49×49, 75×75, 99×99. Оценка эффективности обработки производилась путем визуального сравнения и расчёта их ОСШ по формуле 1.

Полученные результаты в ходе эксперимента приведены в табл. 4.

На рис. 8 представлены результаты обработки фильтром с апертурой 13×13. Следует обратить внимание на края табличек и очертания цифр (рис. 8а, 8в) — они стали четче. На рис. 8б при детальном рассмотрении просматривается увеличение четкости прорисовки объектов, а на общем плане можно увидеть, что проявились объекты, или их части, которые были не заметны на исходном изображении.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что рост размерности апертуры обработки приводит к повышению отношения сигнал/шум и, как следствие, к повышению качества полученных изображений за счет устранения шумов. Устранение шумов на изображениях, сформированных АИ ТИС, позволяет повышать точность определения расстояния до объектов интереса. Однако при размерах апертуры 49×49 (рис. 9) и более элементов

Таблица 4

Результаты измерения отношения сигнал/шум

Размерность фильтра	ОСШ, дБ		
	Объект № 1	Объект № 2	Объект № 3
	СТРС	СТРС	СТРС
Исходное	14,35	15,62	14,95
7×7	14,49	15,73	14,99
9×9	14,77	16,56	15,18
11×11	14,47	16,14	14,21
13×13	14,65	16,86	15,20
15×15	14,30	17,04	14,25
25×25	14,36	16,37	14,64
49×49	14,60	16,34	15,45
75×75	14,24	16,84	14,38
99×99	14,98	17,55	12,64

происходят нестабильные изменения, которые свидетельствуют о большой потере полезной части сигнала. Это явно наблюдается для объекта № 3, при обработке апертурой 7×7 элементов значение ОСШ равнялось 14,99, при увеличении апертуры до 13×13 элементов значение ОСШ равнялось 15,20, а при обработке апертурой 99×99 элементов снизилось до 12,64.

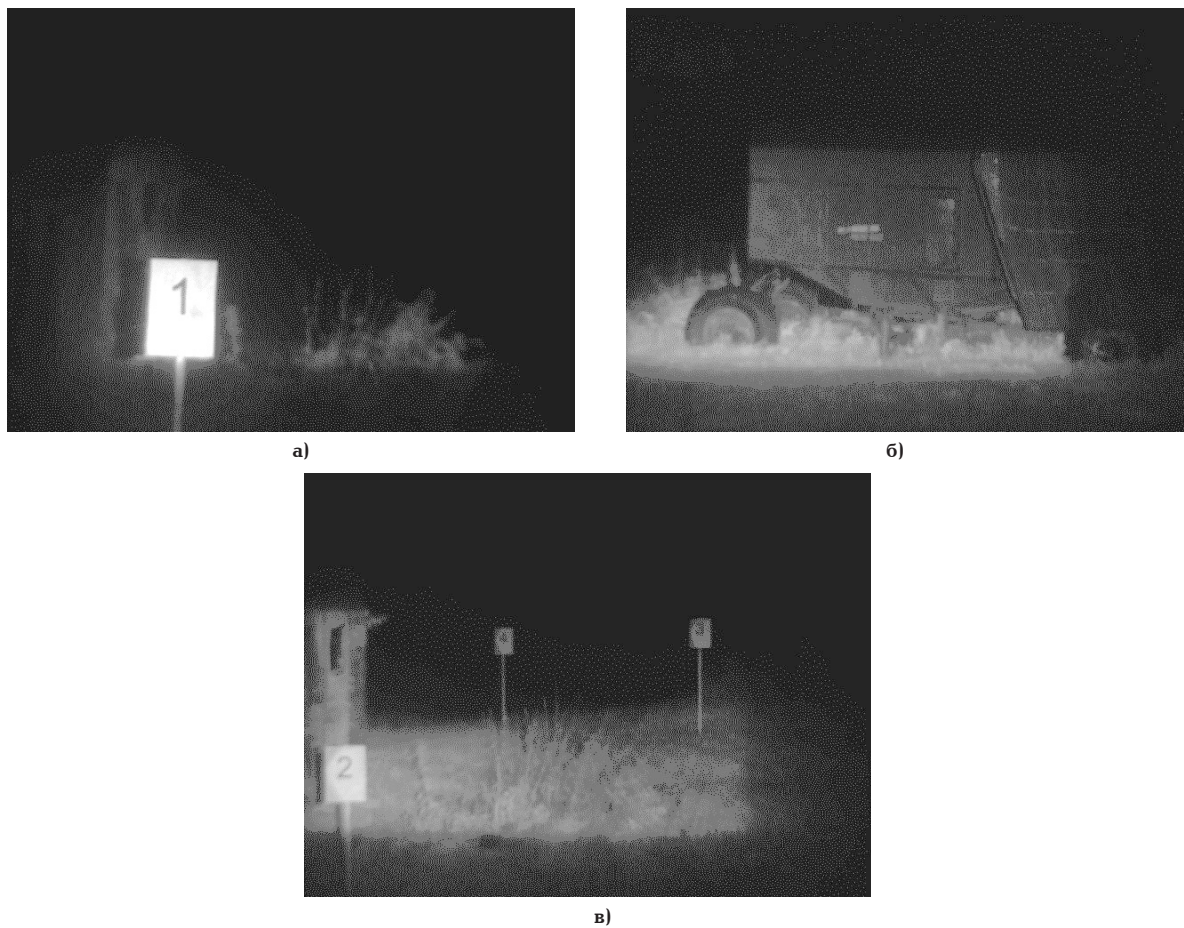


Рис. 8. Изображения, обработанные фильтром с апертурой 13×13: а — объект № 1; б — объект № 2; в — объект № 3



Рис. 9. Изображения, обработанные фильтром с апертурой 49×49: а — объект № 1; б — объект № 2; в — объект № 3

Заключение. Представлено описание алгоритма построения, модифицированного цифрового сглаживающего трапецидального рекурсивно-сепарабельного фильтра, приведена структурная схема для данного фильтра, в котором присутствует возможность изменения размера апертуры обработки. Проведена оценка эффективности обработки тестовых изображений, в ходе которой выявлена эффективность применения разработанного фильтра для задач шумоподавления. В рамках эксперимента наблюдается рост значения ОСШ при росте размера апертуры обработки.

Оценивая быстродействие алгоритма, было выяснено, что при росте размеров апертуры обработки время работы СТРС фильтра в РС реализации возрастает незначительно. В то же время как при реализации в виде КДС время работы алгоритма СТРС фильтра возрастает существенно, например, при изменении размера апертуры с 3×3 до 27×27 элементов время работы алгоритма увеличивается с 12,21 до 23,53 секунды. Все это свидетельствует об эффективности применения разработанного фильтра для задач технического зрения.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной академии наук № 21-79-10200 в ТУСУРе.

Библиографический список

- Li Y., Ibanez-Guzman J. Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems // *EEE Signal Processing Magazine*. 2020. Vol. 37, № 4. P. 50–61. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615.
- Loomis H. H., Sinha B. High-speed recursive digital filter realization // *Circuits, Systems and Signal Processing*. 1984. Vol. 3. P. 267–294. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01599077>.
- Yergaliyev S., Akhtar M. T. A Systematic Review on Distributed Arithmetic-based Hardware Implementation of Adaptive Digital Filters // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 85165–85183. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3304234.
- Толмачева А. С., Каменский А. В., Тисленко А. А., Титов Д. В. Применение быстродействующих рекурсивно-сепарабельных фильтров для обработки зашумленных изображений // *Доклады ТУСУР*. 2023. Т. 26, № 1. С. 56–62. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-56-62.
- Kamenskiy A. V. High-speed recursive-separable image processing filters // *Computer Optics*. 2022. Vol. 46 (4). P. 659–665. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1063.
- Акаева Т. М., Каменский А. В., Струмилова М. А. Быстродействующий трапецидальный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений // *Вопросы радиоэлектроники*. Серия: Техника телевидения. 2023. № 1. С. 138–145. EDN: UPFVQZ.
- Moler C., Little J. A history of MATLAB // *Proceedings of the ACM on Programming Languages*. 2020. Vol. 4, № 81. P. 1–67. DOI: 10.1145/3386331.
- Bister M., Yap C. S., Ng K. H. [et al.]. Increasing the speed of medical image processing in MatLab // *Biomedical Imaging and Intervention Journal*. 2007. Vol. 3, № 1. DOI: 10.2349/bij.3.1.e9.

- C. E. F. do Amaral, Alves R. F., M. J. da Silva [et al.]. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013. Vol. 33. P. 257–264. DOI: 0.1016/j.flowmeasinst.2013.07.006.
- Ghosh A. K., Ansari A. A. To Analysis and Implement Image De-Noise Using Fuzzy and Wiener Filter in Wavelet Domain // *International Journal of Trend in Research and Development*. 2021. Vol. 8, № 3. P. 320–373. URL: <http://www.ijtrd.com/papers/IJTRD22695.pdf>.
- Casacio C. A., Madsen L. S., Terrasson A. Quantum-enhanced nonlinear microscopy // *Nature*. 2021. Vol. 594, № 7862. P. 201–206. DOI: 10.1038/s41586-021-03528-w.
- Altman D. G., Bland J. M. Standard deviations and standard errors // *Bmj*. 2005. Vol. 331, № 7521. P. 903. DOI: 10.1136/bmj.331.7521.903.
- Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I. [et al.]. Multi-Area Method of a Depth Map Building with Gain Modulation in Active-Pulse Television Measuring Systems // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002872.
- Kapustin V. V., Zahlebin A. S., Movchan A. K. [et al.]. Experimental assessment of the distance measurement accuracy using the active-pulse television measuring system and a digital terrain model // *Computer Optics*. 2022. Vol. 46 (6). P. 948–954. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1114.

КАМЕНСКИЙ Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления, доцент кафедры цифрового телевидения Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), г. Томск. SPIN-код: 9572-4278
AuthorID (РИНЦ): 1057825
ORCID: 0000-0001-6587-7776
AuthorID (SCOPUS): 57191031758
Адрес для переписки: andru170@mail.ru

РЫЛОВ Кирилл Александрович, аспирант, ассистент кафедры телевидения и управления ТУСУР, г. Томск.
SPIN-код: 4436-9058
ORCID: 0009-0001-5936-535X
AuthorID (SCOPUS): 57214750784

БОРОДИНА Наталья, аспирант, ассистент кафедры телевидения и управления ТУСУР, г. Томск.
SPIN-код: 3701-2960
ORCID: 0000-0002-6134-9877
AuthorID (SCOPUS): 57815608800

Для цитирования

Каменский А. В., Рылов К. А., Бородина Н. Цифровой сглаживающий трапецидальный рекурсивно-сепарабельный фильтр обработки изображений с изменяемыми размерами сканирующей многоэлементной апертуры // *Омский научный вестник*. 2024. № 1 (189). С. 127–136. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-127-136.

Статья поступила в редакцию 11.09.2023 г.

© А. В. Каменский, К. А. Рылов, Н. Бородина

DIGITAL ANTI-ALIASING TRAPEZOIDAL RECURSIVELY SEPARABLE IMAGE PROCESSING FILTER WITH RESIZABLE SCANNING MULTI-ELEMENT APERTURE

The development of television systems is an important factor for many industries involved in the acquisition, processing, storage and transmission of images. Today, an urgent task in the use of such systems is to improve the quality of images obtained using digital photo and video cameras. To solve this problem, digital recursive-separable smoothing filters can be used. The paper describes the process of operation of the algorithm for changing the size of the scanning multi-element aperture of a smoothing trapezoidal recursive-separable filter for digital image processing. The results of evaluating its performance relative to the same algorithm implemented through classical two-dimensional convolution for various sizes of test images are presented. The influence of the aperture size of the developed filter on the change in the signal-to-noise ratio is assessed. The algorithm is implemented in the MATLAB computing environment.

Keywords: digital image processing, recursively separable filters, sharpening, quality assessment, performance.

Acknowledgments

The study is supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10200 at TUSUR.

References

1. Li Y., Ibanez-Guzman J. Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems // *EEE Signal Processing Magazine*. 2020. Vol. 37, no. 4. P. 50–61. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615. (In Engl.).
2. Loomis H. H., Sinha B. High-speed recursive digital filter realization // *Circuits, Systems and Signal Processing*. 1984. Vol. 3. P. 267–294. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01599077>. (In Engl.).
3. Yergaliyev S., Akhtar M. T. A Systematic Review on Distributed Arithmetic-based Hardware Implementation of Adaptive Digital Filters // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 85165–85183. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3304234. (In Engl.).
4. Tolmacheva A. S., Kamenskiy A. V., Tislenko A. A., Titov D. V. Primeneniye bystrodeystvuyushchikh rekursivno-separabel'nykh fil'trov dlya obrabotki zashumlennykh izobrazheniy [Application of high-speed recursively-separable filters for processing noisy images] // *Doklady TUSUR. Proceedings of TUSUR University*. 2023. Vol. 26, no. 1. P. 56–62. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-56-62. (In Russ.).
5. Kamenskiy A. V. High-speed recursive-separable image processing filters // *Computer Optics*. 2022. No. 46 (4). P. 659–665. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1063. (In Engl.).
6. Akaeva T. M., Kamenskiy A. V., Strumilova M. A. Bystrodeystvuyushchiy trapetseidal'nyy rekursivno-separabel'nyy fil'tr obrabotki izobrazheniy [Recursive-separable filter image enhancement] // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya. Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2023. No. 1. P. 138–145. (In Russ.).
7. Moler C., Little J. A history of MATLAB // *Proceedings of the ACM on Programming Languages*. 2020. Vol. 4, no. 81. P. 1–67. DOI: 10.1145/3386331. (In Engl.).
8. Bister M., Yap C. S., Ng K. H. [et al.]. Increasing the speed of medical image processing in Matlab // *Biomedical Imaging and Intervention Journal*. 2007. Vol. 3, no. 1. DOI: 10.2349/bij.3.1.e9. (In Engl.).
9. C. E. F. do Amaral, Alves R. F., M. J. da Silva [et al.]. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013. Vol. 33. P. 257–264. DOI: 0.1016/j.flowmeasinst.2013.07.006. (In Engl.).
10. Ghosh A. K., Ansari A. A. To Analysis and Implement Image De-Noising Using Fuzzy and Wiener Filter in Wavelet Domain // *International Journal of Trend in Research and Development*. 2021. Vol. 8, no. 3. P. 320–373. URL: <http://www.ijtrd.com/papers/IJTRD22695.pdf>. (In Engl.).
11. Casacio C. A., Madsen L. S., Terrason A. Quantum-enhanced nonlinear microscopy // *Nature*. 2021. Vol. 594, no. 7862. P. 201–206. DOI: 10.1038/s41586-021-03528-w. (In Engl.).
12. Altman D. G., Bland J. M. Standard deviations and standard errors // *Bmj*. 2005. Vol. 331, no. 7521. P. 903. DOI: 10.1136/bmj.331.7521.903. (In Engl.).

13. Movchan A. K., Kapustin V. V., Kuryachiy M. I. [et al.]. Multi-Area Method of a Depth Map Building with Gain Modulation in Active-Pulse Television Measuring Systems // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002872. (In Engl.).

14. Kapustin V. V., Zahlebin A. S., Movchan A. K. [et al.]. Experimental assessment of the distance measurement accuracy using the active-pulse television measuring system and a digital terrain model // Computer Optics. 2022. Vol. 46 (6). P. 948–954. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1114. (In Engl.).

KAMENSKIY Andrey Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Television and Management Department, Associate Professor of Digital Television Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk.

SPIN-code: 9572-4278

AuthorID (RSCI): 1057825

ORCID ID: 0000-0001-6587-7776

AuthorID (SCOPUS): 57191031758

Correspondence address: andru170@mail.ru

RYLOV Kirill Aleksandrovich, Graduate Student, Assistant of Television and Management Department, TUSUR, Tomsk.

SPIN-code: 4436-9058

ORCID: 0009-0001-5936-535X

AuthorID (SCOPUS): 57214750784

BORODINA Natalya, Graduate Student, Assistant of Television and Management Department, TUSUR, Tomsk.

SPIN-code: 3701-2960

ORCID: 0000-0002-6134-9877

AuthorID (SCOPUS): 57815608800

For citations

Kamenskiy A. V., Rylov K. A., Borodina N. Digital anti-aliasing trapezoidal recursively separable image processing filter with resizable scanning multi-element aperture // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 127–136. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-127-136.

Received September 11, 2023.

© A. V. Kamenskiy, K. A. Rylov, N. Borodina

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