

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

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАУЧНЫЙ

2024

№ 2 (190)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издается с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 2 (190) 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.omgту/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgту.ru/general_information/media.omgту/journal_of_omsk_research_journal/)

Подписной индекс
в каталоге Роспечать 83597

Ответственный секретарь
М. Ф. Федорчук

Редактор
Т. П. Семина

Компьютерная верстка
О. Н. Чирун

Макет обложки
В. С. Гуринов

© Редакция журнала
«Омский научный вестник», ОмГТУ

Подписано в печать 10.06.2024 г.
Дата выхода в свет 20.06.2024 г.

Формат 60x84 1/8.
19,76 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 15
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

№ 2 (190) 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
PII № TY55-00559 from 06.10.2017
issued by the Federal Service for
Supervision of Communications,
Information Technology,
and Mass Media, Omsk region

Journal Website:
<https://journals.omgtu.ru>

Journal Page on Founder's Website:
[http://www.omgtu.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgtu.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 10.06.2024
Date of Publication 20.06.2024

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 19,76
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 15
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 Isifovich, 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

Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявский. Исследование упругопластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее гибке с учетом эффекта пружинения	5
В. Ю. Юрков, Е. Ю. Долгова, М. А. Чижик. Геометрическая модель прогнозирования свойств систем с интервальными параметрами	15
Е. С. Гебель, А. Ю. Попов, И. Н. Дроздов. Привод подачи режущего инструмента фрезерного станка для обработки вафельного фона	21
И. Ю. Лесняк, З. Н. Соколовский, М. А. Фёдорова, С. В. Гавриленко, А. Ю. Казаков, В. Е. Коновалов. Проблема оценки выносливости элементов корпуса низколетящих орбитальных объектов	29
А. В. Князев, Ю. Ю. Черемухина. Разработка показателей оценки эффективности системы мониторинга процесса разработки документов по стандартизации с применением информационных технологий	37
В. С. Пономарева, О. В. Хомутская. Исследование технологии производства как фактора, влияющего на время цикла сборки изделия	43
Д. Н. Журавлев, А. И. Боровков. Разработка методики учета температурной зависимости свойств материалов при моделировании изнашивания быстровращающейся опорной пары типа «игла-подпятник»	50

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Л. А. Паюк, Н. А. Воронина, А. Д. Умурзакова, Е. Е. Лазуткина, К. В. Хацевский. Система управления микроклиматом тепличного комплекса на базе нечёткой логики	59
В. Т. Сидорова, С. В. Волков, А. И. Орлов. Метод оптимизации размещения компенсирующих и симметрирующих устройств в электрических сетях низкого напряжения	69
Д. Ю. Руди, А. И. Антонов, А. А. Руппель, Е. Ю. Руппель, Т. В. Шитик. Применение методологической базы исследования для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения	77
Д. А. Давыдов, М. А. Холмов, К. И. Никитин, М. Я. Клецель. Способ построения защиты линии с применением стандарта МЭК 61850 на примере микропроцессорного терминала Sepam серии 1000+	87

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

С. В. Бирюков, А. В. Тюкин, Л. В. Тюкина. Разработка нового метода измерения напряженности электрического поля на основе двоянного электроиндукционного датчика	99
И. В. Богачков. Определение разновидностей оптических волокон и ранняя диагностика их физического состояния на основе анализа характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна	107
В. И. Глухов, Л. Г. Варепо. Единая система отсчета геометрических характеристик размерных элементов деталей. Часть II. Геометрические характеристики цилиндрических элементов деталей	117
В. Ш. Сулаберидзе, А. А. Неклюдова. Анализ стабильности и вариативности метрологической характеристики (коэффициента преобразования) вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных	126
М. И. Бойчук. Исследование кварцевых резонаторов в миниатюрных металлокерамических корпусах с целью дальнейшего применения в термокомпенсированных генераторах	135
А. Н. Ляшук, П. И. Пузырёв, С. А. Завьялов. Разработка и исследование структуры цифрового измерителя частоты для системы мгновенного измерения частоты	144
Е. С. Климанова. Определение модуля деформации бинарного композита с помощью искусственной нейронной сети	153
Д. Ю. Кутовой, Р. И. Ганиев, М. Л. Шустрова, В. Б. Явкин, В. А. Фафурин. Экспериментальное исследование применимости методик определения коэффициента сжимаемости природного газа в области низких температур	163

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

D. I. Chernyavsky, D. D. Chernyavsky. Study of elastoplastic bending of sheet blank of different thickness at its bending taking into account the springing effect	5
V. Yu. Yurkov, E. Yu. Dolgova, M. A. Chizhik. The geometric predictive model of properties for systems with interval parameters	15
E. S. Gebel, A. Yu. Popov, I. N. Drozdov. Cutting tool feed drive of wafer background milling machine	21
I. Yu. Lesnyak, Z. N. Sokolovsky, M. A. Fedorova, S. V. Gavrilenko, A. Yu. Kazakov, V. E. Konovalov. The problem of assessing endurance of hull elements of low-flying orbital objects	29
A. V. Knyazev, Yu. Yu. Cheremukhina. Development of indicators for evaluating the effectiveness of the monitoring system for development of standardization documents using information technology	37
V. S. Ponomareva, O. V. Khomutskaya. Research of production technology as a factor influencing the time of the product assembly cycle	43
D. N. Zhuravlyov, A. I. Borovkov. Development of a methodology taking into account the temperature dependence of material properties in simulation of wear in fast-rotating pivot jewel bearing support	50

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

L. A. Payuk, N. A. Voronina, A. D. Umurzakova, E. E. Lazutkina, K. V. Khatsevskiy. Greenhouse climate control system based on fuzzy logic	59
V. T. Sidorova, S. V. Volkov, A. I. Orlov. The method for optimizing the placement of compensating and balancing devices in low voltage electrical networks	69
D. Yu. Rudi, A. I. Antonov, A. A. Ruppel, E. Yu. Ruppel, T. V. Shitik. The use of the methodological base of the study to determine the conduction of low-frequency electromagnetic interference according to the coefficient of the n -th harmonic component of the voltage	77
D. A. Davydov, M. A. Kholmov, K. I. Nikitin, M. Ya. Kletsel. The method of line protection construction with application of IEC 61850 standard on the example of Sepam 1000+ series microprocessor terminal	87

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

S. V. Biryukov, A. V. Tyukin, L. V. Tyukina. Development of a new method for measuring the electric field strength based on a dual electro-induction sensor	99
I. V. Bogachkov. Determination of optical fiber varieties and early diagnosis of their physical condition based on the analysis of Mandelstam – Brillouin backscatter parameters	107
V. I. Glukhov, L. G. Varepo. Unified reference system for geometric characteristics dimensional elements of details. Part II. Geometric characteristics of cylindrical elements of parts	117
V. Sh. Sulaberidze, A. A. Neklyudova. The analysis of stability and variability of metrological characteristic (conversion coefficient) of glass capillary reference viscometers	126
M. I. Boychuk. Study for quartz resonators in miniature metal-ceramic package for further use in temperature-compensated oscillators	135
A. N. Lyashuk, P. I. Puzyrev, S. A. Zavyalov. Development and research of the structure of a digital frequency meter for an instantaneous frequency measurement system	144
E. S. Klimanova. Determination of the deformation modulus of binary composite using artificial neural network	153
D. Yu. Kutovoy, R. I. Ganiev, M. L. Shustrova, V. B. Yavkin, V. A. Fafurin. Experimental verification of the applicability of methods for calculating the compressibility factor of natural gas at low temperatures	163

УДК 629.78
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14
EDN: VQZRG1

Д. И. ЧЕРНЯВСКИЙ
Д. Д. ЧЕРНЯВСКИЙ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ИЗГИБА ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ЕЕ ГИБКЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ПРУЖИНЕНИЯ

В работе проводится анализ технологического процесса гибки листовой заготовки для формообразования деталей из листового металла и профилей. Анализ проведен на основе прочностных расчетов упругопластического изгиба металлической пластины. При прессовании такой пластины на практике наблюдается эффект пружинения, когда изогнутая заготовка изменяет свою форму под действием остаточных упругих деформаций при окончании технологического процесса прессования. Для компенсации эффекта пружинения необходимо определять величины упругих и пластических деформаций в листовой заготовке. В работе рассмотрена методика расчёта данных величин на основе имеющихся экспериментальных работ. Сделаны выводы и приведены практические рекомендации, которые можно использовать в процессе настройки технологических параметров прессования листовых заготовок.

Ключевые слова: листовые металлические заготовки, упругие и пластические деформации, энергия формирования упругих и пластических деформаций, технологические параметры прессования, эффект пружинения.

Введение. В настоящее время основным направлением развития современной промышленности является производство новой техники при использовании прогрессивных технологических приемов. Вопросы, связанные с удешевлением продукции, также актуальны в современных условиях. Поэтому технологии обработки металлов давлением широко используются при изготовлении машин и механизмов.

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с изготовлением тонкостенных деталей методом гибки на специализированных гибочных станках. Такие детали, изготовленные из профилированного и листового металла, широко применяются в авиации и ракетной технике, автомобилестроении и других отраслях промышленности.

Использование технологий обработки металлов давлением ведет к повышению автоматизации технологических процессов машиностроительного производства, удешевлению массового производства изделий, а также и к другим положительным факторам.

Однако применение данных технологических методов требует серьезного научно-технического обоснования. В работе [1] Лизин В. Т. и Пяткин В. А. рассмотрели особенности проектирования и оптимизации тонкостенных силовых конструкций; устойчивость гладких и сложнопрофильных цилиндрических и конических сжатых оболочек; а также и другие проблемы, связанные с прочностью тонкостенных конструкций.

Обозначения в формулах

Символы	Описание	Размерность
F	Сила прижатия пуансона к заготовке	Н
a	Координата точки приложения силы F	м
z	Текущая координата поперечного сечения заготовки, рис. 5	м
l	Расстояние опорами листовой заготовки в матрице	м
M_{\max}	Максимальный изгибающий момент в листовой заготовке	Нм
z_0	Координата опасного сечения заготовки	м
$\sigma_{\text{упр}}$	Величина напряжений при изгибе листовой заготовки	МПа
$M(z)$	Текущий изгибающий момент в листовой заготовке	Нм
W_x	Осевой момент сопротивления	м ³
L	Длина изгиба листа заготовки	м
h	Толщина листовой заготовки	м
$W_{\text{пла}}$	Осевой момент сопротивления площади поперечного сечения заготовки длиной L при пластических деформациях.	м ³
$\sigma_{\text{пл}}$	Предел пропорциональности материала	МПа
$Y(z)$	Уравнение поперечного изгиба заготовки, рис. 5	м
$f(z)$	Уравнение прогиба заготовки, рис. 5	м
E_1, E_2	Модуль Юнга	МПа
J_x	Момент инерции	м ⁴
χ	Коэффициент, связывающий величины a и l	—
ξ	Коэффициент, связывающий величины z и l	—
A_{Σ}	Общая энергия формоизменения заготовки	Дж
$A_{\text{упр}}$	Энергия упругих деформаций при формоизменении заготовки	Дж
$A_{\text{пласт}}$	Энергия пластических деформаций при формоизменении заготовки	Дж
$n_{\text{упр}}$	Относительная энергия упругих деформаций	—
$n_{\text{пласт}}$	Относительная энергия пластических деформаций	—
ΔA_{Σ}	Дополнительная общая энергия для компенсации эффекта пружинения при формоизменении листовой заготовки	Дж
$\Delta A_{\text{пласт}}$	Дополнительная энергия пластических деформаций для компенсации эффекта пружинения	Дж
$\sigma_{\text{в}}$	Предел прочности (временное сопротивление) материала	МПа
μ	Коэффициент Пуассона материала листовой заготовки	—
$n-n$	Текущее сечение заготовки, рис. 5	—
C	Углерод	—
Mn	Марганец	—
Cr	Хром	—
W	Вольфрам	—
V	Ванадий	—
HRC	Твердость по шкале Роквелла	—
F_{\max}	Величина максимальной силы деформации материала, полученная в результате обработки диаграмм, рис. 6	Н
R	Коэффициент детерминации. Максимальное значение — 1	—
ΔF_{\max}	Увеличение максимальной силы деформации материала для компенсации эффекта пружинения	Н

В работах [2, 3] Лысов М. И. и Сосов Н. В. обобщают различные исследования научных и технологических проблем, связанных с изготовлением тонкостенных деталей на основе теории пластичности. Подробно рассмотрены методики расчетов параметров оборудования и оснастки для существующих технологий гибки металлических листовых и профильных заготовок.

В публикациях [4–7] авторы предоставляют сведения о материалах, применяемых в машиностроении; некоторые данные о физико-механической сущности пластической и упругой деформаций; информацию о технологических режимах гибки; а также и других знаниях об обработке металлов давлением. В статьях [8–13] авторы рассматривают отдельные вопросы, связанные с напряженно-деформируемым состоянием материала при гибке; процессами формирования упругих деформаций при гибке и причинах, вызывающих эффект пружинения, а также и другие проблемы, возникающие в процессе формообразующих операций листовой штамповки.

Данная работа является продолжением публикации [12]. Обозначения физических величин, принятые в данной статье, приведены в табл. 1.

Постановка задачи. Для увеличения жесткости металлических конструкций и отдельных деталей широко применяются составные элементы различной конфигурации, изготовленные из изогнутого металлического листа: уголок гнутый, S- и Z-образные профили, коробчатые конструкции и т.д.

Гибка листового металла производится на гидравлических прессах разнообразной конструкции. Полоса металла укладывается на нижний стол прессы, на котором находится матрица заданной формы. Под действием гидравлического давления пуансон (пуансоны) приближается к полосе металла. После контакта пуансона с листом металла, за счет увеличения силы гидравлического давления, металл в зоне контакта начинает упруго и далее пластически деформироваться для получения заданного угла изгиба путем вдавливания в матрицу. Все слои металла, которые располагаются в зоне контакта вдоль оси изгиба остаются неизменными. Поэтому все прочностные и технологические расчеты гибки проводятся с ориентировкой на данные слои металла. Во многих случаях готовая деталь формируется за счет нескольких технологических операций гибки с применением специализированных для данных операций пуансонов и матриц. Как правило, в массовом производстве используют листы металла толщиной до 10 мм и длиной до 6 м (рис. 1–3).

В процессе гибки листа (полосы) металла формируется так называемый «**эффект пружинения**». При изгибе металлического листового материала под действием пластических деформаций лист превращается в заданный профиль, который задан угломгиба плоского металлического листа. Однако после снятия давления пуансона в зонегиба листа остаются остаточные упругие деформации, которые изменяют сформированный первоначально угол сгиба заготовки. Тем самым полученная продукция становится дефектной и требует либо доработки, либо списания в утиль. Величина такого угла пружинения зависит от многих факторов. В данной публикации рассматривается методика учета эффекта пружинения на основе определения соотношения между энергиями упругих и пластических деформаций, возникающих в металле заготовки.



Рис. 1. Гибка листового металла на гидравлическом прессе

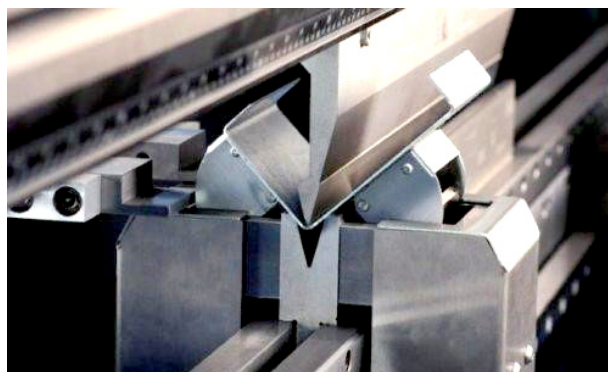


Рис. 2. Получение детали сложной формы за счет применения нескольких технологических операций прессования

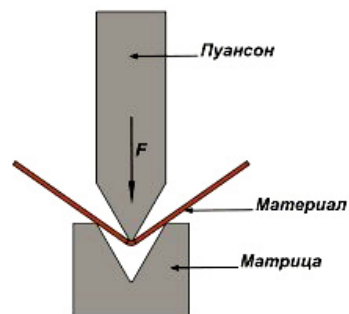


Рис. 3. Условная схема прессования металлического листа

Теория. Для решения поставленной задачи рассмотрим две стадии технологического процесса гибки листовой металлической заготовки.

На первой стадии технологического процесса гибка осуществляется в пределах закона Гука, т.е. в зоне сгиба формируются только упругие деформации, зависящие от величины контактных напряжений, возникающих в результате давления формообразующей поверхности пуансона на поверхность листовой заготовки (рис. 4, 5).

На второй стадии гибки начинают формироваться пластические деформации. В итоге действующая со стороны пуансона сила возрастает до постоянной величины. Листовая заготовка смещается

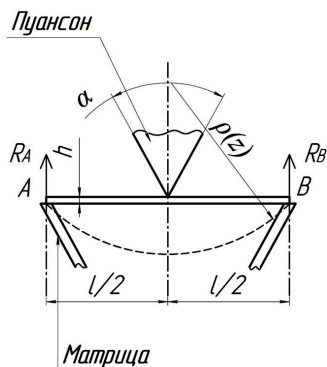


Рис. 4. Расчетная схема гибки металлического листа

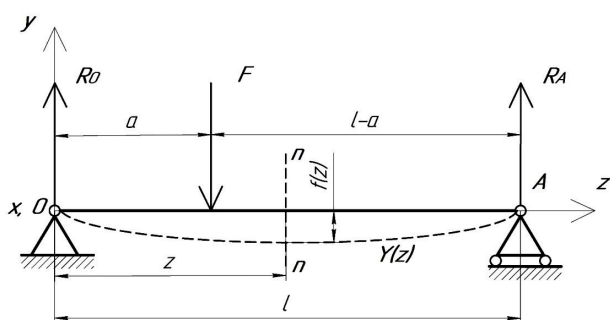


Рис. 5. Схема силового расчета изгиба листовой металлической заготовки

до упора в поверхность матрицы за счет пластического течения металла в зоне сгиба.

Для того чтобы определить силу прессования F , используем расчетную схему, приведенную на рис. 5.

Как известно, максимальный прогиб листа $f(z)$ будет в зоне действия изгибающей силы F , т.е. координата опасного сечения z_0 и величина максимального изгибающего момента M_{\max} будут определяться:

$$z_0 = a, M_{\max} = F \frac{a(l-a)}{l}. \quad (1)$$

На основании формулы Навье получим выражения:

$$\sigma_{\text{упр}} = \frac{M(z)}{W_x}, \quad (2)$$

$$W_x = \frac{Lh^2}{6}. \quad (3)$$

В работе [3] приведено следующее утверждение.

«...В теории обработки металлов давлением, с целью упрощения расчетов, вводится допущение Прандтля, при котором в диаграмме напряжения — деформации ($\sigma - \varepsilon$) участок прямой, выражающий закон Гука, непосредственно переходит в горизонтальную прямую без плавного перехода. Таким образом допускается равенство между пределами пропорциональности и текучести. Длина горизонтального участка диаграммы не ограничивается, т.е. материал считается идеально пластичным, не упрочняющимся. Такая диаграмма называется диаграммой Прандтля.

Замена реальных диаграмм напряжения — деформации схематизированной диаграммой Прандтля допустима для стали, сплавов на основе меди и алюминия, а также для материалов, имеющих диаграммы с ограниченной длиной площадки текучести...» [3].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при увеличении контактного давления в зоне сгиба упругие деформации меняются на пластические. При достижении определенного соотношения между пластическими и упругими деформациями угол изгиба листовой заготовки будет увеличиваться при постоянной силе (изгибающем моменте).

«...В данной зоне формируется, так называемый пластический шарнир. Пластический момент сопротивления данного сечения определяется следующим выражением...» [14]:

$$W_{\text{на}} = \frac{Lh^2}{4}. \quad (4)$$

Определим значения действующей силы F с учетом выражений (1), (2) и (4).

$$F = \frac{\sigma_{\text{ну}} l}{a(l-a)} \frac{Lh^2}{4}. \quad (5)$$

Рассмотрим уравнения поперечного изгиба $Y(z)$ и максимального прогиба $f(z)$ нейтральной линии заготовки [14].

Для условия $0 \leq z \leq a$ получим следующее выражение:

$$Y(z) = \frac{Fa^2(l-a)^2}{6EJ_x l} \left[2 \frac{z}{a} + \frac{z}{l-a} - \frac{z^3}{a^2(l-a)} \right]. \quad (6)$$

Для условия $a \leq z \leq l$ получим выражение вида:

$$Y(z) = \frac{Fa^2(l-a)^2}{6EJ_x l} \left[2 \frac{l-z}{l-a} + \frac{l-z}{a} - \frac{(l-z)^3}{a(l-a)^2} \right]. \quad (7)$$

Величина максимального прогиба заготовки $f(z)$ будет определена следующим выражением [14]:

$$f(z) = \frac{Fa^2(l-a)^2}{3EJ_x l} \text{ при } z = a. \quad (8)$$

Для дальнейшего анализа целесообразно выразить величины a и z в выражении (8) через величину l . Для этого введем следующее выражение.

$$a = \chi l, \text{ при условии } 0 \leq \chi \leq 1. \quad (9)$$

Тогда выражения (5) и (8) можно переписать в следующем виде:

$$F = \frac{\sigma_{\text{ну}}}{l\chi(1-\chi)} \frac{Lh^2}{4}. \quad (10)$$

$$f(z) = \frac{F(\chi l)^2(l-\chi l)^2}{3EJ_x l} \text{ при } z = \chi l. \quad (11)$$

С учетом выражения (10) запишем уравнение (11).

$$f(z) = \frac{\sigma_{\text{ну}} Lh^2}{4} \frac{l^2}{3EJ_x} \chi(1-\chi). \quad (12)$$

Для расчета компенсации эффекта пружинения используем такой физический показатель, как «энергия». Известно, «...что работа, совершаемая силой над телом, равна произведению величины данной силы на пройденное телом расстояние...». В рассматриваемой задаче технологический процесс гибки осуществляется за счет того, что пуансон посредством силы F давит на заготовку, и она изгибается. Величину данного прогиба обозначим через значение функцию $f(z)$, уравнение (12). Тогда энергия, затраченная на изгиб листа заготовки, равна:

$$dA_{\Sigma} = Fdf(z). \quad (13)$$

$$dA_{\Sigma} = \frac{\sigma_{ну}^2 L^2 h^4 I}{48EJ_x} \left(\frac{1}{\chi(1-\chi)} - \frac{2}{1-\chi} \right) d(\chi). \quad (14)$$

Интегрируя выражение (14), получим уравнение (15) [15].

$$A_{\Sigma} = \frac{\sigma_{ну}^2 L^2 h^4 I}{48EJ_x} [\ln \chi(1-\chi)]. \quad (15)$$

С учетом граничных условий, постоянная интегрирования C будет равна нулю.

Для проведения дальнейших расчетов необходимо составить баланс энергии, суммарная величина которой определена выражением (15). Примем допущение, что вся энергия, необходимая для получения изменения формы листовой заготовки, состоит из энергий упругих и пластических деформаций. Такое допущение может иметь место, так как силовая нагрузка прессования является статической. При динамической нагрузке (ударе) необходимо будет учитывать кинетическую энергию отскока индентора, а также энергию формирования продольных волн и поверхностных волн Рэлея.

$$\frac{A_{упр}}{A_{\Sigma}} + \frac{A_{пласт}}{A_{\Sigma}} = 1. \quad (16)$$

Введем обозначения $\frac{A_{упр}}{A_{\Sigma}} = n_{упр}$ и $\frac{A_{пласт}}{A_{\Sigma}} = n_{пласт}$.

Для компенсации эффекта пружинения необходимо увеличить величину энергии пластических деформаций, формирующихся в зоне сгиба листовой заготовки.

$$\frac{A_{упр} + \Delta A_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} + \frac{A_{пласт} + \Delta A_{пласт}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = 1. \quad (17)$$

Главным условием является то, что дополнительная энергия пластических деформаций должна быть равна энергии упругих деформаций, вызывающих эффект пружинения — $A_{пласт} = A_{упр} = A_{\Sigma} n_{упр}$.

$$\frac{A_{упр} + \Delta A_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} + \frac{A_{пласт} + A_{\Sigma} n_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = 1. \quad (18)$$

Введем допущение, что при малом увеличении энергии деформации $A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}$ соотношение между энергиями упругих и пластических деформаций не меняется. Тогда запишем следующее выражение:

$$\frac{A_{пласт} + A_{\Sigma} n_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = n_{пласт}, \quad \frac{A_{пласт}}{A_{\Sigma}} = n_{пласт}. \quad (19)$$

$$\frac{A_{\Sigma} n_{пласт} + A_{\Sigma} n_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = n_{пласт}. \quad (20)$$

Преобразуем выражение (20).

$$\Delta A_{\Sigma} = A_{\Sigma} \frac{(1 - n_{пласт})}{n_{пласт}}. \quad (21)$$

$$A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma} = A_{\Sigma} \left[1 + \frac{(1 - n_{пласт})}{n_{пласт}} \right] = \frac{A_{\Sigma}}{n_{пласт}}. \quad (22)$$

Как следует из уравнения (22), для расчета эффекта пружинения необходимо знать величину соотношения между энергиями упругих и пластических деформаций в обрабатываемой заготовке.

Результаты теоретических исследований. В работе [16] описаны экспериментальные результаты, связанные со статическим внедрением конических инденторов из частично отожженной инструментальной стали в стержни из того же материала (рис. 6). Характеристики частично отожженной инструментальной стали следующие: $E - 2,041 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_{тн} - 937,7$ МПа, $\sigma_b - 1245$ МПа, $\mu - 0,286$, HRC — 17–32. Содержание легирующих элементов: C — 0,90 %, Mn — 1,20 %, Cr — 0,50 %, W — 0,50 %, V — 0,20 %.

Все графики, описывающие зависимости «Внедрение — сила» и представленные на рис. 6, были оцифрованы на основе применения компьютерных программ «Compas» и «MathCad». Множество точек данных графиков получали индивидуальные координаты по соответствующим осям δ (сближение) и F (сила). Далее производилась обработка дискретных экспериментальных данных методом интерполяции (рис. 7). Полученные интерполяционные функции приведены в табл. 2. После обработки данных функций получены результаты, приведенные в табл. 3.

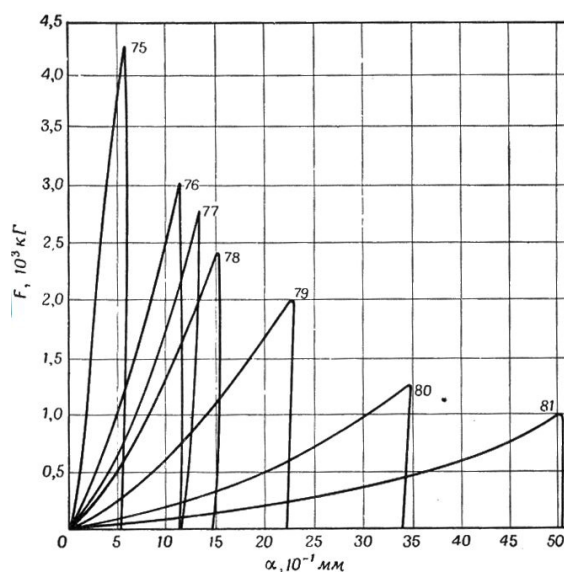


Рис. 6. «...Зависимости сила-глубина внедрения для случаев внедрения индентора из отожженной инструментальной стали с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине по заготовке из того же материала твердостью HRC — 13,7...», [16, с. 195] Номера графиков и величины углов α при вершине конусов соответствуют: 75–160°, 76–120°, 77–90°, 78–80°, 79–60°, 80–40°, 81–20°

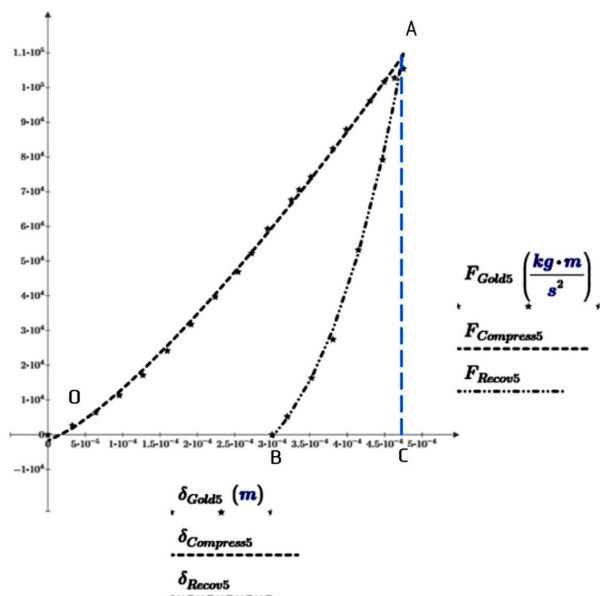


Рис. 7. Пример методики интерполяционного расчета общей энергии деформации, а также энергии упругих деформаций. Опыт № 75

На основании этих данных выведены интерполяционные выражения (23, 24), а также построены графики на рис. 8 и 9.

$$n_{\text{пласт}} = 0,248 \sin(\alpha + 1,08) + 0,716, R = 0,98, \quad (23)$$

$$n_{\text{пласт}} = 0,248 \sin(\alpha^\circ + 61,88^\circ) + 0,716.$$

$$F_{\text{max}} = 1,312 \cdot 10^4 \alpha^{0,98} + 5,068 \cdot 10^3 \text{ Н}, R = 0,979. \quad (24)$$

Аналогично, по материалам работы [16] для конического индентора с головной частью $\alpha = 20$ градусов, было получено выражение (25).

$$n_{\text{пласт}} = 0,0715 \sin(F_{\text{max}} + 1,94) + 0,883, \quad R = 0,992. \quad (25)$$

Результаты практических исследований. Таким образом, для расчета параметров гибки листовой заготовки с учетом эффекта пружинения необходимо вычислить выражения (10), (15), (22) и (25).

Рассмотрим пример такого расчета с учетом следующих параметров: $\sigma_{\text{нц}} = 937,7$ МПа; $L = 1$ м; $l = 0,2$ м; $h = 0,003$ м; $\chi = 0,5$; $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ Па.

$$F_{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{нц}} L h^2}{l \chi (1 - \chi) 4} = 42,197 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

$$J_x = \frac{L h^3}{12} = 2,25 \cdot 0,003^{-9} \text{ м}^4,$$

$$n_{\text{пласт}} = 0,0715 \sin(F_{\text{max}} + 1,94) + 0,883 = 0,921,$$

Таблица 2

Интерполяционные зависимости при взаимодействии индентора из отожжённой инструментальной стали с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине с заготовкой из того же материала (рис. 6)

Номер опыта	Угол при вершине конуса α° (рад)	Зависимость сила – глубина внедрения для первой половины взаимодействия (сжатие)	Зависимость сила – глубина внедрения для второй половины взаимодействия (разгрузка)
75	160 (2,793)	$F_{\text{Compress75}} = 2,795 \cdot 10^8 \delta^{1,186} - 209,94$	$F_{\text{Recov75}} = 3,741 \cdot 10^{11} \delta^{2,126} - 1,288 \cdot 10^4$
76	120 (2,094)	$F_{\text{Compress76}} = 8,88 \cdot 10^7 \delta^{1,18} - 376,84$	$F_{\text{Recov76}} = 1,44 \cdot 10^{18} \delta^{4,55} - 3,37 \cdot 10^4$
77	90 (1,571)	$F_{\text{Compress77}} = 2,94 \cdot 10^8 \delta^{1,41} + 203,17$	$F_{\text{Recov77}} = 3,01 \cdot 10^{48} \delta^{15,38} + 1,61 \cdot 10^3$
78	80 (1,396)	$F_{\text{Compress78}} = 1,93 \cdot 10^8 \delta^{1,39} + 58,57$	$F_{\text{Recov78}} = 1,47 \cdot 10^{13} \delta^{2,09} - 1,86 \cdot 10^5$
79	60 (1,047)	$F_{\text{Compress79}} = 1,59 \cdot 10^8 \delta^{1,48} + 215,79$	$F_{\text{Recov79}} = 8,84 \cdot 10^8 \delta^{1,25} - 4,37 \cdot 10^5$
80	40 (0,698)	$F_{\text{Compress80}} = 2,24 \cdot 10^8 \delta^{1,74} + 334,89$	$F_{\text{Recov80}} = 7,37 \cdot 10^6 \delta^{0,08} - 4,68 \cdot 10^6$
81	20 (0,349)	$F_{\text{Compress81}} = 1,01 \cdot 10^9 \delta^{2,19} + 476,55$	$F_{\text{Recov81}} = 1,34 \cdot 10^8 \delta^{0,61} - 5,33 \cdot 10^6$

Таблица 3

Силовые и энергетические характеристики взаимодействия индентора из отожжённой инструментальной стали с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине с заготовкой из того же материала

№ опыта	Максимальная сила — F , кН	Остаточное сближение — δ , мм	Энергия упругих деформаций — $A_{\text{упр}}$, Дж	Энергия пластических деформаций — $A_{\text{пласт}}$, Дж	Относительная энергия упругих деформаций $n_{\text{упр}} = A_{\text{упр}} / A_{\Sigma}$	Относительная энергия пластических деформаций $n_{\text{пласт}} = A_{\text{пласт}} / A_{\Sigma}$
75	41,76	0,292	5,534	6,353	0,466	0,532
76	29,53	0,924	3,917	11,596	0,252	0,747
77	27,03	1,105	2,746	11,990	0,186	0,814
78	23,77	1,492	2,070	14,165	0,128	0,872
79	19,78	2,223	1,512	15,360	0,089	0,909
80	12,56	3,390	0,825	15,887	0,049	0,951
81	10,202	5,043	0,364	16,677	0,021	0,978

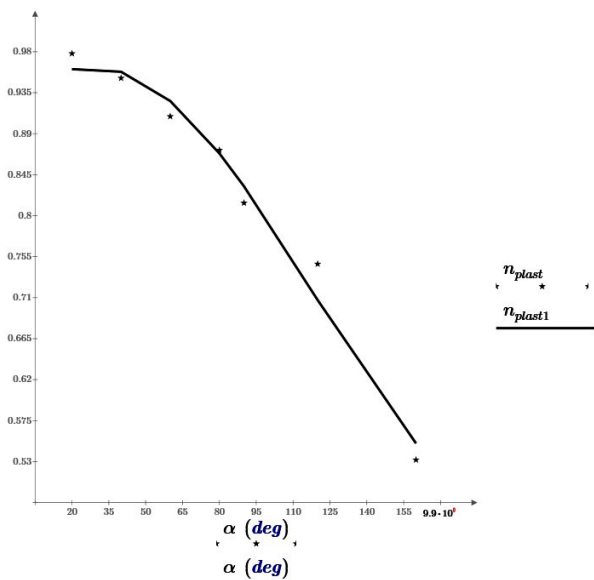


Рис. 8. График зависимости относительной энергии пластических деформаций n_{plast} от угла α при вершине головной части индентора

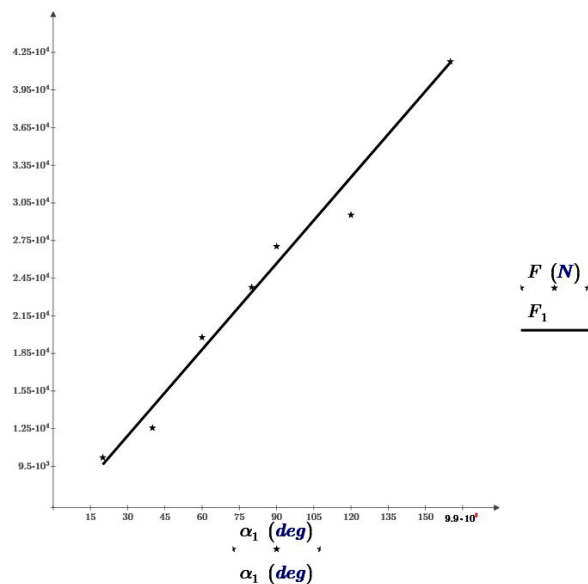


Рис. 9. График зависимости максимальной силы F деформации заготовки от угла α при вершине головной части индентора

$$A_{\Sigma} = \frac{\sigma_{nu}^2 L^2 h^4 I}{48 E J_x} [\ln \chi(1 - \chi)] = 887,58 \text{ Дж} ,$$

$$A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma} = \frac{A_{\Sigma}}{n_{plast}} = 963,21 \text{ Дж} .$$

Увеличение требуемой силы деформации можно определить по следующему выражению:

$$\begin{aligned} \frac{F_{max} + \Delta F_{max}}{A_{\Sigma}} &= \frac{12 E J_x}{\sigma_{nu} L h^2 I^2 \chi(1 - \chi) [\ln \chi(1 - \chi)]} = \\ &= 45,792 \cdot 10^3 \text{ Н} . \end{aligned}$$

Таким образом, для компенсации эффекта пружинения необходимо увеличить силу F_{max} до 45,792 кН.

Выводы и заключение

1. По результатам работы получены аналитические зависимости о взаимосвязи формирующихся в листовой заготовке упругих и пластических деформаций. На основании данных зависимостей определена методика расчета усилий прессования листовой металлической заготовки с учетом эффекта пружинения.

2. По результатам анализа интерполяционных характеристик можно сделать вывод о зависимости величины соотношения пластических и упругих деформаций в листовой заготовке от значений углов заострения конических инденторов. Чем меньше угол при вершине конуса, тем больше величина пластических деформаций в листовой заготовке.

Библиографический список

- Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1994. 380 с. ISBN 5-217-02379-1.
- Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. Москва: Машиностроение, 1966. 236 с.

- Лысов М. И., Сосов Н. В. Формообразование деталей гибкой. Москва: Машиностроение, 2001. 388 с. ISBN 5-217-03105-0.

- Schuler. Metal forming handbook. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. 573 p. ISBN 3-540-61185-1.

- Banabic D. Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming // ESAFORM Bookseries on Material Forming. Springer Cham, 2016. 416 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44070-58.

- Бурдуковский В. Г. Технология листовой штамповки. Екатеринбург: Изд-во Уральского у-та, 2019. 224 с. ISBN 978-5-7996-2569-6.

- Китаева Д. А., Пазылов Ш. Т., Рудаев Я. И. Температурно-скоростное деформирование алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57, № 2. С. 182 – 189. DOI: 10.15372/PMTF20160219.

- William F. Hosford, Robert M. Caddell. Metall Forming. Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press, 2007. 328 p. ISBN 978-0-511-35453-3.

- Rott O., Hömberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Preprint. No. 1151. Berlin: WIAS, 2006. 23 p.

- Ibaraki S., Shimizu T. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes // Precision Engineering. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 675–682. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001.

- Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование динамических характеристик удара двух твердых деформируемых тел при скорости удара до 100 м/с // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-5-14. EDN: BBYONG.

- Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование уругопластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее вальцевании // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54.

- Матвеев А. С. Справочник кузнеца. Москва: Машиностроение, 2011. 357 с. ISBN 978-5-94275-579-9.

- Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с. ISBN 5-12-000299-4.

- Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 608 с. ISBN 978-5-8114-0906-8.

16. Гольдсмит В. Удар и контактные явления при средних скоростях. Физика быстропротекающих процессов. В 3 т. Москва: Мир, 1971. Т. 2. С. 151–201.

ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Машиноведение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8610-2957

AuthorID (РИНЦ): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

AuthorID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

Адрес для переписки: dichernyavskiy@omgtu.tech

ЧЕРНЯВСКИЙ Даниил Дмитриевич, студент гр. ФИТ-201 факультета информационных технологий и компьютерных систем ОмГТУ, г. Омск.

Для цитирования

Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование упруго-пластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее гибке с учетом эффекта пружинения // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14.

Статья поступила в редакцию 15.11.2023 г.

© Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявский

STUDY OF ELASTOPLASTIC BENDING OF SHEET BLANK OF DIFFERENT THICKNESS AT ITS BENDING TAKING INTO ACCOUNT THE SPRINGING EFFECT

The work analyzes the process of bending the sheet work piece to obtain shaping of sheet metal parts and profiles. The analysis is carried out on the basis of strength calculations of elastoplastic bending of the metal plate. When pressing such a plate, in practice, a spring effect is observed when the curved blank changes its shape under the influence of residual elastic deformations at the end of the pressing process. To compensate for the spring effect, it is necessary to determine the values of elastic and plastic deformations in the sheet blank. The work considers the method of calculation of these values on the basis of available experimental works. Conclusions have been drawn and practical recommendations can be used in the process of setting process parameters for pressing sheet blanks.

Keywords: sheet metal blanks, elastic and plastic deformations, energy of formation of elastic and plastic deformations, technological parameters of pressing, springing effect.

References

1. Lizin V. T., Pyatkin V. A. *Proyektirovaniye tonkostennykh konstruktsey* [Design of thin-walled structures]. 3rd ed. Moscow, 1994. 380 p. ISBN 5-217-02379-1. (In Russ.).
2. Lysov M. I. *Teoriya i raschet protsessov izgotovleniya detaley metodami gibki* [Theory and calculation of processes for manufacturing parts using bending methods]. Moscow, 1966. 236 p. (In Russ.).
3. Lysov M. I., Sosov N. V. *Formoobrazovaniye detaley gibkoy* [Formation of flexible parts]. Moscow, 2001. 388 p. ISBN 5-217-03105-0. (In Russ.).
4. Schuler. *Metal forming handbook*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. 563 p. ISBN 3-540-61185-1. (In Engl.).
5. Banabic D. *Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming* // ESAFORM Bookseries on Material Forming. Springer Cham, 2016. 416 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44070-58. (In Engl.).
6. Burdukovskiy V. G. *Tekhnologiya listovoy shtampovki* [Sheet stamping technology]. Ekaterinburg, 2019. 224 p. ISBN 978-5-7996-2569-6. (In Russ.).
7. Kitayeva D. A., Pazylov Sh. T., Rudayev Ya. I. *Temperaturno-skorostnoye deformirovaniye alyuminiyevykh splavov* [Temperature-speed deformation of aluminum alloys] // *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 57, no. 2. P. 182–189. DOI: 10.15372/PMTF20160219. (In Russ.).
8. William F. Hosford, Robert M. Caddell. *Metall Forming. Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, 2007. 328 p. ISBN 978-0-511-35453-3. (In Engl.).
9. Rott O., Hömberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Preprint. No. 1151. Berlin, 2006. 23 p. (In Engl.).
10. Ibaraki S., Shimizu T. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes // *Precision Engineering*. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 675–682. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001. (In Engl.).
11. Chernyavskiy D. I., Chernyavskiy D. D. *Issledovaniye dinamicheskikh kharakteristik udara do 100 m/s* [Study of dynamic characteristics of impact of two solid deformable bodies at impact speed of up to 100 m/s] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 5 (179). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-5-14. EDN: BBYOHG. (In Russ.).
12. Chernyavskiy D. I., Chernyavskiy D. D. *Issledovaniye uprugo-plasticheskogo izgiba listovoy zagotovki razlichnoy tolschchiny pri eye val'tsevanii* [Study elastoplastic bending of a sheet blank of different thickness while rolling] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54. (In Russ.).
13. Matveyev A. S. *Spravochnik kuznetsa* [Blacksmith's Handbook]. Moscow, 2011. 357 p. ISBN 978-5-94275-579-9. (In Russ.).
14. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveyev V. V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of Strength of Materials]. 2th ed. Kyiv, 1988. 736 p. ISBN 5-12-000299-4. (In Russ.).
15. Bronshteyn I. N., Semendyayev K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and college students]. Saint Petersburg, 2010. 608 p. ISBN 978-5-8114-0906-8. (In Russ.).
16. Gol'dsmit V. *Udar i kontaktnyye yavleniya pri srednikh skorostyakh* [Fizika bystroprotekayushchikh protsessov. Impact

and contact phenomena at medium speeds. Physics of fast processes]. In 3 vols. Moscow, 1971. Vol. 2. P. 151–201. (In Russ.).

CHERNYAVSKY Dmitry Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Mechanical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 8610-2957

AuthorID (RSCI): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

AuthorID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

Correspondence address: dichernyavskiy@omgtu.tech

CHERNYAVSKY Daniil Dmitrievich, Student gr. ФИТ-201 of Information Technologies and Computer Systems Faculty, OmSTU, Omsk.

For citations

Chernyavsky D. I., Chernyavsky D. D. Study of elastoplastic bending of sheet blank of different thickness at its bending taking into account the springing effect // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14.

Received November 15, 2023.

© D. I. Chernyavsky, D. D. Chernyavsky

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ СИСТЕМ С ИНТЕРВАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Описывается интервальный подход к геометрическому моделированию сложных многопараметрических систем с неопределенными, взаимно зависимыми и разнотипными параметрами. Информационный базис систем предполагается неполным, а получение полного информационного базиса связано с технологическими трудностями. Параметры системы могут быть непрерывными, дискретными и условными. Геометрическая модель строится в виде матрицы, каждый элемент которой соответствует определенному состоянию системы. Каждое состояние описывается интервальной функцией, связывающей непрерывные входные и выходные параметры. Множество интервальных функций образует дискретное семейство непрерывных поверхностей в дискретном пространстве параметров. Описанный подход и алгоритм моделирования применен к построению модели прогнозирования свойств драпируемости тканей. В качестве примера построена интервальная модель зависимости показателя драпируемости от таких характеристик ткани, как вид нити, вид переплетения, сырьевой состав и поверхностная плотность.

Ключевые слова: геометрическая модель, интервальный анализ, прогнозирование, текстильные материалы, драпируемость.

Введение. В практике геометрического моделирования сложных систем встречаются случаи, когда построение модели стандартными методами статистического анализа и планирования эксперимента либо трудно, либо вообще невозможно. Причиной этого является даже не число внешних и внутренних факторов, влияющих на состояние системы, а отсутствие физической возможности управлять значениями факторов.

Кроме того, построению модели системы препятствует сложная структура взаимной зависимости факторов и неопределенность их величин [1]. Единственный путь изучения и построения модели — это пассивное наблюдение и регистрация параметров системы при её случайных состояниях. В этой ситуации нельзя заранее предположить вид зависимости выходной величины от входных факторов, т. е. структурное моделирование гиперповерхности отклика невозможно. Не имеет смысла проводить общее параметрическое моделирование регрессионным анализом ввиду короткой выборки и наличия многочисленных неучтенных факторов.

В настоящее время развиваются и широко используются методы интервального моделирования и интервального анализа сложных систем [2–7]. В данной работе предлагается подход к изучению и моделированию таких систем, включающий элементы интервального анализа, комбинаторной топологии и структурного моделирования. В результате

предлагается формировать кусочно-непрерывные интервальные гиперповерхности отклика, объединенные в дискретное семейство, которое позволяет прогнозировать значения выходного параметра в некотором промежутке значений входных параметров.

Постановка задачи. Рассматривается многопараметрическая система с формальным описанием $[y] = f(x_1, \dots, x_n, a_1, \dots, a_m)$, где x_i — входные параметры; a_j — коэффициенты математической модели. Пусть характер входных параметров таков, что их можно отнести к разного типа данным, а именно: x_1, \dots, x_s — непрерывные параметры, имеющие конкретный физический смысл; x_{s+1}, \dots, x_t — дискретные параметры, имеющие физический смысл; x_{t+1}, \dots, x_n — интегральные условные параметры, объединяющие определенное множество характеристик системы и не имеющие физического смысла. К последним могут относиться, например, такие параметры, как класс, тип, категория и т. п. Некоторые из параметров могут иметь интервальный характер, т. е. могут определяться некоторой областью безразличия в смысле своего влияния на выходной параметр y . Интервальные параметры будут обозначаться в квадратных скобках, например, $[x] = [x^-, x^+]$, $[a] = [a^-, a^+]$.

Требуется найти математическую модель системы, позволяющую прогнозировать значения выходного параметра $[y]$ в заданной области изменения входных параметров. Интервальный характер дан-

ных позволяет максимально упростить структуру и параметрическую размерность модели.

Идентификация адекватной математической модели такой системы при условии, что все зависимости от непрерывных параметров линейные, потребовала бы для получения полного информационного базиса системы не менее $(s + 1)(t - s)(n - t)$ экспериментальных данных, полученных по определенному плану. Такая модель была бы интерполяционной и для решения задач прогнозирования была бы непригодна. Сглаживающая модель потребовала бы не менее $(s + s')(t - s)(n - t)$, $s' > 1$ данных. Нелинейные зависимости потребовали бы еще большего числа экспериментов.

Учитывая, что для множества систем активный эксперимент невозможен, а возможно только пассивное накопление данных, изображающееся бессистемным распределением точек в пространстве параметров и не обеспечивающее получения полного информационного базиса, то задача построения модели такой системы становится неопределенной. Будем считать эту неопределенность интервальной.

Общий алгоритм. Пусть входные параметры x_i изменяются непрерывно в промежутках от x_i^{\min} до x_i^{\max} . Дискретные входные параметры изменяются от x_i^{\min} до x_i^{\max} с шагом Δx_i . Условные параметры изменяются шагом $\Delta x_i = 1$. Структуру модели можно представить в виде матрицы \mathbf{M} размерности $n - s$ с числом элементов, равным произведению чисел дискретных параметров системы. Каждому элементу матрицы соответствует некоторая s -мерная поверхность $f(x_1, \dots, x_s)$.

При неполном информационном базисе часть элементов матрицы \mathbf{M} окажется пустой, часть элементов может представлять собой точку n -мерного пространства параметров. Может оказаться, что некоторым элементам будут соответствовать конечные множества точек, мощности которых слишком малы для того, чтобы аналитически описать s -мерные поверхности, соответствующие таким элементам. И, наконец, части элементов могут соответствовать множеству точек, мощности которых достаточно для построения частной аналитической модели s -мерной поверхности какого-либо порядка.

Какой-либо закономерности в расположении всех этих элементов матрицы \mathbf{M} может не наблюдаться (хаотичное облако точек в пространстве параметров). Следовательно, возникает задача поиска такого расположения элементов в матрице, которое было бы оптимальным относительно исследуемого свойства системы. То есть упорядочение элементов по структуре и параметрам частных моделей при одних и тех же данных позволяло бы получить наиболее простую общую модель.

Общий алгоритм построения математической модели описанной системы может быть следующим.

Шаг 1. Все множество точек исходной информации делится на три подмножества:

- подмножество \mathbf{M}_M элементов, соответствующих множествам точек, по которым строятся частные модели;
- подмножество \mathbf{M}_H элементов, соответствующих точкам, по которым проверяется адекватность общей модели;
- подмножество \mathbf{M}_0 пустых элементов (т. е. всякие данные о системе с соответствующими параметрами отсутствуют).

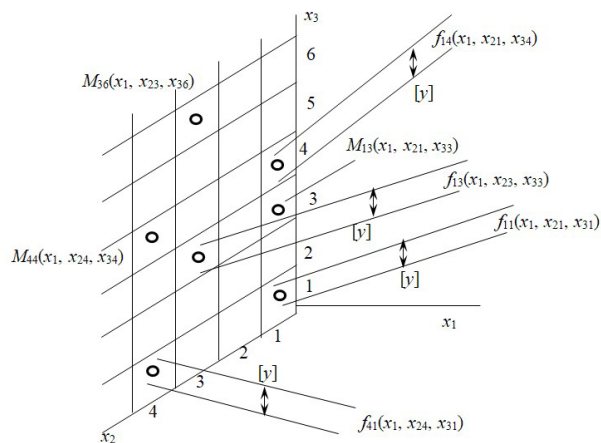


Рис. 1. Схема геометрической модели для $\mathbf{M}(4 \times 6)$, $\mathbf{M}_M = \{M_{11}, M_{14}, M_{33}, M_{41}\}$, $\mathbf{M}_H = \{M_{13}, M_{36}, M_{44}\}$

Шаг 2. Для каждого элемента множества \mathbf{M}_M строится интервальная s -мерная полоса шириной $[y]$. Интервальный характер выходного параметра $[y]$ позволяет найти для каждого элемента частную модель, удовлетворяющую единственному условию — график её должен быть вписан в полосу $[y]$. Следовательно, порядок модели может быть выбран минимальным. В «идеальном» случае все частные модели могут быть линейными. Естественно, что никакой закономерности в значении коэффициентов частных моделей может не наблюдаться. Такой случай схематически изображен на рис. 1, где $s = 1$, $t = 2$, $n = 3$, $\mathbf{M}(4 \times 6)$, $\mathbf{M}_M = \{M_{11}, M_{14}, M_{33}, M_{41}\}$, $\mathbf{M}_H = \{M_{13}, M_{36}, M_{44}\}$.

Шаг 3. Перестановка элементов матрицы с целью упорядочения значений одноименных коэффициентов частных моделей. Упорядочиваются коэффициенты при старших членах, а значения остальных могут предварительно изменяться, что не противоречит интервальному характеру частных моделей.

Шаг 4. Построение симплицальной аппроксимации множества \mathbf{M}_M и дополнение множества \mathbf{M}_M теми элементами \mathbf{M}_H и \mathbf{M}_0 матрицы \mathbf{M} , которые попадают в какой-либо симплекс аппроксимации. Обозначим множество таких элементов \mathbf{M}_A . Признаком включения элемента во множество \mathbf{M}_A являются положительные барицентрические координаты этого элемента в каком-либо симплексе. Множество элементов матрицы, которые остались не включенными в \mathbf{M}_A , является множеством, на котором реализуются алгоритмы экстраполяции.

Шаг 5. Основываясь на гипотезе, согласно которой симплицальная аппроксимация множества \mathbf{M}_M индуцирует аналогичные симплицальные аппроксимации на множествах одноименных коэффициентов частных моделей, определяются уравнения s -мерных поверхностей, соответствующих элементам множества \mathbf{M}_A .

Шаг 6. Проверка адекватности общей построенной модели. Она заключается в сравнении данных, соответствующих элементам \mathbf{M}_H с данными, вычисленными по частным аналитическим моделям, полученным в результате симплицальной аппроксимации и соответствующим этим же элементам множества \mathbf{M}_H .

Шаг 7. Экстраполяция построенной общей аналитической модели на множество элементов \mathbf{M} — $(\mathbf{M}_M + \mathbf{M}_A)$. Экстраполяция считается удовлетво-

рительной, если для всех элементов множества M_{II} разница значений не будет превышать $[y]/2$.

Реализация алгоритма. Приложением описанной выше модели и алгоритма моделирования явилось изучение свойств текстильных материалов, которые можно охарактеризовать как сложные системы с неопределенными параметрами. Одним из таких свойств является драпируемость — формообразующее свойство текстильных материалов, влияющее на внешний вид, стиль, силуэтную форму изделия. Для создания строгих жестких форм требуются материалы с минимальным значением коэффициента драпируемости (например, равным нулю). Для гибких — с максимальным.

В настоящее время отсутствуют стандартные методы определения драпируемости. Анализ литературы показал, что достаточно большое количество работ посвящено разработке приборов и методов оценки коэффициента драпируемости [8, 9]. Существуют работы по прогнозированию показателя драпируемости, основанному на исследовании таких свойств, как жесткость при изгибе, вес ткани, толщина ткани, жесткость при сдвиге и пр. [10, 11]. Все такие методы требуют проведения испытаний по разработанным планам, наличия специального оборудования, сопровождаются разрушением образцов.

Актуальной задачей является разработка метода прогнозирования драпируемости, позволяющего по известным характеристикам материала предсказать значение показателя драпируемости без исследования его свойств.

Предварительные исследования позволили отобрать характеристики материалов, оказывающие наибольшее влияние на драпируемость. К ним относятся: вид материала (ткань или трикотаж), вид нитей, поверхностная плотность/толщина, сырьевой состав [12].

В работе в качестве объектов исследования были выбраны тканые материалы различной структуры и с различными характеристиками. Всего было изучено 42 случайно выбранных образца тканей. Драпируемость определялась дисковым методом. Значение показателя драпируемости выражалось интервальным числом в процентах (интервал неопределенности составил 10 %). Для удобства неопределенные факторы были классифицированы и закодированы следующим образом:

— вид нити: 1 — пряжа, 2 — креповая нить хотя бы в одной системе, 3 — любая нить, кроме креповой, 4 — сочетание нити и пряжи, 5 — монопить, 6 — смесь нити и пряжи;

— сырьевой состав ткани: 1 — хлопок, 2 — лен, 3 — шерсть, 4 — шелк, 5 — вискозоподобные, 6 — синтетические и ацетатные, 7 — смешанные с преобладанием синтетических, 8 — смешанные с преобладанием натуральных и/или вискозных, 9 — смешанные с одинаковым содержанием синтетических и натуральных волокон;

— вид переплетения: 1 — саржевое, 2 — полотняное, 3 — атласное, 4 — креповое, 5 — мелкоузорчатое, 6 — жаккард, 7 — комбинированное.

Таким образом, структура геометрической модели имеет вид матрицы $M(6 \times 9 \times 7)$, в которой переменные: x_1 — поверхностная плотность ($\times 10^{-1}$), $x_2 = \{1, \dots, 6\}$ — вид нити, $x_3 = \{1, \dots, 9\}$ — состав ткани, $x_4 = \{1, \dots, 7\}$ — вид переплетения. Имеющиеся данные распределены следующим образом: $M_A = \{M_{A1}(1, 1, 1) — 6 точек, M_{A2}(6, 9, 1) — 4 точки, M_{A3}(6, 7, 1) — 3 точки\}$, $M_{II} = \{(1, 5, 1) — 1 точка,$

$(1, 6, 1) — 2 точки, (6, 7, 1) — 3 точки, (6, 8, 1) — 2 точки, (2, 6, 1) — 1 точка\}$. Эти данные позволяют построить две частные интервальные модели зависимости показателя драпируемости от указанных факторов:

$$[y] = -0,92x_1 + [48] — \text{для } M_{A1}, [y] = -0,3x_1 + [41] — \text{для } M_{A2}.$$

Общую интервальную модель для $x_4 = 1$ получили в виде

$$[y] = ([-0,0005 \dots 0,0037]x_2x_3 + [0,04 \dots 0,06]x_2 + [0,024 \dots 0,04]x_3 - [0,99 \dots 1,02])x_110^{-1} - 0,0015x_2x_3 - [0,57 \dots 0,77]x_2 - [0,36 \dots 0,48]x_3 + [48,94 \dots 49,01].$$

Для значений $x_4 = \{2, \dots, 7\}$ множество M_A пусто, а множество M_{II} состоит из 14 элементов.

Закключение. Не имея в своем распоряжении достаточного объема данных, мы можем строить прогнозирующую модель, используя априорную информацию. Каждая новая ткань, классифицированная по указанным параметрам, будет дополнять построенную геометрическую модель частными интервальными зависимостями. Таким образом, мы постепенно перейдем от интервальной геометрической модели к прогностической.

Описанный подход позволяет строить дискретно-непрерывные геометрические модели в условиях неопределенной информации, которая характерна для большинства сложных систем.

Библиографический список

1. Дилигенский Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология: моногр. Москва: Машиностроение, 2004. 335 с. ISBN 5-473-00054-1.
2. Кумков С. И. Обработка экспериментальных данных ионной проводимости расплавленного электролита методами интервального анализа // Расплавы. 2010. № 3. С. 86–96. EDN: MKJTIL.
3. Воцинин А. П. Интервальный анализ данных: развитие и перспективы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68, № 1. С. 118–126.
4. Недосекин А. О., Абдулаева З. И., Александров С. В. Нечеткая параболическая регрессия экспериментальных данных с малой выборкой // Мягкие измерения и вычисления. 2019. № 7 (20). С. 39–46. EDN: ILGONS.
5. Левин В. И. Задача решения уравнения в интервальной постановке // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 2017. Т. 22, № 5. С. 1172–1178. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1172-1178. EDN: ZXGRMV.
6. Скибицкий Н. В. Построение прямых и обратных статистических характеристик объектов по интервальным данным // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1, Ч. 1. С. 87–98. EDN: XUYZGV.
7. Носков С. И., Врублевский И. П. Регрессионная модель динамики эксплуатационных показателей функционирования железнодорожного транспорта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 2. С. 192–197. EDN: WHDEAX.
8. Смирнова Н. А., Лапшин В. В., Замышляева В. В. [и др.]. Исследование и прогнозирование драпируемости костюмоплатевых чистольняных тканей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5 (395). С. 78–82.
9. Stylios G. K., Powell N. J. Engineering the drapability of textile fabrics // International Journal of Clothing Science and Technology. 2003. Vol. 15, no. 3/4. P. 211–217. DOI: 10.1108/09556220310478305. EDN: EAROAH.
10. Ghith A., Hamdi, T., Fayala F. Prediction of Drape Coefficient by Artificial Neural Network // Autex Research

Journal. 2015. Vol. 15, no. 4. P. 266–274. DOI: 10.1515/aut-2015-0045.

11. Jedda H., Ghith A., Sakli F. Prediction of fabric drape using FAST system // Journal of the Textile Institute. 2007. Vol. 98, no. 3. P. 219–225. DOI: 10.1080/00405000701463920.

12. Долгова Е. Ю., Чижик М. А., Найманханова Ж. М. [и др.]. Формирование обучающей выборки для создания цифровых двойников текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2021. Т. 53, № 3. С. 39–40. DOI: 10.46418/0021-3489_2021_53_03_09. EDN: XIFZJG.

ЮРКОВ Виктор Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Конструирование и технология изделий легкой промышленности» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2414-1438

AuthorID (РИНЦ): 173644

AuthorID (SCOPUS): 55857657200

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Адрес для переписки: viktor_yurkov@mail.ru

ДОЛГОВА Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Констру-

ирование и технология изделий легкой промышленности» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7645-1866

AuthorID (РИНЦ): 313287

AuthorID (SCOPUS): 57217115107

Адрес для переписки: dolgova13@rambler.ru

ЧИЖИК Маргарита Анатольевна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Конструирование и технология изделий легкой промышленности» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7582-7019

AuthorID (РИНЦ): 474040

AuthorID (SCOPUS): 13406046300

ORCID: 0000-0003-0797-875X

Адрес для переписки: margarita-chizhik@rambler.ru

Для цитирования

Юрков В. Ю., Долгова Е. Ю., Чижик М. А. Геометрическая модель прогнозирования свойств систем с интервальными параметрами // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 15–20. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-15-20.

Статья поступила в редакцию 26.10.2023 г.

© В. Ю. Юрков, Е. Ю. Долгова,

М. А. Чижик

THE GEOMETRIC PREDICTIVE MODEL OF PROPERTIES FOR SYSTEMS WITH INTERVAL PARAMETERS

We consider interval geometric modeling of complex multi parametric systems having a set of parameters of different character. Some of the parameters may have interval indefiniteness. System information basis is incomplete one. The processed information depends on continuous, discrete and conventional data. Geometric model has a form of matrix and each element of it corresponds to some state of the system. Each state is described by interval function of continuous input and output parameters. The set of interval functions generates some discrete set of multidimensional surfaces in discrete space. We use this approach and our modeling algorithm to find predictive model of drape coefficient. The algorithm is based on linear approximation of numerical factors in factor spaces. Interval functions make it possible for us to vary some numerical factors within the given intervals. As an example, the interval model of fabric drape coefficient is found. Fabric thickness and closeness of texture are considered as input parameters.

Keywords: geometric model, interval analyses, prediction, fabrics, drape coefficient.

References

1. Diligenskiy N. V. Nechetkoye modelirovaniye i mnogokriterial'naya optimizatsiya proizvodstvennykh sistem v usloviyakh neopredelennosti: tekhnologiya, ekonomika, ekologiya [Fuzzy modeling and multicriteria optimization of production systems under conditions of uncertainty: technology, economics, ecology]. Moscow, 2004. 335 p. ISBN 5-473-00054-1. (In Russ.).
2. Kumkov S. I. Obrabotka eksperimental'nykh dannykh ionnoy provodimosti rasplavlennoy elektrolita metodami interval'nogo analiza [Processing of experimental data on ionic conductivity of a molten electrolyte using interval analysis methods] // *Rasplavy. Melts*. 2010. No. 3. P. 86–96. EDN: MKJTIL. (In Russ.).
3. Voshchinin A. P. Interval'nyy analiz dannykh: razvitiye i perspektivy [Interval data analysis: development and prospects] // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2002. Vol. 68, no. 1. P. 118–126. (In Russ.).
4. Nedosekin A. O., Abdulayeva Z. I., Aleksandrov S. V. Nechetkaya parabolicheskaya regressiya eksperimental'nykh dannykh s maloy vyborkoy [Fuzzy parabolic regression of experimental data with a small sample] // *Myagkiye izmereniya i vychisleniya. Soft Measurements and Computing*. 2019. No. 7 (20). P. 39–46. EDN: ILGONS. (In Russ.).
5. Levin V. I. Zadacha resheniya uravneniya v interval'noy postanovke [Solution to equation in the interval arrangement] // *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki. Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2017. Vol. 22, no. 5. P. 1172–1178. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1172-1178. EDN: ZXGRMV. (In Russ.).
6. Skibitskiy N. V. Postroyeniye pryamykh i obratnykh staticheskikh kharakteristik ob'yektov po interval'nym dannym [Construction of direct and inverse static characteristics of the objects by interval data] // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2017. Vol. 83, no. 1, part 1. P. 87–98. EDN: XUYZGV. (In Russ.).
7. Noskov S. I., Vrublevskiy I. P. Regressionnaya model' dinamiki ekspluatatsionnykh pokazateley funktsionirovaniya zheleznodorozhnogo transporta [Railway transport functioning the regression model performance indicators dynamics] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2016. No. 2. P. 192–197. EDN: WHDEAX. (In Russ.).
8. Smirnova N. A., Lapshin V. V., Zamyshlyayeva V. V. [et al.]. Issledovaniye i prognozirovaniye drapiruyemosti kostyumno-plat'yevykh chistol'nyanykh tkaney [Drapery research and forecasting of costume and dress pure linen fabrics] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. No. 5 (395). P. 78–82. (In Russ.).
9. Stylios G. K., Powell N. J. Engineering the drapability of textile fabrics // *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2003. Vol. 15, no. 3/4. P. 211–217. DOI: 10.1108/09556220310478305. EDN: EAROAH. (In Engl.).
10. Ghith A., Hamdi T., Fayala F. Prediction of Drape Coefficient by Artificial Neural Network // *Autex Research Journal*. 2015. Vol. 15, no. 4. P. 266–274. DOI: 10.1515/aut-2015-0045. (In Engl.).
11. Jemma H., Ghith A., Sakli F. Prediction of fabric drape using FAST system // *Journal of the Textile Institute*. 2007. Vol. 98, no. 3. P. 219–225. DOI: 10.1080/00405000701463920. (In Engl.).
12. Dolgova E. Yu., Chizhik M. A., Naymankhanova Zh. M. [et al.]. Formirovaniye obuchayushchey vyborki dlya sozdaniya tsifrovyykh dvoynikov tekstil'nykh materialov [Formation of a training sample for creating digital doubles of textile materials] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti. The News of Higher Educational*



Institutions. Technology of Light Industry. 2021. Vol. 53, no. 3. P. 39–40. DOI: 10.46418/0021-3489_2021_53_03_09. EDN: XIFZJG. (In Russ.).

YURKOV Viktor Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Design and Technology of Light Industry Product Manufacture Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2414-1438

AuthorID (RSCI): 173644

AuthorID (SCOPUS): 55857657200

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Correspondence address: viktor_yurkov@mail.ru

DOLGOVA Elena Yuryevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Design and Technology of Light Industry Product Manufacture Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7645-1866

AuthorID (RSCI): 313287

AuthorID (SCOPUS): 57217115107

Correspondence address: dolgova13@rambler.ru

CHIZHIK Margarita Anatolyevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Design and Technology of Light Industry Product Manufacture Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7582-7019

AuthorID (RSCI): 474040

AuthorID (SCOPUS): 13406046300

ORCID: 0000-0003-0797-875X

Correspondence address: margarita-chizhik@rambler.ru

For citations

Yurkov V. Yu., Dolgova E. Yu., Chizhik M. A. The geometric predictive model of properties for systems with interval parameters // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 15–20. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-15-20.

Received October 26, 2023.

© V. Yu. Yurkov, E. Yu. Dolgova,
M. A. Chizhik

ПРИВОД ПОДАЧИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВАФЕЛЬНОГО ФОНА

В работе описан привод подачи режущего инструмента специального металлообрабатывающего станка. На основе анализа технологии фрезерования заданного регулярного рисунка вафельного фона и особенностей работы оборудования предложено заменить традиционную шарикоподшипниковую передачу в составе привода подачи режущего инструмента на плоский совмещенный кривошипно-ползунный механизм. Геометрические параметры рычажного передаточного механизма рассчитаны в соответствии с известными размерами регулярного рисунка ячейки и рекомендованным значением угла передачи движения. Анализ кинематических и силовых характеристик рычажного механизма позволил обосновать технические характеристики электродвигателя. Для реализации требуемого трапецеидального закона изменения скорости выходного звена решена обратная задача кинематики, получены численные значения мгновенной угловой скорости входного кривошипа и импульсные управляющие сигналы на серводвигатель.

Ключевые слова: привод подачи, кривошипно-ползунный механизм, закон движения, «особые» положения, сервопривод, система управления.

Введение. В авиационных и космических аппаратах вес конструкции является критическим фактором для увеличения массы полезного груза при неизменной мощности двигателей [1, 2]. Вафельные панели в конструкции корпусных деталей и в элементах обшивки перспективных образцов вышеуказанных образцах техники позволяют решить поставленную задачу. В топливных баках, отсеках ракет, корпусных деталях используется вафельная конструкция обечайки, выполненная из высокопрочных алюминиевых сплавов, что обеспечивает решение приоритетной задачи отрасли — увеличение полезной нагрузки за счет уменьшения массы ракетносителя. Трудоемкость технологии изготовления таких изделий вызвана сложностью обеспечения точности и совершенства формы ячеек из облегченных материалов при соблюдении оптимальной конструкции подкрепляющего набора ребер вафельного фона ортотропных оболочек и вафельных обечаек [2–5]. Широкое применение обечаек с вафельной конструкцией обусловлено тем, что эти изделия менее чувствительны к локальным вмятинам глубиной до половины высоты вафельной панели и обладают значительно большей несущей

способностью при осевом сжатии, чем равные им по весу гладкие [6].

Технология изготовления панелей с вафельным фоном за рубежом не существенно отличается по последовательности операций от отечественной. Отличие в производительности операций по изготовлению ячеек вафельного фона за счет повышения мощности приводов до сотен киловатт и повышения габаритов и стоимости оборудования. Этот путь повышения производительности дошел до пределов.

Анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы, посвященной металлорежущему оборудованию для выполнения фрезерной обработки вафельного фона показал, что основная проблема повышения производительности технологической операции заключается в скорости работы привода подачи режущего инструмента.

Традиционно для перемещения фрезы используется шариковинтовая передача, которая с учетом узкого интервала движения в габаритах ячейки быстро изнашивается, как следствие — снижается производительность и точность обработки. Сдерживающим фактором для увеличения произво-

дительности такого оборудования также является масса подвижных узлов привода подачи режущего инструмента. Перемещение массивной конструкции на больших скоростях приводит к появлению вибрации и ударов, как следствие — к снижению ресурса станка.

В работах [6–8] указано, что ограничения при получении вафельной конструкцией возникают, когда силы резания становятся эквивалентны силам деформации тонкостенных элементов. Причиной этого являются режимы резания и применение инструмента большого диаметра. Таким образом, требуется разработать привод подачи фрезерного станка для обработки типового элемента вафельной конструкции, чтобы обеспечить сохранение совершенства формы кармана и повышение производительности технологической операции.

Повышение производительности достигается за счет перехода на сверхскоростное фрезерование со скоростями подач более 40 м/мин и скоростей резания до 1000 м/мин. Это требует уменьшения веса движущихся частей привода и повышения его динамики. Силы резания на этих режимах снижаются в разы.

Новизной и практической новизной работы является:

1. Разработанная методика теоретического расчета и экспериментальной корректировки рациональных параметров закона движения привода подачи, включая участки разгона, торможения и равномерного перемещения и необходимой мощности синхронного двигателя

2. Достижение производительности фрезерования ячеек вафельного фона, за счет повышения скоростей подач, существенно выше по сравнению с лучшими мировыми образцами оборудования за счет применения в механизме подач станка привода на базе кривошипно-ползунного механизма с массой движущихся частей не более 300 Н, включая противовес. Компенсации динамических сил происходят внутри жесткой конструкции механизма.

Привод подачи фрезерного станка для обработки вафельных панелей. Листовой материал заготовки вафельной панели в процессе обработки с учетом ее массогабаритных размеров неподвижен, поэтому предъявляются высокие требования к точности позиционирования обрабатывающей головки. Привод подачи режущего инструмента специальных фрезерных станков для обработки вафельного фона имеет значительную массу, что оказывается сдерживающим фактором при высокоскоростной обработке, не позволяющим выйти на номинальные обороты на заданных габаритах ячейки. Традиционно в качестве исполнительного механизма привода подачи используется шариковинтовая передача, которая при движении в узком диапазоне быстро вырабатывает свой ресурс, как следствие — снижается точности обработки.

Для повышения производительности фрезерования вафельного фона предлагается использовать плоский совмещенный кривошипно-ползунный рычажный механизм (рис. 1), обеспечивающий возвратно-поступательное движение режущего инструмента в заданном диапазоне.

Повышение производительности фрезерной обработки вафельного фона в этом случае достигается за счет высокой скорости вертикального перемещения обрабатывающей головки до 40 м/мин (частота вращения шпинделя 40 000 об/мин). На указанной частоте за один проход фреза диаметром 10 мм сни-

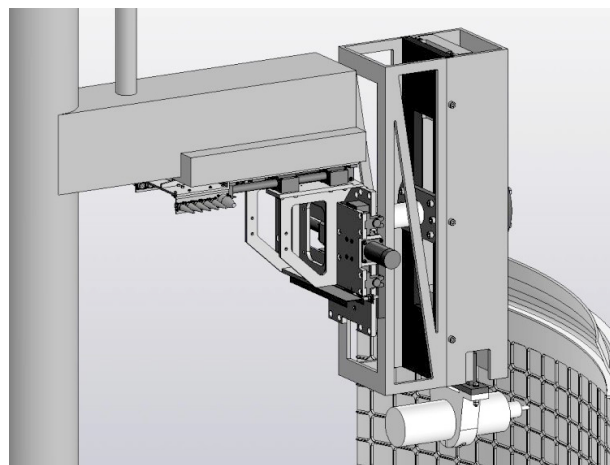


Рис. 1. Общий вид привода подачи фрезерного станка

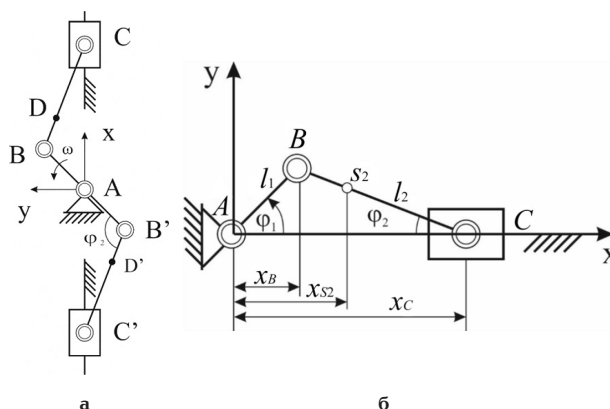


Рис. 2. Схема плоского совмещенного кривошипно-ползунного механизма а — совмещенный механизм, б — расчетная схема кинематического анализа:

φ_1 — обобщенная координата, т.е. угол поворота входного кривошипа AB (рад), φ_2 — угол поворота шатуна относительно оси Ax (рад)

мает слой металла в 1 мм с ячейки размерами 70×70 за 1 секунду (ход ползуна 60×60 мм). Таким образом, на обработку припуска в 12 мм потребуется 12 секунд.

Рычажный передаточный механизм привода подачи фрезерного станка для обработки вафельных панелей. Кривошипно-ползунные механизмы находят широкое применение в технике, например, в автомобильных двигателях внутреннего сгорания [9], в прессах [10–11], в промышленных роботах и установках [12] и в других механических системах для выполнения различных технологических операций.

Структурная схема плоского совмещенного кривошипно-ползунного механизма (рис. 2а) состоит из стойки A , сдвоенного кривошипа BAB' , двух шатунов BC и $B'C'$, двух ползунов C и C' , сопряженных одноподвижными кинематическими парами V класса. Несмотря на широкую известность данного механизма, его широкое применение в составе различных технических устройств порождает большое количество публикаций, посвященных вопросам синтеза, кинематического и динамического анализа [11–14]. Исходя из известных габаритных размеров ячейки вафельного фона, определены геометрические параметры совмещенного кривошипно-рычажного механизма: длина плеч сдвоенного

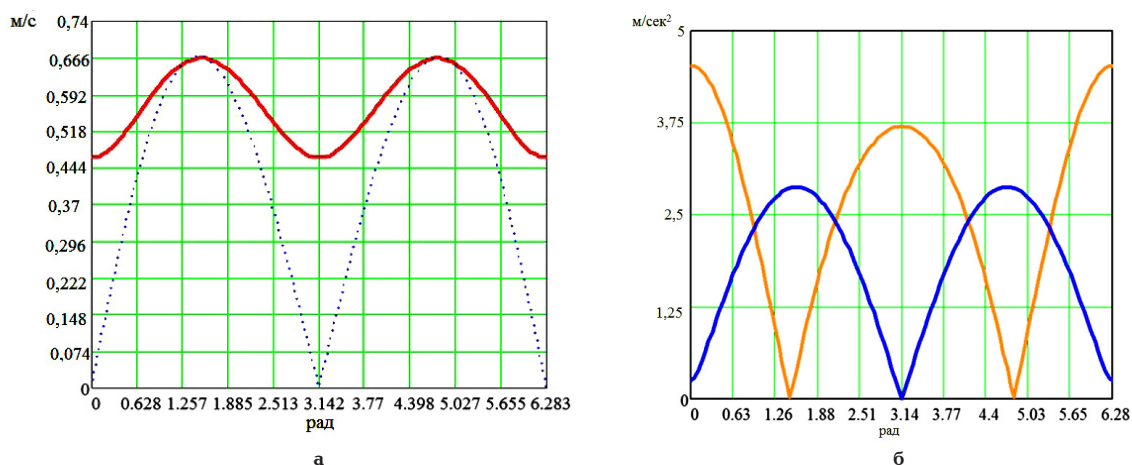


Рис. 3. Диаграммы изменения кинематических характеристик точек D и C звеньев кривошипно-ползунного механизма: а — абсолютные скорости (м/сек) С — D; б — абсолютные ускорения — С — D (м/сек²)

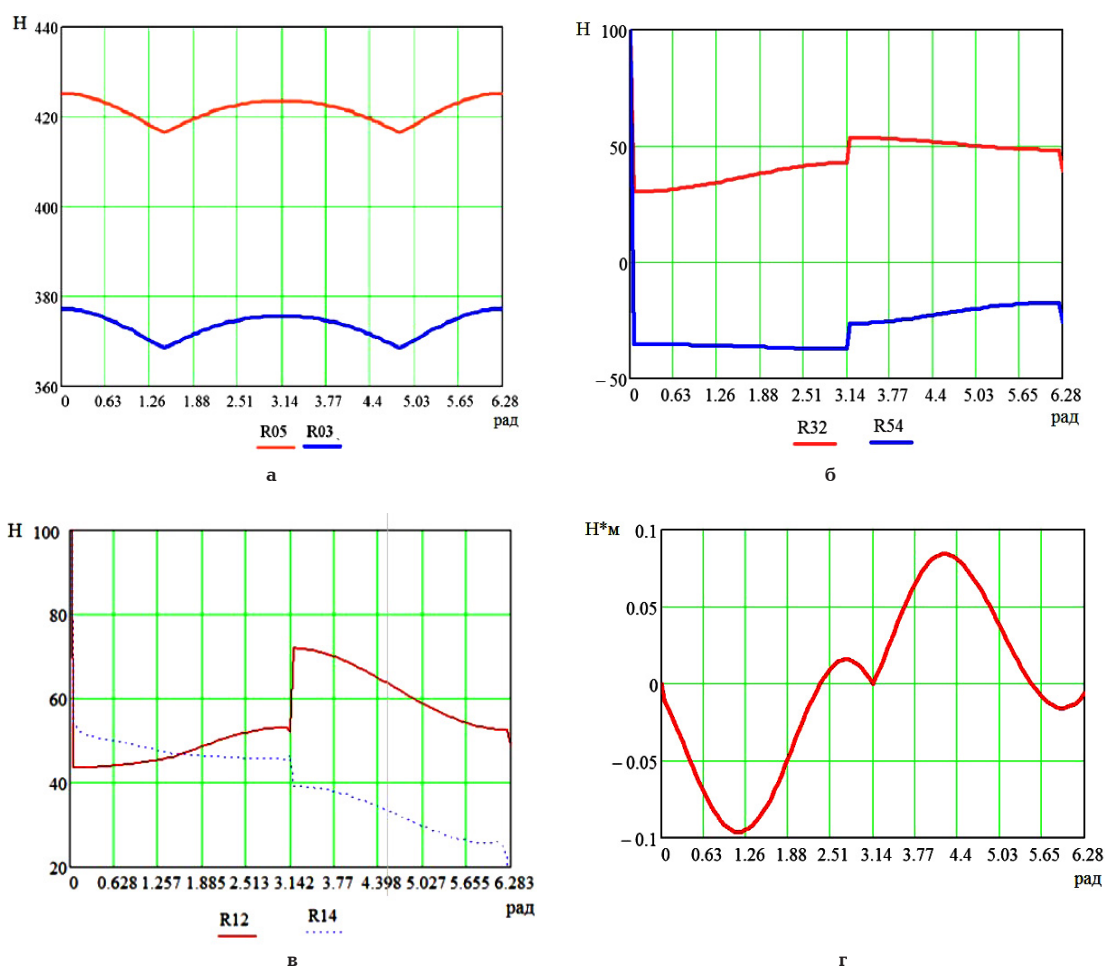


Рис. 4. Диаграммы изменения сил реакций (а-в) в подвижных сочленениях рычажного механизма и уравновешивающего момента (г)

кривошипа равна $r_{AB} = r_{AB'} = 30$ мм, длина шатунов составляет $L_{BC} = L_{B'C'} = 300$ мм, ползуны C и C' имеют размеры 240×200 мм. Для оценки реализации заданной функции перемещения выходного звена, режима его работы, передачи усилий разработаны соответствующие математические модели, на основе известных в теоретической механике и теории механизмов и машин методов. На первом этапе исследования рассматривался режим равномерного движения входного кривошипа AB с постоянной

угловой скоростью $\omega_1 = 200$ об/мин $\approx 20,944$ рад/с. Ввиду симметричности кинематических цепей ABC и AB'C' для анализа кинематики механизма необходимо и достаточно рассмотреть одну из них (рис. 26). Результаты вычислительных экспериментов в математическом пакете Mathcad представлены на рис. 3 и 4. Перемещение центра масс ползуна C за один цикл движения составляет требуемые 60 мм.

Известно, что в процессе движения кривошипно-ползунные механизмы проходят два особых

(сингулярных) положения [15], что приводит к резкому изменению кинематических характеристик, приводящих к затратам мощности на преодоление сопротивления перемещения. Из диаграмм изменения абсолютной скорости характерных точек D (центра масс шатуна BC) и C (центра масс ползуна C) кривошипно-ползунного механизма (рис. 3а) следует, что мгновенные остановки выходного звена происходят при φ_2 , где φ_2 — обобщенная координата (угол поворота кривошипа BAV' относительно оси Ax введенной неподвижной декартовой системы координат Axy).

Максимальная расчетная скорость точек C и D принята 0,66 м/сек, характер движения на участках разгона и торможения одинаковый. Кривые на рис. 3б соответствуют смене ускоренного и замедленного режимов движения ползуна C и шатуна BC . Максимальное ускорение ползуна в диапазоне начальный и конечный момент, т.е. для $\varphi_1 = 0$ рад или $\varphi_1 = 6,28$ рад, составляет 4,59 м/сек². Анализ условий передачи движения в плоском совмещенном кривошипно-ползунном механизме позволил оценить технические характеристики электродвигателя для обеспечения разгона до 40 м/мин на участке 5 мм, при массе движущихся частей 300 Н. Затраченная мощность должна быть в пределах 1 кВт и крутящий момент до 4 Н·м без учета потерь в механизме.

Кинестатический расчет выполнен с учетом допущения, что трение в подвижных сочленениях отсутствует за исключением движения выходного ползуна вдоль направляющих. Проектируемый привод подачи фрезерного станка перемещает электродвигатель обрабатывающей головки, в расчетной схеме на выходном ползуне C представлен полезной нагрузкой $\overline{G}_H = 20$ Н. Ее вес уравновешен на ползуне C' дополнительным грузом. Сила резания принята $\overline{N}_H = 50$ Н.

Численное решение задачи кинестатического анализа совмещенного кривошипно-ползунного механизма в «особых» (сингулярных) положениях отсутствует (на графиках на рис. 4 приняты произвольно большие значения — 100 Н, для реакций $\overline{R}_{12}, \overline{R}_{14}, \overline{R}_{32}, \overline{R}_{54}$). На практике происходит взрывной рост сил реакций в подвижных сочленениях, механизм преодолевает эти положения за счет инерции. Расчетная схема силового анализа механизма приведена на рис. 5.

Различие модулей реакций \overline{R}_{03} и \overline{R}_{05} (рис. 4а), возникающих между неподвижным основанием и ползунами C и C' , объясняется циклическим изменением характера сил тяжести и трения, которые в прямом направлении действуют как вредные, а в обратном — как полезные. Следует отметить, что «особые» положения наблюдаются в шарнирах C и C' (рис. 6б) и B и B' (рис. 6в), значение модулей которых не представляется оценить численно. Модуль уравновешивающего момента (рис. 6г) для исследуемого механизма составил 0,2 Н·м. Эта составляющая сил вызывает вибрации и удары при работе механизма. При повышении частоты вращения вала она увеличивается.

Системы автоматического управления электродвигателем привода подачи фрезерного станка для обработки вафельного фона. Традиционный подход к управлению рычажными передаточными механизмами предполагает, что скорость ведущего приводного звена постоянна, что неэффективно для предлагаемого привода подачи. На рис. 6 приведена структурная схема системы управления приводом

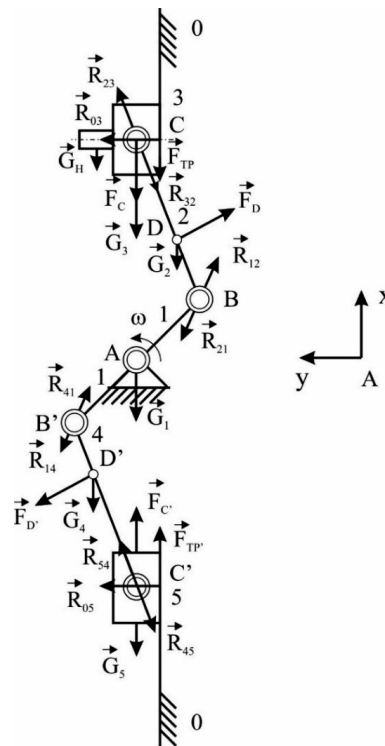


Рис. 5. Расчетная схема силового анализа

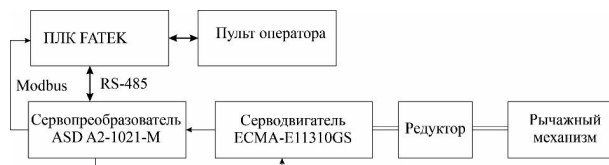


Рис. 6. Структурная схема системы управления приводом подачи

подач рычажного механизма, позволяющая изменять по заданному закону частоту вращения входного звена — асинхронного двигателя. Требуется реализовать трапецеидальный закон изменения скорости выходного ползуна C (привода подачи кривая 2 на рис. 7), т.е. уменьшить интервалы разгона и торможения, увеличив участок перемещения с постоянной скоростью перемещения на уровне $V_{заг} = 40$ м/мин, таким образом, синтезировать сложный закон изменения угловой скорости ведущего приводного звена.

В приводе подачи используется синхронный электродвигатель DELTA со встроенной обратной связью по скорости и положению. Модель ЕСМА-Е11310GS имеет следующие важные для предлагаемого технического решения привода подачи технические характеристики: дискретность углового положения вала двигателя — более миллиона на один оборот, диапазон угловой скорости — от 0 до 6000 об/мин, возможность остановки вала в любом положении с номинальным крутящим моментом неограниченно долгое время. Этот двигатель обладает достаточными характеристиками по мощности 1 кВт, частоте вращения 0–6000 об/мин и крутящему моменту 4,77 Н·м для обеспечения работоспособности привода и позволил достичь рабочей скорости привод 6 Гц, т.е. 43 м/мин подачи. Большой частоты достичь не получилось из-за появления ударной нагрузки.

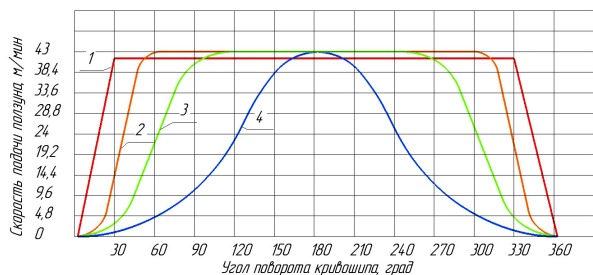


Рис. 7. Вычислительный и натурный эксперименты. Графики перемещения ползуна С (1 — график расчетный, 2 — движение с ударной нагрузкой, 3 — движение без ударной нагрузки, 4 — гармонические колебания с постоянной частотой вращения вала двигателя)

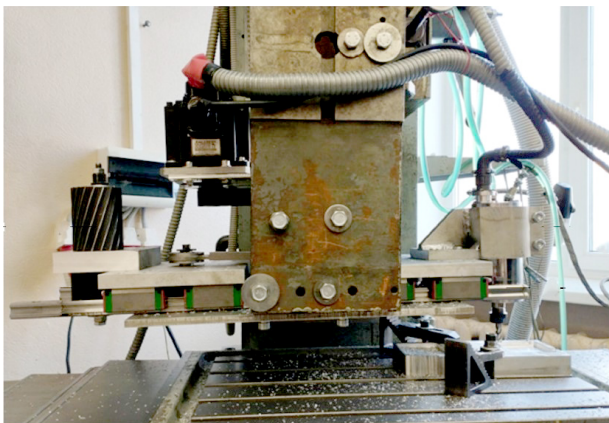


Рис. 8. Экспериментальная установка

Использовать можно любые типы двигателей, применяемых в системах станков с ЧПУ и управляемых от контроллеров. Масса и габариты двигателя не окажут существенного влияния на работу кривошипно-ползунного механизма. Основные условия — это частота вала двигателя, его мощность и крутящий момент.

Система автоматического управления (рис. 8) приводом подачи фрезерного станка построена на базе программируемого логического контроллера FATEK серия FBs, который по протоколам RS-485 и Modbus получает и передает информацию в сервопреобразователь ASD A2-1021-M.

Для реализации требуемого закона перемещения выходного звена кривошипно-ползунного механизма решена обратная задача кинематики. В расчетах используется приближенная зависимость:

$$n \cong r_{AB} \cdot V_{заг} / \left[\pi \cdot \lambda \cdot \left(\sin(\varphi_1) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2\varphi_1) \right) \right],$$

где φ_1 — угол поворота кривошипа от 0° до 180° , $V_{заг} = 40$ м/мин $\approx 0,66667$ м/сек, $\lambda = r_{AB}/L_{BC}$.

Получен массив численных значений мгновенной угловой скорости вала сервопривода для значений угла поворота входного кривошипа от 0° до 180° с заданным шагом, равным 3° . В начале диапазона результаты, полученные по приближенной зависимости, дают большую погрешность, поэтому вручную установлены максимально допустимые обороты на основании паспортных данных. Далее вычисляется управляющий сигнал на электродви-

гатель с учетом, что количество опорных значений ограничено и равно 60 точкам, и максимальное значение задано 80 000 накопленных импульсов на полный оборот.

Попытка реализовать траекторию 1 (рис. 7) привела к запредельным ударным нагрузкам механизма при частоте вращения вала 4 Гц. Траектория 4 не вызывает ударных нагрузок при 7 Гц. Траектория 2 сопровождается ударной нагрузкой. Траектория 3 не вызывает ударной нагрузки — принята за рабочую при частоте 6 Гц, т.е. скорости подачи 43 м/мин. При демонтаже шпиндельного узла и противовеса на ползунах (снижение веса платформ до 6 кг) — возможна безударная работа на частоте 7 Гц на траектории 2. При обработке ячейки различий в работе механизма в холостую и с контактом с деталью — не установлено.

Проверка корректности расчетов проведена на математических моделях кинематики и кинестатики в среде Matlab, а также на лабораторном стенде с физическим прототипом устройства (рис. 8).

Результаты экспериментов подтверждают достижение требуемых кинематических характеристик движения выходного звена совмещенного кривошипно-ползунного механизма, т.е. достигнутой скорости подачи 43 м/мин, при расчетных 40 м/мин. Достигнута производительность — обработка одной ячейки вафельного фона на сплаве Д16Т размером $70 \times 70 \times 7$ мм фрезой диаметром 10 мм за 12 секунд машинного времени.

Закключение. В работе предложена конструкция привода подачи режущего инструмента специального фрезерного станка для обработки вафельного фона на листовом материале на базе плоского совмещенного кривошипно-ползунного механизма, который благодаря конструкции обеспечивает уравнивание сил инерции. Геометрические параметры механизма рассчитаны исходя из известных размеров ячейки вафельного фона и ограничений на угол передачи движения. Проведенный кинематический и кинестатический анализ механизма с учетом его вертикального размещения на стойке специального фрезерного станка подтвердил реализацию выходным ползуном заданной траектории движения, а также позволил оценить крутящий момент входного вала, как следствие сформулировать требования к техническим параметрам электропривода. Рычажный исполнительный механизм привода подачи фрезерного станка приводится в движение синхронным сервоприводом DELTA модель ЕСМА-E11310GS со штатным блоком управления ASD-A2-1021-M, система управления реализована на базе ПЛК FATEX серии FBs.

Проведенная серия экспериментов на математической и физической моделях прототипа привода подачи фрезерного станка для обработки вафельного фона подтвердила достоверность теоретических моделей, работоспособность конструкции и рост скорости обработки ячеек вафельного фона. Достигнута производительность — обработка одной ячейки вафельного фона на сплаве Д16Т размером $70 \times 70 \times 7$ мм фрезой диаметром 10 мм за 12 секунд машинного времени.

Библиографический список

1. Калуга Е. С. От самолетов к ракетам и космическим кораблям. Москва: Воздушный транспорт, 2001. 232 с. ISBN 5-88821-041-2.

2. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. Москва: Машиностроение, 1976. 408 с.
3. Sabir R., Khan A. A., Hasham H. J. [et al.]. A survey of recent Developments in Optimization of Iso-Grid Cylinders // Journal of Space Technology. 2015. Vol. 5, no. 1. P. 103–115.
4. Кривонос Е. В. Исследование деформации обечайки с вафельным подкреплением при вальцевании и разработка метода компенсации отклонений формы // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 4. С. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-90-98. EDN: AKTZXB.
5. Данченко В. Г., Шевцов Е. И., Гусев В. В. Способ оптимизации массы локально нагруженных отсеков ракет вафельной конструкции // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2017. № 2. С. 131–136.
6. Батрутдинов Р. Г., Сысоев С. К. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1, № 7. С. 7–8. EDN: ТАOUWT.
7. Михрютин В. В., Шерстобитов М. А. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. 2012. № 2. С. 279–284. EDN: PPMNXB.
8. Зайцев А. М., Шачнев С. Ю., Грубый С. В. Оптимизация режимов резания при фрезеровании карманов обечайки с вафельной конструкцией // Космическая техника и технологии. 2020. № 3. С. 14–23. DOI: 10.33950/spacetechn-2308-7625-2020-3-14-23.
9. Jalili N., Wagner J., Dadfarnia M. A piezoelectric driven ratchet actuator mechanism with application to automotive engine valves // Mechatronics. 2003. Vol. 13, no. 8. DOI: 10.1016/S0957-4158(03)00009-6.
10. Zheng E., Zhou E. X. Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system // Mechanism and Machine Theory. 2014. Vol. 74. P. 10–30. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.11.015.
11. Chen Y., Sun Y., Don Y. Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance // Mechanism and Machine Theory. 2017. Vol. 31, no. 1. P. 75–85. DOI: 10.1007/s12206-016-1209-z.
12. Koser K. A slider crank mechanism based robot arm performance and dynamic analysis // Mechanism and Machine Theory. 2004. Vol. 39, no. 2. P. 169–182. DOI: 10.1016/S0094-114X(03)00112-5.
13. Дворников Л. Т., Большаков Н. С. Теория кривошипно-ползунных механизмов: моногр. Новокузнецк: НПФ, 2008. 138 с. ISBN 978-5-8441-0282-0.
14. Белов И. В., Семенов Д. В., Белов А. А. Кривошипно-ползунный механизм с двумя шатунами // Оригинальные исследования. 2023. Т. 13, № 8. С. 20–27.
15. Гебель Е. С., Самсонов В. А. Особенности бифуркаций в плоских четырехзвенных механизмах // Восьмые Омские чтения: материалы докл. междунар. конф. Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ, 2013. С. 109–112.

ГЕБЕЛЬ Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент Высшей школы управления кибер-физическими системами Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 1256-0879

ORCID: 0000-0003-1811-8755

AuthorID (SCOPUS): 55574609100

ResearcherID: O-4211-2014

Адрес для переписки: gebel_es@spbstu.ru

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

SPIN-код: 4871-2344

ORCID: 0000-0002-7703-9283

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

Адрес для переписки: popov_a_u@list.ru

ДРОЗДОВ Игорь Николаевич, начальник цеха АО ФНПЦ «Прогресс», г. Омск.

Адрес для переписки: seh2@progress-omsk.ru

Для цитирования

Гебель Е. С., Попов А. Ю., Дроздов И. Н. Привод подачи режущего инструмента фрезерного станка для обработки вафельного фона // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 21–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-21-28.

Статья поступила в редакцию 27.03.2024 г.

© Е. С. Гебель, А. Ю. Попов, И. Н. Дроздов

¹ Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia

² Omsk State
Technical University,
Omsk, Russia

³ JSC Federal Research
and Production Center «Progress»,
Omsk, Russia

CUTTING TOOL FEED DRIVE OF WAFER BACKGROUND MILLING MACHINE

The paper describes the process of designing the cutting tool feed drive of a special metalworking machine, which due to the circuit solution and automatic control system will increase the productivity of processing one cell of wafer background on sheet material up to 10–15 seconds. On the basis of the analysis of the technology of milling of a given regular pattern of wafer background and peculiarities of the equipment operation it proposed to replace the traditional ball bearing gear in the cutting tool feed drive with a flat combined crank-slide mechanism. Geometrical parameters of the lever transmission mechanism calculated in accordance with the known dimensions of the regular cell pattern and the recommended value of the angle of motion transmission. The analysis of kinematic and power characteristics of the lever mechanism allowed to justify the technical characteristics of the electric motor. In order to realize the required trapezoidal law of the output link speed change, the inverse problem of kinematics solved, numerical values of the instantaneous angular velocity of the input crank and pulse control signals to the servomotor obtained.

Keywords: feed drive, crank-slider mechanism, motion law, special positions, servo drive, control system.

References

1. Kaluga E. S. Ot samoletov k raketam i kosmicheskim korablyam [From aeroplanes to rockets and spaceships]. Moscow, 2001. 232 p. ISBN 5-88821-041-2. (In Russ.).
2. Lizin V. T., Pyatkin V. A. Proyektirovaniye tonkostennykh konstruksiy [Design of Thin-Walled Structures]. Moscow, 1976. 408 p. (In Russ.).
3. Sabir R., Khan A. A., Hasham H. J. [et al.]. A survey of recent Developments in Optimization of Iso-Grid Cylinders // Journal of Space Technology. 2015. Vol. 5, no. 1. P. 103–115. (In Engl.).
4. Krivosos E. V. Issledovaniye deformatsii obechayki s vafel'nyim podkrepleniyyem pri val'tsevanii i razrabotka metoda kompensatsii otkloneniy formy [Investigation of deformation of shell with waffle reinforcement during rolling and development of method for compensation of deviations forms] // Omskiy Nauchnyy Vestnik. Ser. Aviatsonno-Raketnoye i Energeticheskoye Mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2020. Vol. 4, no 4. P. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-90-98. EDN: AKTZXB. (In Russ.).
5. Danchenko V. G., Shevtsov E. I., Gusev V. V. Sposob optimizatsii massy lokal'no nagruzhennykh otsekov raket vafel'noy konstruksii [Method of mass optimisation of locally

loaded rocket compartments of waffle design] // Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoye vooruzheniye. Space Technology. Rocket Armament. 2017. No. 2. P. 131–136. (In Russ.).

6. Batrutdinov R. G., Sysoyev S. K. Tekhnologiya izgotovleniya vafel'nogo fona v obechaykakh letatel'nykh apparatov [Technology of manufacturing waffle background in aircraft shells] // Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики. Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. 2011. Vol. 1, no 7. P. 7–8. EDN: TAOUWT. (In Russ.).

7. Mikhryutin V. V., Sherstobitov M. A. Metody mekhanicheskoy obrabotki listovykh obshivok planera samoletov [Methods of machining of aircraft airframe sheet skins] // Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'yeva. Bulletin of P. A. Solovyov RSATU. 2012. No. 2. P. 279–284. EDN: PPMNXB. (In Russ.).

8. Zaytsev A. M., Shachnev S. Yu., Grubyy S. V. Optimizatsiya rezhimov rezaniya pri frezerovanii karmanov obechayki s vafel'noy konstruksiyey [Optimizing machining parameters for milling pockets in waffle-grid shell structures] // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. Space Engineering and Technology. 2020. No. 3. P. 14–23. DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-14-23. (In Russ.).

9. Jalili N., Wagner J., Dadfarnia M. A piezoelectric driven ratchet actuator mechanism with application to automotive engine valves // Mechatronics. 2003. Vol. 13, no. 8. DOI: 10.1016/S0957-4158(03)00009-6. (In Engl.).

10. Zheng E., Zhou E. X. Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system // *Mechanism and Machine Theory*. 2014. Vol. 74. P. 10–30. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.11.015. (In Engl.).

11. Chen Y., Sun Y., Don Y. Investigations on the dynamic characteristics of a planar slider-crank mechanism for a high-speed press system that considers joint clearance // *Mechanism and Machine Theory*. 2017. Vol. 31, no. 1. P. 75–85. DOI: 10.1007/s12206-016-1209-z. (In Engl.).

12. Koser K. A slider crank mechanism based robot arm performance and dynamic analysis // *Mechanism and Machine Theory*. 2004. Vol. 39, no. 2. P. 169–182. DOI: 10.1016/S0094-114X(03)00112-5. (In Engl.).

13. Dvornikov L. T., Bol'shakov N. S. Teoriya krivoshipno-polzunnykh mekhanizmov [Theory of crank-slide mechanisms]. Novokuznetsk, 2008. 138 p. ISBN 978-5-8441-0282-0. (In Russ.).

14. Belov I. V., Semenov D. V., Belov A. A. Krivoshipno-polzunnyy mekhanizm s dvumya shatunami [Crank-slide mechanism with three connecting rods] // *Original'nyye issledovaniya. Original Research*. 2023. Vol. 13, no. 8. P. 20–27. (In Russ.).

15. Gebel E. S., Samsonov V. A. Osobennosti bifurkatsiy v ploskikh chetyrekhzvennykh mekhanizmakh [Features of bifurcations in planar four-link mechanisms] // *Vos'myye Okunevskiyechteniya. The Eighth Okunev Readings*. Saint Petersburg, 2013. P. 109–112. (In Russ.).

GEBEL Elena Sergeevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Higher School of Cyberphysical Systems & Control,

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg.

SPIN-code: 1256-0879

ORCID: 0000-0003-1811-8755

AuthorID (SCOPUS): 55574609100

ResearcherID: O-4211-2014

Correspondence address: gebel_es@spbstu.ru

POPOV Andrey Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Metal Cutting Machines and Tools Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4871-2344

ORCID: 0000-0002-7703-9283

AuthorID (SCOPUS): 25228115700

Correspondence address: popov_a_u@list.ru

DROZDOV Igor Nikolayevich, Head of Workshop, JSC Federal Research and Production Center «Progress», Omsk.

Correspondence address: ceh2@progress-omsk.ru

For citations

Gebel E. S., Popov A. Yu., Drozdov I. N. Cutting tool feed drive of wafer background milling machine // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 21–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-21-28.

Received March 27, 2024.

© E. S. Gebel, A. Yu. Popov,

I. N. Drozdov

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ВЫНОСЛИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСА НИЗКОЛЕТЯЩИХ ОРБИТАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

В работе анализируется вопрос расчета выносливости корпуса низколетящих орбитальных объектов от циклической температурной знакопеременной деформации за пределами закона Гука. Констатируется практическое отсутствие методики прямого расчета. Предлагается косвенный расчет на базе имеющихся экспериментальных данных по механическим испытаниям образцов с параметром «напряжение» и алгоритм перехода от фактических деформаций к эквивалентным напряжениям. Методика расчета базируется на использовании существующей экспериментальной кривой усталости при симметричном цикле изгиба, результатах статических испытаний на растяжение при экстремальных температурах цикла и обобщении известной информации о закономерностях изменения параметров выносливости рассматриваемого материала применительно к условиям циклической температурной знакопеременной деформации циклической температурной знакопеременной деформации. Адекватность методики проверяется на примере разгерметизации корпуса орбитального модуля «Заря» международной космической станции, изготовленного из сплава АМг6 после ≈ 120000 циклов знакопеременного температурного нагружения. Отличие расчетной и фактической выносливости сплава АМг6 находится в пределах естественного разброса в 20 % при испытаниях на усталость.

Ключевые слова: оценка выносливости, цикл температур, деформация, трещины, нагружение.

Введение. В статьях авторов [1, 2] показано, что причиной разгерметизации корпуса орбитального модуля «Заря» международной космической станции могла быть потеря выносливости от циклической температурной знакопеременной деформации (ЦТЗД) в диапазоне температур $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$... $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3] и соответствующих напряжений растяжения-сжатия. При предположении, что цикл напряжений близок к симметричному, на базе кривой усталости сплава АМг6 [4] проведена оценка его выносливости. Полученные результаты в виде зависимости эквивалентных напряжений от количества циклов не противоречат опыту.

В настоящей работе на основе анализа и обобщения литературных данных по выносливости материалов предлагается доработанная методика определения числа циклов знакопеременного температурного нагружения до момента их разрушения для металлов, в том числе алюминиевых сплавов типа АМг. Для проверки адекватности расчета недостающая литературная информация частично дополнена результатами собственных статических

испытаний образцов сплава АМг6, изготовленных из стенки модуля орбитального объекта. Фактическая долговечность 120000 циклов попадает в интервал минимального — максимального разброса расчетных значений. Результат вполне удовлетворительный для оценки выносливости.

Методика позволяет оценивать ресурс низколетящих орбитальных объектов без проведения дополнительных испытаний на выносливость по известной кривой усталости сплава при симметричном изгибе, ограничиваясь, при необходимости, статическими испытаниями при температурах ЦТЗД.

Допущения и обобщения. Экспериментальные данные о выносливости при ЦТЗД в литературе отсутствуют.

Для сплава АМг6 отсутствуют даже сведения о коэффициенте линейного расширения α при отрицательных температурах.

Для близкого по свойствам сплава АМг5 в справочнике [5] найдено пять значений коэффициента линейного расширения в зависимости от темпера-

туры материала, цифровизация которых представлена на рис. 1:

$$\alpha \cdot 10^6 = 10^{-6} \cdot t^3 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,0178t + 23,383. \quad (1)$$

По причине отсутствия в открытых источниках данных о коэффициентах линейного расширения для алюминиевых сплавов при разных температурах материала, в дальнейших расчетах используется зависимость (1).

В результате расчета для исследуемого объекта $\varepsilon(t) = \alpha \cdot t$:

$$\varepsilon(-150) \approx 0,0019 = 0,19 \%,$$

$$\varepsilon(+150) \approx 0,0037 = 0,37 \%,$$

т.е. деформации при ЦТЗД происходят в упругопластической области, в которой справочная информация вообще ограничена.

Механические характеристики металлов, особенно кривые усталости и выносливости, традиционно оформляются с параметром напряжение — σ . Чтобы воспользоваться этими результатами для оценки выносливости при ЦТЗД нужно вычислить эквивалентные напряжения $\sigma_y(t)$ и эквивалентные деформации $\varepsilon(t)$. В [1] для этого предложен и апробирован алгоритм на базе обобщенного закона Гука.

Поскольку при температурах ЦТЗД деформации превышают 0,002 и ожидаются напряжения, превышающие предел упругости ($\sigma(t) > \sigma_y$), модуль Юнга $E(\sigma)$ и коэффициент Пуассона $\mu(\sigma)$ должны быть определены в зависимости от предполагаемого $\sigma_y(t)$, и получаем

$$\varepsilon(t) \approx \frac{1}{E(\sigma_y)} \cdot [\sigma_y - \mu(\sigma_t) \cdot (\sigma_y + \sigma_y)]. \quad (2)$$

При этом

$$E(\sigma_t) = \frac{d(\sigma = \sigma_t)}{d(\varepsilon = \varepsilon(t))}$$

и может быть определен по диаграмме растяжения.

Коэффициент Пуассона:

$$\mu(\sigma_y) \approx \mu + (0,5 - \mu) \cdot \frac{\sigma_y - \sigma_y}{\sigma_B - \sigma_y}, \quad \mu \leq 0,5, \quad (3)$$

где σ_y — предел упругости, а σ_B — предел прочности. Принято $\sigma_y = 0,6\sigma_{\text{пл}}$, где $\sigma_{\text{пл}}$ — предел пропорциональности.

Вследствие отсутствия другой информации значение коэффициента Пуассона принято из [6]: при $\sigma_y < \sigma_y$, $\mu = 0,32$, а при $\sigma_y = \sigma_B$, $\mu = 0,5$; т.к. при пластическом деформировании объем рассматриваемого объекта не меняется.

Из (2) при объемном напряженном состоянии, очевидном для ЦТЗД, получаем

$$\sigma_t = \varepsilon(t) \cdot E(\sigma_y) / (1 - 2 \mu(\sigma_y)). \quad (4)$$

Возникает дополнительная проблема, связанная с тем, что в справочниках ограничена информация о модуле Юнга, пределах упругости, пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$ и прочности в зависимости от температуры, особенно при низких температурах. В этой

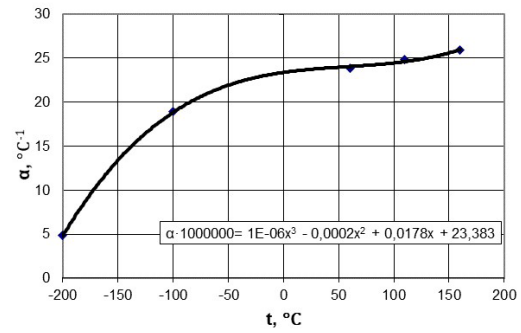


Рис. 1. Цифровизация зависимости $\alpha(t)$ от температуры материала

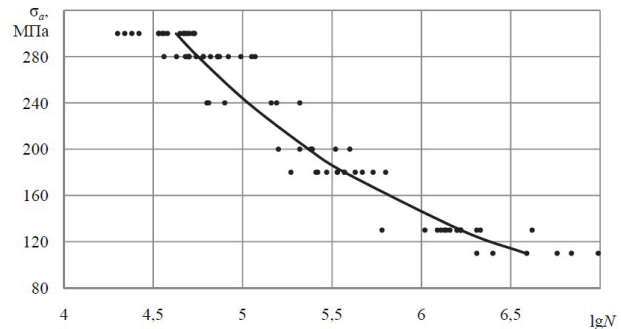


Рис. 2. Кривая усталости АМг6

связи рекомендуется провести статические испытания при нужных температурах, что и сделано в настоящей работе.

По известным данным [7] имеем следующие соотношения напряжений и модуля Юнга при пределах прочности, пропорциональности и упругости:

$$E(\sigma_B) = 0; E(\sigma_{\text{пл}}) = E/2; E(\sigma_y) = E,$$

где E — справочное значение модуля Юнга от σ будем аппроксимировать параболой 2-го порядка:

$$E(\sigma) \approx a + b \cdot \sigma + c \cdot \sigma^2. \quad (5)$$

Пределы прочности, пропорциональности, упругости определяем экспериментально по диаграмме растяжения при разных температурах, включая температуры ЦТЗД.

Вычисление σ_y из (2) проводим численно после подстановки (3) и (5). Результаты для АМг6 при условиях ЦТЗД составили

$$\sigma_{1y} = \sigma_y(t = 150 \text{ } ^\circ\text{C}) = 220,1 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{2y} = \sigma_y(t = -150 \text{ } ^\circ\text{C}) = -156,7 \text{ МПа},$$

а коэффициент асимметрии цикла напряжений $r = -0,71$.

Информация о кривых усталости в открытых источниках для рассматриваемого материала нет. Для сплава АМг6 найдена только одна полноценная кривая при симметричном цикле изгиба (рис. 2) [4] и предел выносливости $\sigma_{-1\text{уст}} = 100$ МПа при нормальной температуре без указания технологии изготовления. В то же время известна взаимосвязь предела прочности и выносливости [6]:

- для стали $\frac{\sigma_{-1\text{уст}}}{\sigma_B} = 0,45 \dots 0,55$;
- для цветных металлов $\frac{\sigma_{-1\text{уст}}}{\sigma_B} = 0,25 \dots 0,50$;

— для алюминиевых сплавов [5]

$$K_{\sigma_B}^{\sigma_{-1uzr}} = \frac{\sigma_{-1uzr}}{\sigma_B} = 0,35..0,45, \quad (6)$$

а также зависимость предела прочности от температуры $\sigma_B(t)$ [8].

Для ЦТЗД, очевидно, расчет нужно вести по кривым усталости при растяжении-сжатии, а не при изгибе. Для этого можно использовать соотношение [9].

$$K_{\sigma_{-1uzr}}^{\sigma_{-1рasm}} = \frac{\sigma_{-1рasm}}{\sigma_{-1uzr}} = 0,8..0,9. \quad (7)$$

Опыты на циклическое растяжение-сжатие более трудоемки и длительны, а их результаты практически не публикуются.

Результаты испытаний при коэффициенте асимметрии цикла $r = \frac{\sigma_{мин}}{\sigma_{макс}} \neq -1$ (в наших расчетах $r = -0,71$) вообще малоизвестны, как и предел выносливости σ_0 при $r = 0$ — пульсирующем цикле. Последнюю проблему можно преодолеть на базе линейной кривой выносливости [10] на рис. 3.

В соответствии с рис. 3 оцениваем предельную амплитуду пульсационного цикла σ_a

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{-1} - \frac{\sigma_0}{2}}{\frac{\sigma_0}{2}} &= \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \approx K_{\sigma_B}^{-1uzr} \Rightarrow \\ \Rightarrow \sigma_a &= \sigma_0 / 2 \approx \frac{\sigma_{-1}}{1 + K_{\sigma_B}^{-1uzr}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Учет предела прочности, асимметрии цикла и метода испытания. Учитывая практическое отсутствие информации о кривых усталости при пределе длительной выносливости σ_r ($r \neq -1$), запрелднюю трудоемкость экспериментального построения кривых усталости при разных параметрах ЦТЗД и некоторые общие закономерности поведения этих кривых, предлагается при оценке выносливости принять следующие допущения:

— при изменении предела длительной выносливости σ_r кривые усталости $\lg N(\sigma)$ материала перемещаются по оси напряжений на величину его изменения параллельно исходным для симметричного цикла;

— величина смещения кривой по оси напряжений равна сумме поправок от изменения предела выносливости, коэффициента асимметрии цикла r и способа деформирования (изгиб или растяжение) (6), (7), (8) и суммируется к расчетному эквивалентному напряжению. Получаем

$$\Delta\sigma_y = (\sigma_{-1рasm} - \sigma_{-1uzr}) + (K_{\sigma_B}^{\sigma_{-1uzr}} \cdot \sigma_B(t) - \sigma_{-1uzr}) + (\sigma_{0рasm} / 2 - \sigma_{-1uzr})$$

и в общем виде после преобразований:

$$\Delta\sigma_y = \left(\frac{K_{\sigma_B}^{\sigma_{-1uzr}} \cdot \sigma_B + \sigma_{-1uzr}}{1 + K_{\sigma_B}^{\sigma_{-1uzr}}} - 3 + K_{\sigma_{-1uzr}}^{\sigma_{-1рasm}} \right) \cdot \sigma_{-1uzr}. \quad (9)$$

Тестирование расчета для сплава АМгб велось с корректировкой (рис. 4) по (9). Алгоритм расчета

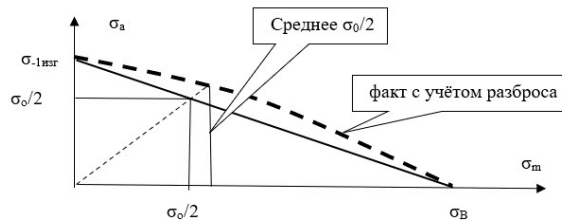


Рис. 3. Кривые выносливости

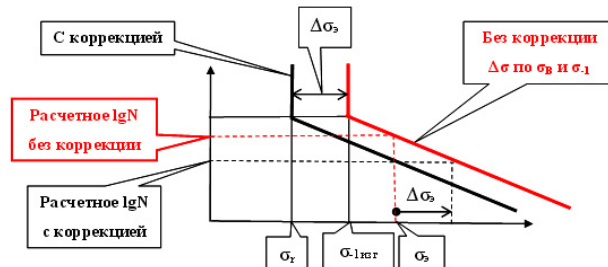


Рис. 4. Корректировка кривой усталости и расчета $\lg N$

эквивалентного напряжения не изменялся, но учитывалась зависимость (1) коэффициента линейного расширения от температуры.

В качестве исходной принята цифровизация кривой усталости из [2].

Прогноз выносливости при несимметричном цикле по расчетной кривой усталости. Представим несимметричный цикл как сумму двух пульсационных циклов с длительным пределом выносливости $N_1(t_1)$ и $N_2(t_2)$ длительностью каждого N . По линейной гипотезе суммирования усталостных повреждений [10] имеем:

$$\frac{N}{N_1} + \frac{N}{N_2} = 1.$$

Откуда, вычисляя по скорректированной кривой усталости $N_1(\sigma_{1y})$ и $N_1(\sigma_{2y})$, оцениваем выносливость при ЦТЗД:

$$N = \frac{N_1 \cdot N_2}{N_1 + N_2}. \quad (10)$$

При отсутствии экспериментальной кривой усталости при изгибе и $r = -1$, достаточно экспериментально определить $N_1(t_1)$ и $N_2(t_2)$ — это 4–6 испытаний при расчетных σ_y и соответствующих температурах. В то же время построение кривой усталости требует не менее 20-ти испытаний при нормальной температуре плюс статические испытания при заданных температурах.

Дополнительные статические испытания. В качестве испытательной машины, в составе экспериментального стенда, использовалась универсальная испытательная машина ZwickRoell Z010 AllroundLine с термокамерой для нагрева экспериментального образца, для охлаждения дополнительно устанавливался баллон с жидким азотом. Испытывалось от двух до пяти образцов при температурах 20 °С, 75 °С, 150 °С, –50 °С, –75 °С. Для каждой температуры вычислялись средние значения параметров.

Образцы изготавливались из материала объекта, т.е. сохранялось влияние технологии изготовления на механические характеристики.

Машина выдавала на печать с мелким шагом деформацию ε_i и условное измеренное напряжение $\sigma_{u,i}$.

Предел прочности σ_B в испытательной машине определяется автоматически.

Текущий измеренный модуль нормальной упругости E_u вычислялся как

$$E_{u,i}(\sigma_{u,i}) \approx \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} \quad (11)$$

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ определялся как напряжение при горизонтальном участке диаграммы или в точке с очевидным резким уменьшением $E_{u,i}(\sigma_{u,i})$ и последующим его увеличением.

Измеренный модуль E_u определялся как максимальное значение текущего измеренного модуля. Соответствующее напряжение — предел упругости σ_y .

В литературе при испытаниях на несовременных машинах рекомендуется

$$\sigma_y = (0,5 \dots 0,7) \sigma_{пл}$$

Предел пропорциональности $\sigma_{пл}$ определялся как напряжение, при котором текущий измеренный модуль соответствует $0,5E_u$.

Оценка фактического модуля Юнга при испытаниях. Проблема заключается в том, что перемещение Δ , измеряемое испытательной машиной, складывается из непосредственного удлинения испытуемого образца Δl_o и упругого перемещения в контактах зажимов и не рабочих элементов образца Δl_k :

$$\Delta = \Delta l_o + \Delta l_k \quad (12)$$

Представим, что последовательно с основным образцом (E_o) соединен такой же образец, но с другим модулем (E_k). Соответственно, вычисляемый дифференциал деформации образца увеличивается:

$$d\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta l_o}{l} + \frac{\Delta l_k}{l} = d\varepsilon_o + d\varepsilon_k \quad (13)$$

и измеренный модуль Юнга:

$$E_u = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_o + d\varepsilon_k} \quad (14)$$

После преобразования:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{1}{E_u} = \frac{d\varepsilon_o + d\varepsilon_k}{d\sigma} = \frac{1}{E_o} + \frac{1}{E_k} \right),$$

$$\frac{1}{E_u} = \frac{1}{E_o} + \frac{1}{E_k} \quad (15)$$

где E_o — фактический модуль образца, а E_k — условный модуль контакта зажимов и нерабочих элементов образца. Принято допущение, что Δl_k линейно относительно условного напряжения.

Если известны модуль, измеренный специальными точными методами на базе действительного удлинения образца (y АМгб справочное $E_o^s = 0,71 \cdot 10^5$ МПа при нормальной температуре), и соответствующее E_u в опыте (определено при нор-

мальной температуре $E_u = 0,753 \cdot 10^3$ МПа), то можно без учета влияния температуры оценить величину E_k в серии соответствующих опытов:

$$E_k = \frac{E_o^s \cdot E_u}{E_o^s - E_u} \quad (16)$$

После расчета по формуле (16) $E_k = 0,761 \cdot 10^5$ МПа.

Значение $E_k(t)$ при соответствующей температуре оцениваем умножением E_k на соотношение средних при опытах модулей при текущей и нормальной температуре:

$$E_k(t) = E_k \cdot \frac{E_u(t)}{E_u(t=20)} \quad (17)$$

Для опыта при данном t фактический модуль Юнга образца из (15):

$$E_o(t) = \frac{E_u(t) \cdot E_k(t)}{E_k(t) - E_u(t)} \quad (18)$$

Сравнение опытов со справочными значениями и аппроксимация результатов на температуру -150 °С. Графическая иллюстрация результатов приведена на рис. 5. Там же приведена и линия тренда при $t = -150$ °С.

После оцифровки результатов проведенных опытов получаем:

$$\sigma_B = -0,6659t + 332,06,$$

$$\sigma_{0,2} = -0,002t^2 + 0,398t + 155,51,$$

$$\sigma_{пл} = -0,254t + 162,99.$$

Для вычисления эквивалентных напряжений по результатам экспериментов получаем зависимости (5):

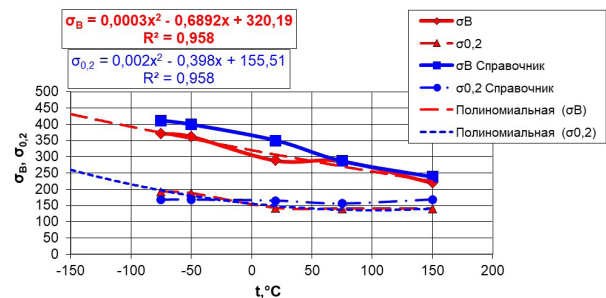


Рис. 5. Пределы прочности и текучести

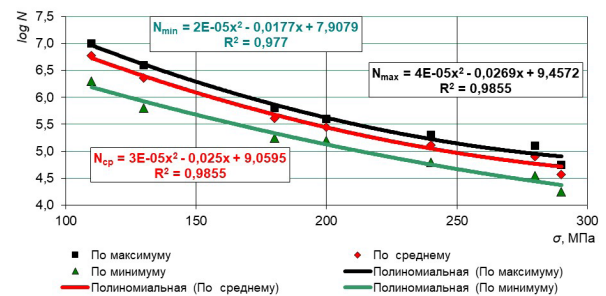


Рис. 6. Оцифрованные кривые усталости: по среднему N , минимальному N и максимальному N

Результаты расчета выносливости

N_{min} — расчет по минимуму								
$K_{\sigma_b}^{\sigma_{-1уст}}$	$K_{\sigma_{-1уст}}^{\sigma_{-1расс}}$							
	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,5
0,8	1,79E+05	1,65E+05	1,53E+05	1,41E+05	1,30E+05	1,21E+05	1,12E+05	9,58E+04
0,85	1,44E+05	1,34E+05	1,24E+05	1,15E+05	1,07E+05	9,89E+04	9,19E+04	7,94E+04
0,9	1,26E+05	1,09E+05	1,01E+05	9,43E+04	8,78E+04	8,17E+04	7,61E+04	6,62E+04
N_{max} — расчет по максимуму								
	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,5
0,8	6,76E+05	6,12E+05	5,55E+05	5,04E+05	4,58E+05	4,18E+05	3,81E+05	1,66E+02
0,85	5,21E+05	4,74E+05	4,33E+05	3,96E+05	3,62E+05	3,32E+05	3,05E+05	2,59E+05
0,9	4,07E+05	3,73E+05	3,42E+05	3,15E+05	2,90E+05	2,67E+05	2,47E+05	2,12E+05
$N_{ср}$ — расчет по среднему при $N_{max} \geq N = 1,2; E+05 \geq N_{min}$.								
	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,5
0,8	—	—	—	—	—	—	1,53E+05	1,24E+05
0,85	—	—	—	1,61E+05	1,45E+05	1,31E+05	1,18E+05	9,63E+04
0,9	—	1,51E+05	1,36E+05	1,23E+05	1,12E+05	1,01E+05	9,18E+04	7,58E+04

— при повышенных температурах $a = 1,4438$, $b = -843,81$, $c = 115779$;

— при пониженных температурах $a = 0,4012$, $b = -317,51$, $c = 62585$.

Зависимости использовались в (2) при расчете σ_p .

Учет рассеяния результатов в кривой усталости. Получаем оцифрованные кривые усталости: по среднему N , по минимальному N и максимальному N , а также их полиномиальные ряды (рис. 6).

Проводим расчеты выносливости и принимаем в расчет только те результаты, в которых

$$N_{max} \geq N \geq N_{min}. \quad (19)$$

Сводим результаты расчёта выносливости в табл. 1.

Меняем коэффициенты (6) и (7) в соответствующих пределах и находим область их допустимого изменения (рис. 7)

Верхний предел $K_{\sigma_b}^{\sigma_{-1уст}}$ идентичен цветным металлам, а нижний — данным, указанным в [6] для алюминиевых сплавов. При опытным $N = 1,2 \cdot 10^5$ расчет по минимуму дает выносливость $N_{min} = (0,87...1,17) \cdot 10^5$, а по максимуму — $N_{max} = (2,67...3,73) \cdot 10^5$. То есть дает точность оценки выносливости, удовлетворительную для усталости.

Получаем, что в пределах изменения коэффициентов для цветных металлов расчет по среднему для сплава АМг6 хорошо соответствует опыту ($N = 1,2 \cdot 10^5$) при:

$$K_{\sigma_{-1уст}}^{\sigma_{-1расс}} = \frac{\sigma_{-1расс}}{\sigma_{-1уст}} = 0,9 \text{ и } K_{\sigma_b}^{\sigma_{-1уст}} = \frac{\sigma_{-1уст}}{\sigma_B} = 0,45...0,46,$$

$$K_{\sigma_{-1уст}}^{\sigma_{-1расс}} = \frac{\sigma_{-1расс}}{\sigma_{-1уст}} = 0,85 \text{ и } K_{\sigma_b}^{\sigma_{-1уст}} = \frac{\sigma_{-1уст}}{\sigma_B} = 0,47...0,48.$$

Расчет при $K_{\sigma_{-1уст}}^{\sigma_{-1расс}} = 0,9$ практически соответствует данным, приведённым в работе [6] для алюми-

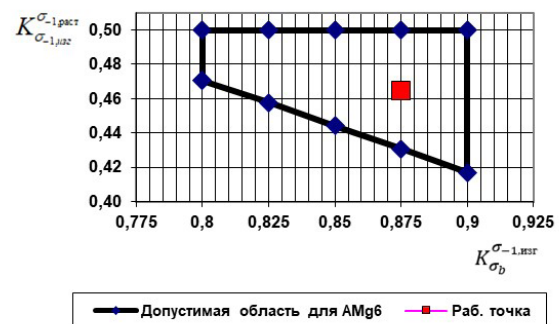


Рис. 7. Область коэффициентов $K_{\sigma_{-1уст}}^{\sigma_{-1расс}}$ и $K_{\sigma_b}^{\sigma_{-1уст}}$, для которой выполняется условие (19)

ниевых сплавов, а при $K_{\sigma_{-1уст}}^{\sigma_{-1расс}} = 0,85$ — для цветных металлов.

Для сплава АМг6 можно рекомендовать расчет долговечности по среднему $K_{\sigma_{-1уст}}^{\sigma_{-1расс}} = (0,85 + 0,90) / 2$ при значении $K_{\sigma_b}^{\sigma_{-1уст}} = 0,465$, соответствующем опытному $N = 120000$ циклов, а именно принять для любых параметров ЦТЗД:

$$K_{\sigma_{-1уст}}^{\sigma_{-1расс}} = 0,875, K_{\sigma_b}^{\sigma_{-1уст}} = 0,465.$$

Положение этой рабочей точки см. рис. 7.

Графическая иллюстрация к табл. 1 приведена на рис. 8.

Рекомендуемый алгоритм расчета выносливости при ЦТЗД адекватен и требует только наличия кривой усталости при симметричном изгибе и результатов статических испытаний при температурах ЦТЗД. Достаточно просто иметь кривую выносливости по средним значениям и нужно знать предел выносливости при симметричном изгибе, который в авиации и космонавтике вычисляется как максимальное напряжение, при котором пять образцов подряд выдерживают базовое число циклов. На этом процессе и сосредоточены основные ис-

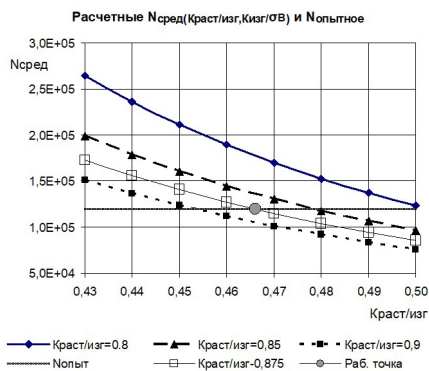


Рис. 8. Иллюстрация к расчетам в таблице 1

пытания на выносливость. В ЦТЗД же нужно знать ограниченную выносливость, определению которой редко уделяют внимание. Особенно когда цикл напряжений сочетается с циклом температур при деформациях за пределами закона Гука (испытания сложны, громоздки и нецелесообразны).

При отсутствии данных по фактической выносливости можно для алюминиевых сплавов взять нижнюю её оценку при $K_{\sigma_{1-рост}}^{\sigma} = 0,9$ и $K_{\sigma_b}^{\sigma_{1-изг}} = 0,45$

$$N \geq 0,943 \cdot 10^5.$$

Этот результат выделен полужирным шрифтом в табл. 1 и, ожидаемо, примерно равен $0,8 \cdot 120000$ (нормальный разброс числа циклов до разрушения при усталости $\pm 20\%$).

Заключение

1. Решена проблема оценки выносливости алюминиевых сплавов при ЦТЗД и соответствующих эквивалентных напряжениях растяжения-сжатия.

2. Разработана методика расчета выносливости на базе результатов стандартных механических испытаний образцов на растяжение при экстремальных температурах цикла и обобщении известной информации о закономерностях изменения параметров выносливости рассматриваемого материала применительно к условиям ЦТЗД.

3. Проведена апробация разработанной методики на примере сплава АМгб в составе корпуса модуля «Заря» международной космической станции, фактическая выносливость которого подтверждена расчетом и адекватна в пределах номинального физического разброса выносливости до 20% .

4. Разработанная методика позволяет проводить оценку ресурса низколетящих орбитальных объектов без проведения длительных натурных испытаний, ограничиваясь при необходимости усредненной кривой усталости при изгибе и статическими испытаниями при температурах ЦТЗД.

Благодарности

Работа выполнена в рамках соглашения № 23101В от 23.06.2023 г. по гранту «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Лесняк И. Ю., Соколовский З. Н., Гавриленко С. В. Анализ выносливости конструкций в условиях циклических температурных нагрузжений // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 16–20. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-16-20. EDN: OZKQMV.

2. Лесняк И. Ю., Соколовский З. Н., Гавриленко С. В. Исследование выносливости сплава АМгб при циклическом объемном

температурном деформировании // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 30–35. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-30-35.

3. Салахутдинов Г. М. Тепловая защита в космической технике. Москва: Знание, 1982. 64 с.

4. Ерпалов А. В., Шефер Л. А., Рихтер Е. Е. [и др.]. Усталостные испытания материалов и конструкций с использованием современного оборудования // Контроль и испытания. 2015. Т. 15, № 2. С. 70–80. EDN: TLJEN.

5. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. [и др.]. Физические величины: справ. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. ISBN 5-283-04013-5.

6. Потапова Л. Б., Ярцев В. П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? Москва: Машиностроение–1, 2005. 244 с. ISBN 5-94275-197-8.

7. Федосьев В. И. Сопротивление материалов. 3-е изд. Москва: Наука. 1964. 540 с.

8. Справочник инженера. URL: <https://inzhenier-info.ru/razdely/materialy/deformiruemye-alyuminievye-splavy/splavy-alyuminiya-s-magniem-magnalin-svarivaemye/splav-alyuminiy-амгб-s-magniem-magnalij-svarivaemyj.html> (дата обращения: 05.11.2023).

9. Пономарев С. Д. [и др.]. Теоретические основы и экспериментальные методы. Расчеты стержневых элементов конструкций при статической нагрузке. В 3 т. Т. 1. Расчеты на прочность в машиностроении. Москва: Машгиз. 1956. 884 с.

10. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. В 2 т. Т. 1. Элементарная теория и задачи. Москва: Наука. 1965. 364 с.

ЛЕСНЯК Иван Юрьевич, кандидат технических наук, и. о. заведующего, доцент кафедры «Машиноведение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6114-0646

ResearcherID: E-6397-2014

ORCID: 0000-0002-9481-5985

СОКОЛОВСКИЙ Зиновий Наумович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Машиноведение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2094-1470

AuthorID (РИНЦ): 864068

ФЁДОРОВА Мария Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиноведение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8189-1115

AuthorID (РИНЦ): 984405

ORCID: 0009-0006-4530-4739

ГАВРИЛЕНКО Сергей Вячеславович, аспирант, ассистент кафедры «Машиноведение» ОмГТУ, г. Омск.

ORCID: 0009-0006-8316-3068

Адрес для переписки: serg11-1999@mail.ru

КАЗАКОВ Александр Юрьевич, старший преподаватель кафедры «Машиноведение» ОмГТУ, г. Омск.

КОНОВАЛОВ Владимир Евгеньевич, старший преподаватель кафедры «Машиноведение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3104-3997

AuthorID (РИНЦ): 749994

Для цитирования

Лесняк И. Ю., Соколовский З. Н., Фёдорова М. А., Гавриленко С. В., Казаков А. Ю., Коновалов В. Е. Проблема оценки выносливости элементов корпуса низколетящих орбитальных объектов // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 29–36. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-29-36.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023 г.

© И. Ю. Лесняк, З. Н. Соколовский, М. А. Фёдорова, С. В. Гавриленко, А. Ю. Казаков, В. Е. Коновалов

THE PROBLEM OF ASSESSING ENDURANCE OF HULL ELEMENTS OF LOW-FLYING ORBITAL OBJECTS

The paper analyzes the issue of calculating the endurance of the body of low-flying orbital objects from cyclic temperature alternating deformation beyond the limits of Hooke's law. The practical absence of direct calculation methods is stated. An indirect calculation is proposed on the basis of available experimental data on mechanical tests of samples with the «stress» parameter and an algorithm for transition from actual deformations to equivalent stresses. The calculation method is based on the use of the existing experimental fatigue curve under a symmetrical bending cycle, the results of static tensile tests at extreme cycle temperatures, and a generalization of known information about the patterns of changes in the endurance parameters of the material under consideration in relation to the conditions of cyclic temperature alternating deformation. The adequacy of the methodology is verified using the example of depressurization of the housing of the Zarya orbital module of the international space station, made of AMg6 alloy after $\approx 120,000$ cycles of alternating temperature loading. The difference between the calculated and actual endurance of the AMg6 alloy is within the natural range of 20 % during fatigue testing.

Keywords: endurance assessment, temperature cycle, deformation, cracks, loading.

Acknowledgements

The work is performed under agreement No. 23101B dated 23.06.2023 under the grant «Priority-2030».

References

1. Lesnyak I. Yu., Sokolovskiy Z. N., Gavrilenko S. V. Analiz vynoslivosti konstruktiv v usloviyakh tsiklicheskih temperaturnykh nagruzheniy [The analysis of structural fatigue under cyclic temperature loads] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 6 (180). P. 16–20. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-16-20. EDN: OZKKMV. (In Russ.).
2. Lesnyak I. Yu., Sokolovskiy Z. N., Gavrilenko S. V. Issledovaniyye vynoslivosti splava AMg6 pri tsiklicheskom ob"yyemnom temperaturnom deformirovani [Investigation of endurance of AMg6 alloy under cyclic volumetric thermal deformation] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 4 (184). P. 30–35. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-30-35. (In Russ.).
3. Salakhutdinov G. M. Teplovaya zashchita v kosmicheskoy tekhnike [Thermal protection in space technology]. Moscow, 1982. 64 p. (In Russ.).
4. Erpalov A. V., Shefer L. A., Rikhter E. E., Taranenko P. A. [et al.]. Ustalostnyye ispytaniya materialov i konstruktiv s ispol'zovaniyem sovremennogo oborudovaniya [Fatigue tests of materials and structures using modern equipment] // Kontrol' i ispytaniya. *Control and Testing*. 2015. Vol. 15, no. 2. P. 70–80. (In Russ.).
5. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. [et al.]. Fizicheskiyye velichiny: sprav. [Physical quantities: handbook]. Moscow, 1991. 1232 p. ISBN 5-283-04013-5. (In Russ.).
6. Potapova L. B., Yartsev V. P. Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhenom sostoyanii. Kak prognoziryuyut predel'nyye napryazheniya? [Mechanics of materials under complex stress states. How are ultimate stresses predicted?]. Moscow, 2005. 244 p. ISBN 5-94275-197-8. (In Russ.).
7. Fedos'yev V. I. Soprotivleniye materialov [Strength of materials] 3rd ed. Moscow, 1964. 540 p. (In Russ.).
8. Spravochnik inzhenera [Engineer's Handbook]. URL: <https://inzhener-info.ru/razdely/materialy/deformiruyemye-alyuminiyevyye-splavy/splavy-alyuminiya-s-magniyem-magnalinsvarivayemye/splav-alyuminiyevyj-amg6-s-magniyem-magnalij-svarivayemyj.html> (accessed: 05.11.2023). (In Russ.).
9. Ponomarev S. D. [et al.]. Teoreticheskiye osnovy i eksperimental'nyye metody. Raschety sterzhnevnykh elementov konstruktiv pri staticheskoy nagruzke. V 3 t. T. 1. Raschety na prochnost' v mashinostroyenii [Theoretical foundations and experimental methods. Calculations of rod structural elements under static loading. In 3 vols. Vol. 1. Strength calculations in mechanical engineering]. Moscow, 1956. 884 p. (In Russ.).
10. Timoshenko S. P. Soprotivleniye materialov. V 2 t. T. 1. Elementarnaya teoriya i zadachi [Resistance of materials. In 2 vols. Vol. 1. Elementary theory and problems]. Moscow, 1965. 364 p. (In Russ.).

LESNYAK Ivan Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Acting Head, Associate Professor of Mechanical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 6114-0646

ResearcherID: E-6397-2014

ORCID: 0000-0002-9481-5985

SOKOLOVSKY Zinoviy Naumovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Mechanical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2094-1470

AuthorID (RSCI): 864068

FEDOROVA Maria Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8189-1115

AuthorID (RSCI): 984405

ORCID: 0009-0006-4530-4739

GAVRILENKO Sergey Vyacheslavovich, Graduate Student, Assistant of Mechanical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

ORCID: 0009-0006-8316-3068

Correspondence address: serg11-1999@mail.ru

KAZAKOV Alexander Yurievich, Senior Lecturer of Mechanical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

KONOVALOV Vladimir Evgenyevich, Senior Lecturer of Mechanical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3104-3997

AuthorID (RSCI): 749994

For citations

Lesnyak I. Yu., Sokolovsky Z. N., Fedorova M. A., Gavrilenko S. V., Kazakov A. Yu., Kononov V. E. The problem of assessing endurance of hull elements of low-flying orbital objects // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 190 (2). P. 29–36. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-29-36.

Received November 14, 2023.

© I. Yu. Lesnyak, Z. N. Sokolovsky, M. A. Fedorova,
S. V. Gavrilenko, A. Yu. Kazakov, V. E. Kononov

РАЗРАБОТКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ДОКУМЕНТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье приведены результаты разработки показателей системы мониторинга процесса разработки документов по стандартизации. Неотъемлемой частью управления процессом разработки документов по стандартизации является система мониторинга. Она позволяет отслеживать и контролировать ключевые показатели процесса разработки документов по стандартизации. Также применение системы мониторинга делает возможным формирование референтной базы для анализа причин отклонений значений показателей. При этом важной задачей является оценка результативности системы мониторинга и математическое обоснование показателя оценки эффективности системы мониторинга, учитывающего ошибки при реализации процесса мониторинга.

Ключевые слова: информационные технологии, система мониторинга, контроль процесса, показатели, разработка стандартов, управление качеством.

Введение. Устойчивое развитие организации, осуществляющей разработку документов по стандартизации, в определенной степени зависит от наличия систем мониторинга, которые контролируют соответствие ключевых показателей заданным значениям, а также регистрируют отклонения показателей.

Разработка документов по стандартизации в контексте четвертой промышленной революции предполагает высокую степень интеграции технологий и полный контроль над информацией. Современные системы мониторинга процессов неизбежно влияют на качество процессов [1], особенно в случае применения в имитационном моделировании процессов. Однако многие подходы к мониторингу процессов являются реактивными и выявляют отклонения только по факту их выявления. При этом развивающимся является применение систем мониторинга, прогнозирующих отклонения показателей и, соответственно, позволяющих применять корректирующие действия с упреждением возникновения таких отклонений. Вместо того чтобы просто выявлять нарушения, они прогнозируются и потенциально могут быть предотвращены. При этом система мониторинга на основе прогнозирования требует работы с большими массивами данных, содержащих историю выполнения процесса разработки документов по стандартизации, на анализе которых строится прогностическая модель. И от эффективности работы системы мониторин-

га будет зависеть эффективность самого процесса разработки документов по стандартизации.

В то же время необходимы определенные показатели для оценки эффективности процесса и самих систем мониторинга. Ранее разработанные показатели для оценки эффективности систем мониторинга имеют разные подходы для расчетов, что вызывает трудности при стандартизации оценки эффективности системы мониторинга, применяемой для процесса разработки документов по стандартизации, учитывающие при этом использование информационных технологий [2–9].

В настоящий момент вопрос математического обоснования показателя оценки эффективности системы мониторинга процесса разработки документов по стандартизации входит в разряд актуальных.

Основная цель. Статья направлена на разработку и математическое обоснование показателя оценки эффективности системы мониторинга процесса разработки документов по стандартизации.

При разработке систем мониторинга одним из важных этапов является наличие сформулированных требований к системе мониторинга, а также разработанные показатели, по которым проводится мониторинг процесса и порядок оценки эффективности мониторинга.

Рассматриваемые проблемы. Использование новых решений в рамках развивающихся концепций и технологических укладов требует высокого уровня внедрения процессных подходов. В значи-

тельной мере эффективность процессного подхода определяют средства и методы контроля качества процесса. Внедрение современных инструментов и методов позволяет осуществлять мониторинг процессов, оптимизировать затраты на качество. При этом важно, чтобы сама система мониторинга соответствовала определенным критериям.

Показатель оценки эффективности системы мониторинга должен характеризовать информационную емкость системы мониторинга.

Пока квантовые коммуникации и системы мониторинга квантовой сети находятся в стадии апробации [10], современные системы мониторинга используют дискретные сообщения, которые, какими бы сложными они ни были, могут передаваться с использованием последовательности двоичных цифр 0 и 1.

Наиболее изученная и распространенная в настоящий момент двоичная последовательность может использоваться для передачи сообщения о событии процесса разработки документов по стандартизации, выбранного из $N = 2^m$ возможных событий, где $m = \log_2 N$ — длина последовательности (количество битов в двоичном числе). Таким образом, длина последовательности, необходимой для передачи определенного сообщения, пропорциональна логарифму числа возможных сообщений. При этом максимальный объем информации в сообщении пропорционален его длине (1)

$$H_{\max} = \log_2 N. \quad (1)$$

Значение H_{\max} определяет верхний порог объема информации, который может содержаться в сообщении [11]. Фактический объем информации зависит не только от количества возможных сообщений, но и от их вероятностей, поскольку сообщения выбираются из набора возможных неоднородных сообщений. Учитывая это, определим понятие количественной меры информации (2).

$$H(X) = \sum_{i=1}^N P(X_i) \log_2 P(X_i), \quad (2)$$

где $P(X_i)$ — вероятность i -го сообщения из множества N .

В случае, когда вероятности всех сообщений, кроме одного, обращаются в ноль, т.е. если $P(X_i) = 0$ и если $P(X_i) = 1$ ($i \neq 1$), объем информации равен нулю. Если заранее известно, что все возможные сообщения в наборе N равновероятны, объем информации определяется как максимальный.

Таким образом, во всех случаях, кроме предельных ($N_{\min} = 0$ и $H_{\max} = \log_2 N$), справедливо неравенство (3).

$$0 < H < \log_2 N. \quad (3)$$

Величина H называется энтропией случайной величины X . Это мера начальной неопределенности результата при выборе сообщений X из множества возможных сообщений, поступающих в систему мониторинга из журнала событий при выполнении процесса разработки документов по стандартизации.

Выбор сообщения полностью устраняет эту неопределенность и описывает объем информации, равный H .

Объем информации, получаемой системой мониторинга за интервал времени (t, τ) , равен изменению величины энтропии (4).

$$I(X, t, \tau) = H_0(X, t, \tau) - H_k(X, t, \tau), \quad (4)$$

где $H_0(X, t, \tau)$ — энтропия, которая описывает неопределенность контролируемого процесса разработки документов по стандартизации перед выполнением мониторинга (X — набор состояний объекта в момент времени t , соответствующий моменту завершения мониторинга, τ — момент времени, соответствующий моменту прекращения работы системы мониторинга; $H_k(X, t, \tau)$, является условной энтропией контролируемого процесса разработки документов по стандартизации при осуществлении мониторинга.

Каждое состояние контролируемого процесса разработки документов по стандартизации в любой момент времени t характеризуется вероятностью выполнения задачи в интервале времени (t, τ) (5)

$$P(t, \tau) = P_{\text{НС}}(t, \tau) \cdot P_{\text{ПС}}(t, \tau), \quad (5)$$

где $P_{\text{НС}}(t, \tau)$, $P_{\text{ПС}}(t, \tau)$ — соответственно вероятности отсутствия сбоев (непредсказуемых и постепенных) процесса разработки документов по стандартизации, к которому применяется система мониторинга.

Если сбои независимы, энтропия мониторинга равна сумме энтропий, вызванных этими сбоями, рассчитывается по формуле (6).

$$H_0(X, t, \tau) = H_{\text{НС}}(X, t, \tau) + H_{\text{ПС}}(X, t, \tau), \quad (6)$$

где $H_{\text{НС}}(X, t, \tau) = - \{P_{\text{НС}}(X, t, \tau) \log_2 P_{\text{НС}}(X, t, \tau) + (1 - P_{\text{НС}}(X, t, \tau) \log_2 (1 - P_{\text{НС}}(X, t, \tau))\}$ рассчитан в соответствии с формулой (2).

$H_{\text{ПС}}(X, t, \tau) = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int P_{\text{ПС}}(X, t, \tau) \log_2 P_{\text{ПС}}(X, t, \tau) dX$ — энтропия, вызванная влиянием постепенных сбоев на выходные параметры системы мониторинга (здесь $f_{\text{ПС}}(X, t, \tau)$ — плотность распределения выходного параметра X , подверженного влиянию постепенных сбоев).

Оптимальный уровень неопределенности контролируемого процесса разработки документов по стандартизации выбирается из условия, обеспечивающего заданную вероятность выполнения процессом задачи (7).

$$H_{\text{ОПТ}}(X, t, \tau) = - \{P(X, t_{kk}, \tau_{kop}) \log_2 P(X, t_{kk}, \tau_{kop}) + [1 - P(X, t_{kk}, \tau_{kop})] \log_2 [1 - P(X, t_{kk}, \tau_{kop})]\}, \quad (7)$$

где $P(X, t_{kk}, \tau_{kop})$ — вероятность того, что процесс разработки документов по стандартизации, а также система мониторинга завершат выполнение задачи в интервале времени (t_{kk}, τ_{kop}) , который начинается в момент завершения мониторинга t_{kk} (окончание мониторинга) и прекращается в момент завершения контролируемого этапа процесса разработки документов по стандартизации τ_{kop} (окончание процесса).

Контрольное время τ_k должно быть сведено к минимуму, чтобы за единицу времени можно было получить максимальный объем информации с наибольшей надежностью.

Объем информации, получаемой системой мониторинга за определенный промежуток времени, определяется в соответствии с формулой (8).

$$I(t, \tau) = H_0(t, \tau) - H(t, \tau), \quad (8)$$

где $H_0(t, \tau)$ — энтропия, описывающая неопределенность контролируемого процесса разработки доку-

ментов по стандартизации до начала выполнения мониторинга. Определяется по формуле (6);

$H(t, \tau)$ — оставшаяся энтропия контролируемого процесса разработки документов по стандартизации после завершения мониторинга. Определяется по формуле (7).

Формула (8) описывает реальную информационную емкость системы мониторинга. Потенциальная эффективность системы мониторинга рассчитывается по формуле (9):

$$I_{\Pi} = H(t, \tau). \quad (9)$$

Эффективность системы мониторинга с информационной точки зрения может быть оценена по показателю (10):

$$\mathcal{E}_I(t, \tau) = \frac{I_p(t, \tau)}{I_{\Pi}(t, \tau)}, \quad (10)$$

где $I_p(t, \tau) = I_{\Pi}(t, \tau)$ — реальный объем информации, рассчитанный в соответствии с формулой (8).

Принимая во внимание формулы (8) и (9), получим показатель оценки эффективности системы мониторинга (11):

$$\mathcal{E}(t, \tau) = \frac{H_0(t, \tau) - H(t, \tau)}{H_0(t, \tau)}. \quad (11)$$

Исходя из формулы (11) видно, что идеальная система мониторинга будет иметь значение эффективности $\mathcal{E}(t, \tau) = 1$, а реальная — значение $\mathcal{E}_I(t, \tau) < 1$. Однако показатель $\mathcal{E}_I(t, \tau)$ не учитывает динамику мониторинга, а также сложность и стоимость системы мониторинга. Эти недостатки могут быть устранены путем введения другого коэффициента эффективности системы мониторинга (12).

$$\mathcal{E}(t, \tau) = \frac{K_I(t, \tau)}{H_{I_0}(t, \tau)}, \quad (12)$$

где $K_I(t, \tau) = \frac{I_{\max}(t, \tau)}{C_{\Sigma}(t, \tau)}$ — это максимальный объем информации, получаемой системой мониторинга за единицу ее общей стоимости.

$I_{\max}(t, \tau) = \sum_{i=1}^m I_{\max}(t, \tau)$ — это максимальный объем информации, получаемой при мониторинге процесса разработки документов по стандартизации по m -параметрам.

$K_{I_0}(t, \tau) = \frac{I_{\max \max}(t, \tau)}{C_{\min}(t, \tau)}$ — это максимальный средний объем информации, получаемой системой мониторинга при мониторинге процесса разработки документов по стандартизации по m -параметрам на единицу минимальной общей стоимости идеальной системы мониторинга.

$I_{\max \max}(t, \tau) = \sum_{i=1}^m I_{\max \max}(t, \tau)$ — это максимальный средний объем информации, получаемый при мониторинге процесса разработки документов по стандартизации с помощью m -параметров.

Таким образом, оценка эффективности системы мониторинга процесса разработки документов по стандартизации представляет выражение, изложенное в формуле (13),

$$\mathcal{E}(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^m [H_{0i}(t, \tau) - H_i(t, \tau)] C_{\min}(t, \tau)}{m \sum_{i=1}^m C_i(t, \tau)}. \quad (13)$$

Выводы. Система мониторинга должна обеспечивать отслеживание изменений в требованиях к информационным ресурсам, возникающим в процессе разработки документов по стандартизации. Возможно применение нескольких методов контроля для системы мониторинга — прямой контроль, косвенный контроль, параметрический контроль.

Сформулированы требования к системе мониторинга и оценки процессов разработки документов по стандартизации.

В том числе разработаны показатели, по которым проводится мониторинг процесса и которые сгруппированы по основным разделам — время выполнения процесса, стоимость процесса, надежность процесса, устойчивость процесса, операционные риски, метрические показатели сбоев процесса.

Разработанный порядок оценки эффективности системы мониторинга включает:

— расчет энтропии каждой подсистемы системы мониторинга до начала выполнения мониторинга;

— расчет энтропии контролируемого процесса с учетом энтропии системы мониторинга, вызванной ошибками, имеющими место в ходе выполнения мониторинга;

— расчеты эффективности системы мониторинга процесса разработки документов по стандартизации в установленном порядке.

Диапазон критериев показателя эффективности соответствует условию $0 \leq \mathcal{E}(t, \tau) \leq 1$.

Современные высокоэффективные системы мониторинга для применения в процессе разработки документов по стандартизации с перспективой внедрения в цифровые двойники процесса разработки документов по стандартизации должны иметь показатель эффективности, близкий к единице.

Библиографический список

1. Назаренко М. А., Филиппов А. А. Особенности сквозного интегрированного управления качеством // Управление качеством: избранные науч. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 12–13 марта 2020 г. Москва: Изд-во МАИ, 2020. С. 190–194. EDN: DAJJPZ.
2. Васильева Е. В., Деева Е. А., Неизвестный С. И. Метрики оценки эффективности процессов цифровизации документационного обеспечения подготовки нормативных актов // Вестник Академии знаний. 2023. № 2 (55). С. 299–302. EDN: PMIJM.
3. Кочеткова Е. В. Критерии оценки эффективности бизнес-процессов предприятия в условиях цифровизации // Интеллектуальные ресурсы — региональному развитию. 2022. № 1. С. 177–182. EDN: TGXLHU.
4. Полянсков Ю. В., Железнов О. В., Липатова С. В. [и др.]. Комплексная модель оценки деятельности предприятия как элемент развития системы управления цифровым производством // Цифровизация как драйвер роста науки и образования: моногр. Петрозаводск: МЦНП Новая Наука, 2020. С. 111–136.
5. Князев А. В., Черемухина Ю. Ю. Проблематика разработки стандартов по обеспечению развития метавселенных // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 4. С. 61–67. DOI: 10.46418/2619-0729-2022-4-12. EDN: GWDGGX.
6. Князев А. В., Черемухина Ю. Ю. Нормативно-методическое обеспечение стандартизации технологий блокчейн // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 91–96. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-91-96. EDN: LCZCWT

7. Knyazev A., Cheremukhina J. Mining Standard Development in Information and Communication Technologies for Education // 2023 3rd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE). 2023. P. 120–123. DOI: 10.1109/TELE58910.2023.10184383.

8. Knyazev A., Cheremukhina J. Regulatory and Methodological Support for the Mixed Reality Technology in Education // 2022 2nd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE). 2022. P. 37–39. DOI: 10.1109/TELE55498.2022.9801029.

9. Зажигалкин А. В., Пугачев В. М., Петросян А. Е. Цифровая экономика и будущее стандартизации // Стандарты и качество. 2017. № 9. С. 30–34. EDN: ZHTVNI.

10. Об утверждении предварительного национального стандарта: приказ Росстандарта от 11 июля 2023 г. № 22-пнст. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

11. Шадрин И. В., Дьячук П. П., Бажин Д. С. Динамические компьютерные тесты учебной деятельности. Красноярск: Изд-во КГПУ имени В. П. Астафьева, 2015. 216 с. EDN: UJANZN.

КНЯЗЕВ Александр Васильевич, аспирант кафедры электроники МИРЭА — Российского технологического университета (РТУ МИРЭА), г. Москва.

SPIN-код: 3652-8569

AuthorID (РИНЦ): 1092332

Адрес для переписки: knyazev.a.v4@edu.mirea.ru

ЧЕРЕМУХИНА Юлия Юрьевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электроники РТУ МИРЭА, г. Москва.

SPIN-код: 8230-3472

AuthorID (РИНЦ): 847834

Адрес для переписки: cheremukhina@mirea.ru

Для цитирования

Князев А. В., Черемухина Ю. Ю. Разработка показателей оценки эффективности системы мониторинга процесса разработки документов по стандартизации с применением информационных технологий // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 37–42. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-37-42.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023 г.

© А. В. Князев, Ю. Ю. Черемухина

DEVELOPMENT OF INDICATORS FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE MONITORING SYSTEM FOR DEVELOPMENT OF STANDARDIZATION DOCUMENTS USING INFORMATION TECHNOLOGY

The article presents the results of the development of indicators for monitoring the process of developing standardization documents. An integral part of the management of the standardization document development process is the monitoring system. The monitoring system allows you to monitor and control key indicators of the standardization document development process. Also, the use of a monitoring system makes it possible to form a reference base for analyzing the causes of deviations in the values of indicators. At the same time, an important task is to evaluate the effectiveness of the monitoring system and the mathematical justification of the indicator for evaluating the effectiveness of the monitoring system, taking into account errors in the implementation of the monitoring process.

Keywords: information technology, monitoring system, process control, indicators, standards development, quality management.

References

1. Nazarenko M. A., Filippov A. A. Osobennosti skvoznoogo integrirovannogo upravleniya kachestvom [Features of end-to-end integrated quality management] // *Upravleniye kachestvom. Quality Management*. Moscow, 2020. P. 190–194. EDN: DAJPZ. (In Russ.).
2. Vasil'yeva E. V., Deyeva E. A., Neizvestnyy S. I. Metriki otsenki effektivnosti protsessov tsifrovizatsii dokumentatsionnogo obespecheniya podgotovki normativnykh aktov [Metrics for evaluating the effectiveness of digitalization processes of documentation support for the preparation of regulations] // *Vestnik Akademii znaniy. Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2023. No. 2 (55). P. 299–302. EDN: PMIJM. (In Russ.).
3. Kochetkova E. V. Kriterii otsenki effektivnosti biznes-protsessov predpriyatiya v usloviyakh tsifrovizatsii [Criteria for evaluating the effectiveness of an enterprise's business processes in the context of digitalization] // *Intellectual'nyye resursy-regional'nomu razvitiyu. Intellectual Resources for Regional Development*. 2022. No. 1. P. 177–182. EDN: TGXLHU. (In Russ.).
4. Polyanskov Yu. V., Zheleznov O. V., Lipatova S. V. [et al.]. Kompleksnaya model' otsenki deyatel'nosti predpriyatiya kak element razvitiya sistemy upravleniya tsifrovym proizvodstvom [A comprehensive model for evaluating the activity of an enterprise as an element of the development of a digital production management system] // *Tsifrovizatsiya kak drayver rosta nauki i obrazovaniya [Digitalization as a driver of the growth of science and education]*. Petrozavodsk, 2020. P. 111–136. (In Russ.).
5. Knyazev A. V., Cheremukhina Yu. Yu. Problematika razrabotki standartov po obespecheniyu razvitiya metaverse [The problems of developing standards to ensure the development of metaverses] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo*

6. gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 4: Promyshlennyye tekhnologii. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design Series 4. Industrial Technologies*. 2022. No. 4. P. 61–67. DOI: 10.46418/2619-0729-2022-4-12. EDN: GWDGGX. (In Russ.).
7. Knyazev A. V., Cheremukhina Yu. Yu. Normativno-metodicheskoye obespecheniye standartizatsii tekhnologii blokcheyn [Regulatory and methodological support of blockchain technologies] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 91–96. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-91-96. EDN: LCZCWT. (In Russ.).
8. Knyazev A., Cheremukhina J. Mining Standard Development in Information and Communication Technologies for Education // 2023 3rd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE). 2023. P. 120–123. DOI: 10.1109/TELE58910.2023.10184383. (In Engl.).
9. Knyazev A., Cheremukhina J. Regulatory and Methodological Support for the Mixed Reality Technology in Education // 2022 2nd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE). 2022. P. 37–39. DOI: 10.1109/TELE55498.2022.9801029. (In Engl.).
10. Zazhigalkin A. V., Pugachev V. M., Petrosyan A. E. Tsifrovaya ekonomika i budushcheye standartizatsii [The digital economy and the future of standardization] // *Standarty i kachestvo. Standards and Quality*. 2017. No. 9. P. 30–34. EDN: ZHTVNJ. (In Russ.).
11. Ob utverzhdenii predvaritel'nogo natsional'nogo standarta: prikaz Rosstandarta ot 11 iyulya 2023 g. № 22-pnst [On Approval of the Preliminary National Standard: Rosstandart Order of 11 July 2023, No. 22-pnst]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).
12. Shadrin I. V., D'yachuk P. P., Bazhin D. S. Dinamicheskiye komp'yuternyye testy uchebnoy deyatel'nosti [Dynamic computer

tests of educational activities]. Krasnoyarsk, 2015. 216 p. EDN: UJAHZN. (In Russ.).

KNYAZEV Aleksandr Vasilyevich, Graduate Student of Electronics Departments, MIREA — Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow.

SPIN-code: 3652-8569

AuthorID (RSCI): 1092332

Correspondence address: knyazev.a.v4@edu.mirea.ru

CHEREMUKHINA Yuliya Yuryevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electronics Departments, RTU MIREA, Moscow.

SPIN-code: 8230-3472

AuthorID (RSCI): 847834

Correspondence address: cheremukhina@mirea.ru

For citations

Knyazev A. V., Cheremukhina Yu. Yu. Development of indicators for evaluating the effectiveness of the monitoring system for development of standardization documents using information technology // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 37 – 42. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-37-42.

Received December 12, 2023.

© A. V. Knyazev, Yu. Yu. Cheremukhina

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КАК ФАКТОРА, ВЛИЯЮЩЕГО НА ВРЕМЯ ЦИКЛА СБОРКИ ИЗДЕЛИЯ

В настоящее время организация отечественного серийного выпуска высокотехнологичных изделий требует больших временных затрат. Это связано, с одной стороны, с перестройкой логистических цепочек с иностранными поставщиками, с другой — с выстраиванием взаимодействия кооперации внутри страны. Сроки реализации перспективных производственных проектов, например, в космической отрасли, по-прежнему исчисляются годами, что заставляет предприятия задумываться о смене подходов в первую очередь к своей работе — в таком случае сокращение времени собственного производственного цикла является одним из главных способов повлиять на длительные сроки. Как правило, при анализе организации серийного производства начинают с окончательной сборки, которая задаёт темп работы всем остальным участкам, изготавливающим составные части.

При оценке эффективности организации сборочного производства необходимо определить критерий и факторы. За критерий эффективности принимается время цикла сборки изделия. Факторы, влияющие на критерий, требуют определения степени значимости и понимания их взаимного влияния друг на друга.

Целью исследования является разработка единой системы факторов, влияющих на время цикла сборки изделия, и основанный на этой системе способ оценки эффективности организации сборочного производства. В рамках настоящей статьи исследуется технология производства как фактор, влияющий на время цикла сборки изделия.

Ключевые слова: технологический процесс, технология производства, серийное производство, производственный цикл, сборка изделия, потери, время такта.

Введение. Процесс организации серийного производства высокотехнологичных изделий сложен и требует принятия быстрых и качественных решений, особенно в условиях настоящего времени — в век нестабильности и изменчивости человеческих отношений, в период, когда темпы накопления научных знаний стали превосходить способность человечества анализировать их и находить им применение. Скорость, с которой теперь окружающий нас мир движется вперёд, не даёт возможности замедлиться и подумать, а куда ли мы идём, — понимание правильности и целесообразности принятых решений, как в философии экзистенциалистов, приходит только после непосредственно совершённого действия. В обычную жизнь отдельно взятого человека это привносит элементы спонтанности и ощущения настоящего момента, но в жизни промышленной компании такое положение дел может привести к необратимым последствиям. Это говорит о том, что горизонт планирования стремительно сокращается, степень предсказуемости хода внешних событий уменьшается кратно, однако сроки

реализации перспективных производственных проектов по-прежнему исчисляются годами. Время — ценнейший ресурс, и будущее за теми, кто грамотно им воспользуется в настоящем.

Цель исследования. Оценка влияния фактора «технология производства» на время цикла сборки изделия.

Основная часть. Как известно, одним из способов повлиять на длительные сроки реализации проектов, связанных с серийным выпуском новой продукции, является сокращение цикла изготовления изделий. Производственный процесс включает в себя процесс разработки, испытания и изготовления изделия. В настоящей работе исследуется процесс изготовления, а именно сборка изделия. Для определенности скажем, что изделие — это единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться штуками (экземплярами). Технологический процесс — часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. Согласно стандартному определению

нию, технологическая операция (ОП) — законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте (РМ), однако в настоящей работе полагается, что на одном РМ может выполняться больше одной ОП [1].

В организации серийного производства ключевым понятием для формирования исходных данных для планирования является время такта, оно определяется как фиксированное расчётное время нахождения изделия на одном рабочем месте: время выполнения заказа T , делённое на одно изделие N , (1):

$$T_T = \frac{T}{N}. \quad (1)$$

Время такта может включать в себя как время выполнения одной операции, так и нескольких. Фактическое время сборки изделия (сумма времён выполнения последовательных операций) есть время цикла.

Разработка технологического процесса должна учитывать планируемую серийность изготовления изделия. Тип производства характеризуется коэффициентом серийности (коэффициентом закрепления операций), который определяется как число всех технологических операций n к числу рабочих мест m . Он показывает число операций n , приходящихся на одно рабочее место m , (2):

$$K_{s.o} = \frac{n}{m}, \quad (2)$$

для $K_{s.o}$ определены следующие значения:

$1 = K_{s.o} < 10$ — при массовом и крупносерийном производстве;

$10 < K_{s.o} < 20$ — при среднесерийном производстве;

$20 < K_{s.o} < 40$ — при мелкосерийном производстве;

$K_{s.o}$ не регламентируется — при единичном производстве [2].

Коэффициент серийности имеет функциональную зависимость с количеством изделий в партии (позволяя определить её оптимальное значение), что, в свою очередь, напрямую влияет на время производственного цикла и эффективность организации серийного производства [3]. В теории бережливого производства вся работа исполнителя делится на полезную работу и на потери. Полезной работой будем называть ту, что добавляет ценность, потерями — всю ту работу, что потребляет ресурсы и не приносит ценности для заказчика.

Выделяют 7 видов потерь: перепроизводство, избыток запасов, транспортировка, задержки, дополнительная обработка, перемещения, дефекты [4, 5]. К ним добавляют неиспользованный человеческий потенциал.

Заказчики дают исходные данные в виде потребности в количестве и номенклатуре изделий. Предприятие располагает фондом времени. На основании этих значений рассчитывается время такта. Исследуем влияние технологии производства на время цикла сборки изделия с точки зрения времени такта. Условно покажем технологический процесс сборки изделия (рис. 1).

На рис. 1:

$ОП_1, ОП_2, \dots, ОП_i$ — технологические операции;

T_1, T_2, \dots, T_i — время выполнения соответствующих технологических операций.

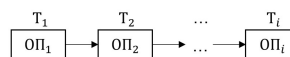


Рис. 1. Технологический процесс сборки изделия

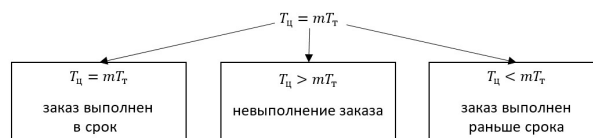


Рис. 2. Варианты соотношения $T_{ц}$ и T_T

Формула 3 для расчёта времени цикла сборки $T_{ц}$ изделия А:

$$T_{ц} = \sum_{i=1}^n T_i. \quad (3)$$

При известном требуемом времени такта T_T можно рассчитать требуемое количество рабочих мест и, соответственно, понять количество операций, выполняемых на одном рабочем месте, что позволит определить тип производства. В граничных условиях имеется либо единичное производство с одним рабочим местом сборки изделия, либо крупносерийное, где на одно рабочее место приходится одна технологическая операция процесса сборки. С точки зрения возможных вариантов распределения операций между рабочими местами наибольший интерес представляет случай мелкосерийного сборочного производства высокотехнологичных изделий.

Как правило, время выполнения технологической операции содержит в себе потери и может быть сокращено. В таком случае можно сказать, что время выполнения технологической операции T_i состоит из полезной работы T_{ni} и потерь ΔT_i (4):

$$T_i = T_{ni} + \Delta T_i. \quad (4)$$

Таким образом (5),

$$T_{ц} = \sum_{i=1}^n T_{ni} + \sum_{i=1}^n \Delta T_i. \quad (5)$$

В серийном производстве время нахождения изделия T_m на одном рабочем месте равно времени такта T_T , тогда требуемое время цикла можно почитать по формуле 6:

$$T_{ц} = mT_T. \quad (6)$$

Однако соотношение времени цикла и времени такта может нарушаться в связи с наличием потерь. Возможны три случая (рис. 2). Рассмотрим каждый из них.

1. $T_{ц} = mT_T$

Такая ситуация подразумевает факт выполнения заказа в срок, однако не гарантирует отсутствия потерь. Можно сказать, что технологический процесс в данном варианте адаптирован под серийную сборку изделия с заданным тактом. Возможно сокращение времени цикла за счёт активации скрытых резервов повышения производительности. Отметим, что равенство $m = n$ (количество рабочих мест равно количеству технологических операций) указывает на массовое производство.

$$2. T_u > mT_r$$

Данный вариант ведёт к невыполнению заказа из-за нарушения требуемых заказчику сроков изготовления. Применительно к серийному производству можно сказать, что время такта в таком случае определяется самым большим временем нахождения изделия на определённом рабочем месте — «узкое место» данного процесса.

Узким местом называют явление, которое ограничивает пропускную способность системы. Согласно теории ограничений, каждая система неизбежно ограничена узким местом. Узкие места делятся на краткосрочные (поломка оборудования, отсутствие уникального сотрудника) и долгосрочные (пропускная способность испытательного стенда). Для поиска «узких мест» применяют два способа: наблюдение и визуализацию.

В результате непосредственного наблюдения, например, можно увидеть:

- скопление незавершённого производства (узкое место — процесс, который собирает перед собой наибольшую очередь единиц изделий);

- простои и ожидания оборудования (оборудование простаивает, поскольку не получает достаточно материала для непрерывной работы. Предполагаемое узкое место — предыдущая операция процесса);

- длительную переналадку оборудования.

Визуализация включает в себя построение карты потока создания ценности и её последующий анализ на предмет наличия узких мест.

В сложных системах, к которым относится производственный процесс, узкие места являются динамическими, поэтому кроме их непосредственного выявления необходимо также предиктивно анализировать места их возможного появления в будущем.

Возможные причины, по которым наблюдаемое время цикла больше расчётного:

2.1. $T_u = mT_r + \sum_{i=1}^n \Delta T_i$, $\sum_{i=1}^n \Delta T_i > 0$: технологический процесс адаптирован под серийную сборку, то есть выстроен с учётом расчётного времени T_r , но фактическое время выполнения операций на рабочих местах больше на $\sum_{i=1}^n \Delta T_i$.

Проблема заключается в наличии потерь в процессе. Решение проблемы, очевидно, состоит в устранении потерь (рис. 3).

На современных предприятиях часто возникают проблемы, связанные с построением внутризаводской логистической системы, что служит причиной существенного увеличения как временных, так и материальных затрат. Эти проблемы приводят к неравномерности расходования материалов, возникновению простоев в производственном цикле и в то же время к перегрузке отдельных производственных участков. Плохо организованные внутризаводские перемещения оказывают дополнительное негативное влияние на длительность производственного цикла изготовления продукции и появление излишних запасов. Преодолеть эти затруднения можно за счёт оптимизации производственного процесса [6].

Например, с помощью разработанной Лийн Е. А. диаграммы состояний, которая отражает связи и условия переходов между состояниями, можно обнаружить время ожиданий в технологическом процессе [7].

2.2. $T_u = \sum_{i=1}^n \Delta T_i^n$, технологический процесс не адаптирован под серийную сборку — имеется последовательность технологических операций,

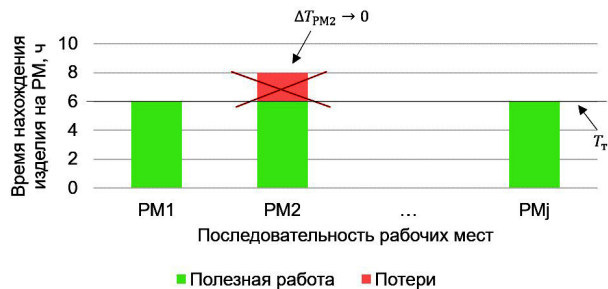


Рис. 3. Решение проблемы устранением потерь

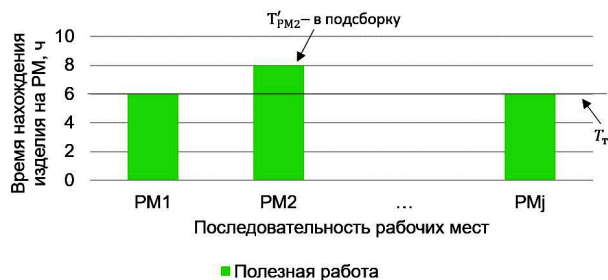


Рис. 4. Решение проблемы выносом части работ в подставку

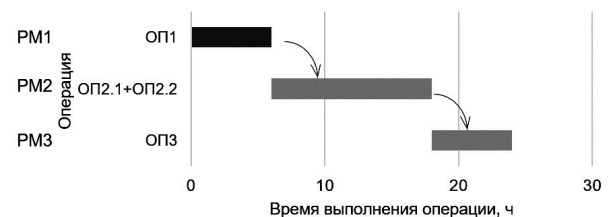


Рис. 5. Диаграмма Ганта до изменений

время такта отсутствует. Ситуация наблюдается при переходе от единичного производства изделия к серийному.

Первым шагом необходимо рассчитать значение T_r . Далее, зная время выполнения технологических операций, необходимо рассчитать количество PM . Введём понятие «балансировки», балансировка — это процесс перераспределения операций / исполнителей между PM с целью синхронизации времени такта и времени нахождения изделия на PM T_m сборки. Синхронизацией называем либо равенство суммарного времени выполнения операций на PM T_m и времени такта T_r , либо их кратность. Главной целью балансировки является минимизация простоя оборудования и (или) исполнителя [8]. Стоит упомянуть, что организация труда нескольких исполнителей на одном рабочем месте способствует сокращению цикла сборки и высвобождению площадей [9].

Рассмотрим способы синхронизации T_m и T_r .

2.2.1. $T_m > T_r$:

а) вынос в подставку — способ синхронизации T_m и T_r , заключающийся в создании дополнительного PM' , на котором выполняется часть операций основного PM (рис. 4).

б) если T_m кратно больше T_r , то возможно создание дополнительных PM' без изменения T_m и организация параллельной работы этих PM' со сдвижкой по времени. Чем больше таких мест, тем выше уровень запасов по материалам.

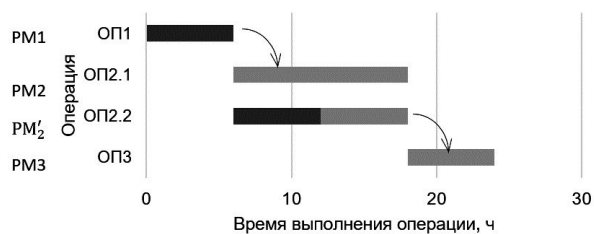


Рис. 6. Диаграмма Ганта, иллюстрирующая решение проблемы созданием дополнительных рабочих мест

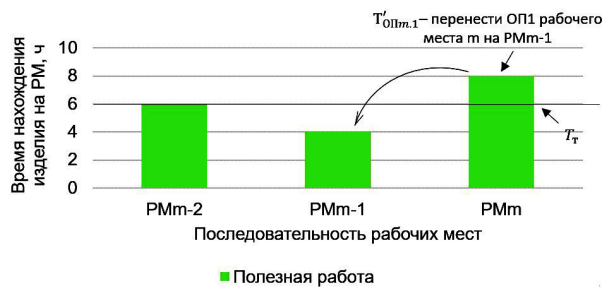


Рис. 7. Решение проблемы перераспределением технологических операций между рабочими местами

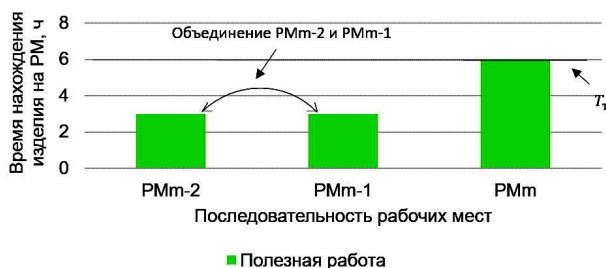


Рис. 8. Решение проблемы объединением рабочих мест

На рисунках ниже проиллюстрирован пример решения проблемы, когда $T_{PM2} = T_{OP2.1} + T_{OP2.2} = 2T_T$. Как было сказано выше, наблюдаемое время такта определяется самым большим временем T_m , то есть в рассматриваемом примере в 2 раза больше требуемого (рис. 5). Создаём PM'_2 (рис. 6), что позволяет достигнуть равенства $T_m = T_T$: на PM'_2 в начальный момент времени имеется запас, выполнение ОП1 и ОП2.2 начинается одновременно.

в) существенное изменение технологической операции, например: оптимизация режимов работы, применение новой технологии и т.п.

2.2.2. $T_{m-1} < T_T < T_m$, если время нахождения изделия на одном PM меньше T_T , а на соседнем с ним больше T_T .

Решение проблемы возможно за счёт перераспределения операций между рабочими местами, если это допустимо технологическим процессом (рис. 7).

1. $T_u < mT_T$. Заказ выполнен раньше срока — это ведёт к таким потерям, как перепроизводство и ожидание. Возможные варианты синхронизации T_m и T_T :

— существенное изменение технологической операции, например: оптимизация режимов работы, применение новой технологии и т.п.;

— уменьшение количества исполнителей / рабочих смен;

— объединение соседних рабочих мест в одно PM (рис. 8).

Кроме того, существенным является понимание номенклатуры производимых изделий, поскольку это определяет и технологию сборки изделий, и способ планирования загрузки сборочной линии. Виды сборочных линий по номенклатуре изделий:

1. Сборка одного типа изделия.

2. Сборка нескольких типов изделия:

2.1. Смешанная (когда переналадка оборудования не требуется или её время мало).

2.2. Партийная (когда требуется переналадка оборудования, время которой сравнимо со временем выполнения работы).

Выводы. Таким образом, были рассмотрены три варианта соотношения наблюдаемого времени цикла сборки изделия к расчётному времени такта и определены способы синхронизации времени цикла и времени такта сборки изделия:

1. $T_u = mT_T$. Выполнение заказа в срок, то есть фактическое время нахождения изделия на рабочем месте равно расчётному времени такта T_T .

2. $T_u = mT_T$. Невыполнение заказа. Ситуация возможна при двух случаях:

2.1. $T_u = mT_T + \sum_{i=1}^n \Delta T_i$, $\sum_{i=1}^n \Delta T_i > 0$: технологический процесс адаптирован под серийную сборку, то есть в теории выстроен с учётом расчётного времени T_T , но фактическое время выполнения операций на рабочих местах больше на $\sum_{i=1}^n \Delta T_i$. Проблема — в наличии потерь. Решение — устранение потерь.

2.2. $T_u = \sum_{i=1}^n T_i^n$, технологический процесс не адаптирован под серийную сборку — имеется последовательность технологических операций, время такта отсутствует. Решения:

2.2.1. $T_m > T_T$:

а) вынос в подсборку;

б) если T_m кратно больше T_T , то возможно создание дополнительных PM' без изменения T_m и организация параллельной работы этих PM' ;

в) существенное изменение технологической операции, например: оптимизация режимов работы, применение новой технологии и т.п.

2.2.2. $T_{m-1} < T_T < T_m$, если время нахождения изделия на одном PM меньше T_T , а на соседнем с ним больше T_T ;

г) перераспределение операций между рабочими местами.

3. $T_u < mT_T$. Заказ выполнен раньше срока — это ведёт к таким потерям, как перепроизводство и ожидание. Решения:

— существенное изменение технологической операции;

— уменьшение количества исполнителей / рабочих смен;

— объединение соседних рабочих мест в одно PM .

Заключение. Применяемые технологии сборки изделия определяют полезное время выполнения технологических операций, что, в свою очередь, напрямую влияет на пропускную способность сборочного участка. Кроме того, технологиями ограничивается и гибкость производственной системы, то есть возможность менять последовательность операций, способность изготавливать на одном участке несколько типов изделий, а также адаптировать ресурсы под работу с разным тактом выпуска.

Директивная технологическая документация содержит в себе укрупнённые схемы последователь-

ности сборки изделия и его составных частей, что является, во-первых, исходными данными для разработки концепции участка окончательной сборки, во-вторых, позволяет создать первичное видение планировки рабочих мест уже на этапе создания первых опытных образцов, и, в-третьих, закладывает возможность изготовления на одних и тех же рабочих местах нескольких типов изделий.

Поскольку, с точки зрения потерь, важно обеспечить не просто выполнение заказа, но точно в срок [10, 11], одним из ключевых моментов при организации серийной сборки является применение метода балансировки загрузки рабочих мест с целью эффективного использования ресурсов в условиях расчётного времени такта.

Таким образом, фактор «технология производства» существенно влияет на время цикла сборки изделия. На этапе проектирования сборочного участка важно учитывать возможные объёмы и номенклатуру изготавливаемых изделий, а также в последующем не упускать из виду и своевременно внедрять новые принципы и подходы, позволяющие как упростить работу исполнителей, так и сократить производственный цикл.

Библиографический список

1. ГОСТ 57945-2017. Система технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий космической техники. Термины и определения. Введ. 2018–06–01. Москва: Стандартинформ, 2018. 15 с.
2. ГОСТ 3.1121-84. Общие требования к комплексности и оформлению комплектов документов на типовые и групповые технологические процессы (операции). Введ. 1986–01–01. Москва: Стандартинформ, 2012. 48 с.
3. Сатановский Р. А., Элект Д. Трансформация ключевого показателя управления эффективной организации серийного производства // Организатор производства. 2023. Т. 31, № 1. С. 34–47. DOI: 10.36622/VSTU.2023.94.85.003. EDN: VQIODV.
4. ГОСТ 56020-2020. Бережливое производство. Основные положения и словарь. Введ. 2021–08–01. Москва: Стандартинформ, 2020. 20 с.
5. Темасова Г. Н., Леонов О. А., Шкаруба Н. Ж. [и др.]. Внедрение элементов бережливого производства на промышленных предприятиях // Компетентность. 2023. № 6. С. 41–46. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-6-41-46. EDN: JKHКСМ.
6. Лийн Е. А., Хомутская О., Ванцов С. Применение методов алгоритмизации в процессе имитационного модели-

рования технологических процессов // Электроника: наука, технология, бизнес. 2023. № 1. С. 122–127. DOI: 10.22184/1992-4178.2023.222.1.122.127.

7. Лийн Е. А., Коробков М. А., Хомутская О. В. [и др.]. Формализация работы производственного участка для разработки имитационной модели выполнения сменно-суточного задания // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 5. С. 212–215.
8. Kaushik A. K., Dwivedi A. A Review on Assembly Line Balancing by Different Approaches // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology. 2023. Vol. 10, Issue 3. P. 619–625. DOI: 10.32628/IJSRSET23103174.
9. Tkitek Z., Triki H., Frikha H. Review of Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem // Fifth International Conference of the Tunisian Operational Research Society. 2022. P. 1–5.
10. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / пер. с англ. Москва: Изд-во ИКСИ, 2005. 192 с. ISBN 5-902677-04-1.
11. Сиге С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / пер. с англ. Москва: Изд-во ИКСИ, 2006. 312 с. ISBN 5-903148-03-4.

ПОНОМАРЕВА Виктория Сергеевна, магистрант гр. МЗО-211М-22 Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет) (МАИ), г. Москва.

Адрес для переписки: ponomaryovavika21@gmail.com

ХОМУТСКАЯ Ольга Владиславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровые технологии и информационные системы» МАИ, г. Москва.

SPIN-код: 8207-4130

AuthorID (РИНЦ): 1061146

Адрес для переписки: Khomutskayaov@gmail.com

Для цитирования

Пономарева В. С., Хомутская О. В. Исследование технологии производства как фактора, влияющего на время цикла сборки изделия // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 43–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-43-49.

Статья поступила в редакцию 14.12.2023 г.

© В. С. Пономарева, О. В. Хомутская

RESEARCH OF PRODUCTION TECHNOLOGY AS A FACTOR INFLUENCING THE TIME OF THE PRODUCT ASSEMBLY CYCLE

Nowadays the organization of domestic serial production of high-tech products requires a lot of time. On the one hand, the reason is the restructuring of logistics chains with foreign suppliers, on the other hand, the building of cooperation in the country. For example, the duration of the implementation of promising production projects in the space industry is still years. Factories are changing approaches in the organization of work – one of the main ways to influence the duration of production is to reduce the time of their own production cycle. As a rule, the analysis of the organization of serial production begins with the final assembly, which determines the fact of work for all other sites that produce components.

When evaluating the effectiveness of the organization of assembly production, criteria and factors are determined. The time of the product assembly cycle is taken as the efficiency criterion. It is necessary to determine the degree of significance for each factor and understand their mutual influence on each other.

The purpose of the research is to develop a unified system of factors affecting the cycle, and a method based on this system for evaluating the effectiveness of the organization of assembly production. The article considers the technological process as a factor affecting the product assembly cycle.

Keywords: technological process, production technology, serial production, cycle reduction, assembly line.

References

1. GOST 57945-2017. Sistema tekhnologicheskogo obespecheniya razrabotki i postanovki na proizvodstvo izdeliy kosmicheskoy tekhniki. Terminy i opredeleniya [System of technological providing for development and raising production of wares of space technology. Terms and definitions]. Moscow, 2018. 15 p. (In Russ.).
2. GOST 3.1121-84. Obshchie trebovaniya k kompleksnosti i oformleniyu komplektov dokumentov na tipovye i grupповые tekhnologicheskie protsessy (operatsii) [Unified system of technological documentations. General requirements for completeness and arrangement of sets of documents on typical and group technological processes (operations)]. Moscow, 2012. 48 p. (In Russ.).
3. Satanovskiy R. L., Ellent D. Transformatsiya klyuchevogo pokazatelya upravleniya effektivnoy organizatsii seriynogo proizvodstva [Transformation of the key management indicator of effective series production organization] // Organizator proizvodstva. *Organizer of Production*. 2023. Vol. 31, no. 1. P. 34–47. DOI: 10.36622/VSTU.2023.94.85.003. EDN: VQIODV. (In Russ.).
4. GOST 56020-2020. Berezhlivoe proizvodstvo. Osnovnyye polozheniya i slovar' [Lean production. Fundamentals and vocabulary]. Moscow, 2020. 15 p. (In Russ.).
5. Temasova G. N., Leonov O. A., Shkaruba N. Zh. [et al.]. Vnedrenie berezhlivogo proizvodstva na promyshlennykh predpriyatiyakh [Introduction of Lean Production Elements in Industrial Enterprises] // Kompetentnost'. *Competency*. 2023. No. 6. P. 41–46. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-6-41-46. EDN: JKHKCM. (In Russ.).
6. Lijn E., Khomutskaya O., Vantsov S. Primeneniye metodov algoritimizatsii v protsesse imitatsionnogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov [Application of algorithmic methods in the process of process of simulation modeling of technological processes] // Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2023. No. 1. P. 122–127. DOI: 10.22184/1992-4178.2023.222.1.122.127. (In Russ.).
7. Lijn E. A., Korobkov M. A., Khomutskaya O. V. [et al.]. Formalizatsiya raboty proizvodstvennogo uchastka dlya rasrabotri imitatsionnoy modeli vypolneniya smenno-sutochnogo zadaniya [Formalization of the work of the production site for the development of a simulation model for performing a daily task] // Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2023. No. 5. P. 212–215. (In Russ.).
8. Kaushik A. K., Dwivedi A. A Review on Assembly Line Balancing by Different Approaches // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology. 2023. Vol. 10, Issue 3. P. 619–625. DOI: 10.32628/IJSRSET23103174. (In Engl.).
9. Tkitek Z., Triki H., Frikha H. Review of Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem // Fifth International Conference of the Tunisian Operational Research Society. 2022. P. 1–5. (In Engl.).
10. Ohno T. Proizvodstvennaya Sistema Toyoty. Ukhodya ot massovogo proizvodstva [Toyota Production. Beyond Large-Scale Production] / trans. from Engl. Moscow, 2005. 192 p. ISBN 5-902677-04-1. (In Russ.).
11. Shigeo Sh. Izuchenie proizvodstvennoy sistemy Toyoty s tochki zreniya organizatsii proizvodstva [The Study of the Toyota

Production System From an Industrial Engineering Viewpoint] /
trans. from Engl. Moscow, 2006. 312 p. ISBN 5-903148-03-4.
(In Russ.).

PONOMAREVA Viktoria Sergeevna, Undergraduate,
gr. M3O-211M-22, Moscow Aviation Institute (National
Research University) (MAI), Moscow.

Correspondence address: ponomaryovavika21@gmail.
com

KHOMUTSKAYA Olga Vladislavovna, Candidate
of Technical Sciences, Associate Professor of Digital
Technologies and Information Systems Department,
MAI, Moscow.

SPIN-code: 8207-4130

AuthorID (RSCI): 1061146

Correspondence address: Khomutskayaov@gmail.com

For citations

Ponomareva V. S., Khomutskaya O. V. Research of production
technology as a factor influencing the time of the product
assembly cycle // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190).
P. 43 – 49. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-43-49.

Received December 14, 2023.

© V. S. Ponomareva, O. V. Khomutskaya

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗНАШИВАНИЯ БЫСТРОВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОПОРНОЙ ПАРЫ ТИПА «ИГЛА-ПОДПЯТНИК»

Опорная пара трения является важным узлом некоторых классов промышленного оборудования; на номинальных режимах работы скорость относительного вращения контактных поверхностей может достигать 10³ оборотов в секунду, при этом время работы может измеряться годами; в таких условиях необходимо принимать во внимание изнашивание контактных поверхностей; в данной работе предложена методика моделирования износа в условиях сухого трения быстровращающейся опорной пары трения с учетом изменения свойств материалов вследствие нагрева поверхности, основанная на решении износоконтактной задачи в стационарной постановке с использованием закона Арчарда; продемонстрировано влияние учета зависимости свойств материалов от температуры при моделировании процесса изнашивания.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, трение, износ, игла-подпятник, свойства материалов.

Введение. Опорная пара трения (камневая опора) — критически важный узел нескольких классов оборудования, таких как роторные системы, кинетические накопители энергии и другие, конструктивно схожие с ними агрегаты. Опорная пара трения типа «игла-подпятник» представляет собой совокупность двух элементов: иглы, чаще всего металлической, и подпятника, который может быть выполнен из различных материалов, как металлических, так и керамических. Типичная геометрическая конфигурация опорной пары показана на (рис. 1) [1].

На номинальных режимах работы оборудования игла относительно подпятника может вращаться с угловой скоростью порядка 10² ... 10³ оборотов в секунду. При этом на иглу действует осевая нагрузка, которую мы будем рассматривать как основную внешнюю воздействующую на опорную пару фактор. Помимо осевой нагрузки, на иглу может действовать и боковая сила, вызванная дисбалансом массы вращающейся роторной системы.

Комбинация действующих нагрузок и нелинейного динамического контактного взаимодействия формирует напряженно-деформированное состояние опорной пары трения, однако, кроме того, в процессе эксплуатации проявляется фактор, спо-

собный влиять на функционирование всего изделия — изнашивание контактных поверхностей иглы и подпятника.

Принято различать следующие виды изнашивания [2, 3]:

— абразивное изнашивание, имеющее место в контакте двух тел с существенно различающимися твердостями или при наличии в промежуточной среде твердых частиц;

— адгезионное изнашивание, имеющее место в контакте между телами, твердость которых одинакова или имеет один и тот же порядок;

— коррозионное изнашивание, связанное с химической модификацией поверхности и последующим удалением поверхностного слоя;

— усталостное изнашивание, возникающее при неоднократном нагружении поверхности в процессе скольжения или качения так, что каждый отдельный цикл нагружения не приводит к заметным изменениям поверхности.

Для повышения качества конструкции предлагается на этапе проектирования учитывать износ в опорной паре трения при различных режимах работы оборудования, принимая во внимание такие явления, как непостоянство вертикальной нагрузки, тепловыделение в контакте и температурные зави-

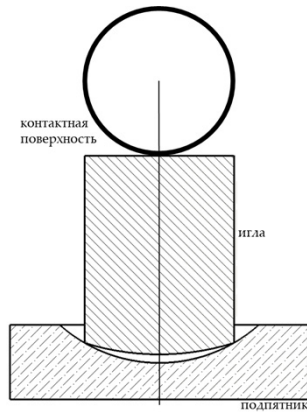


Рис. 1. Геометрическая конфигурация опорной пары

симости свойств контактирующих поверхностей, возможные боковые нагрузки.

Модель износа осесимметричной контактной пары. В данном исследовании мы не будем делать различий между видами изнашивания, поскольку математические описания феномена изнашивания для разных типов схожи [2].

В качестве основного соотношения для вычисления величины износа предлагается использовать закон Арчарда [4], согласно которому величина износа пропорциональна контактному давлению и относительному сдвигу контактных поверхностей.

Для численного моделирования процесса изнашивания в условиях сухого трения будем использовать программный комплекс ANSYS Mechanical, в котором реализован алгоритм вычисления износа контактирующих поверхностей, основанный на законе Арчарда, сформулированный в следующем виде [5]:

$$\dot{w} = \frac{k}{H} p^m v_{rel}^n, \quad (1)$$

где \dot{w} — скорость изнашивания, k — коэффициент износа, уникальный для каждого материала и зависящий от условий контактного взаимодействия, H — поверхностная твердость, p — контактное давление, v_{rel} — относительная сдвиговая скорость контактирующих поверхностей, m и n — показатели степеней, позволяющие видоизменять зависимость величины износа от давления и скорости.

С применением встроеного алгоритма возможно проводить оценку изнашивания контактной поверхности в трехмерной нелинейной нестационарной постановке, в том числе с использованием связанного термомеханического решателя.

Однако в случае быстровращающихся опорных пар трения, когда количество оборотов за рассматриваемый промежуток времени может достигать миллиардов единиц, прямое вычисление всех величин в нестационарной трехмерной постановке не представляется возможным.

В случае осесимметричной нагрузки возможно перейти в стационарную постановку. При этом в первом приближении можно ограничиться применением встроеной модели (1), явно не учитывая зависимость величины износа от скорости относительного сдвига ($n = 0$), однако неявно данная зависимость может быть приближенно учтена путем изменения значения коэффициента износа:

$$\bar{k} = k(\bar{r}\omega)^n, \quad (2)$$

где \bar{r} — среднее значение радиальной координаты контактной поверхности, ω — угловая скорость вращения иглы относительно подпятника.

Такой подход может быть использован в случае, когда диапазон значений радиальной координаты контактной поверхности является небольшим и размеры контактной поверхности не меняются в процессе изнашивания, но применительно к рассматриваемой геометрической конфигурации его применение будет давать большую погрешность.

С целью повышения уровня адекватности создаваемой модели предлагается отказаться от такого упрощенного подхода и использовать при расчете изнашивания программируемые пользовательские процедуры, позволяющие расширить базовую функциональность программного комплекса.

В ANSYS Mechanical имеется целый набор таких процедур, написанных на языке программирования Fortran, модифицируя которые пользователь имеет возможность задавать отличные от применяемых по умолчанию алгоритмы вычисления различных параметров.

В частности, внесение изменений в процедуру `userwear` позволяет реализовать иную от имеющейся по умолчанию зависимость скорости изнашивания от параметров контактного взаимодействия [6].

В рамках настоящей работы разработан алгоритм вычисления износа быстровращающейся опорной пары трения, работающий в стационарной двумерной осесимметричной (2.5D) и трехмерной (3D) постановках.

На рис. 2 показана система координат, применяемая во всех расчетах, проводимых в рамках данного исследования. Глобальная ось OY сонаправлена с осью вращения иглы, таким образом, геометрические параметры контактной поверхности будут вычисляться одинаково и в 2.5D, и в 3D постановках.

Относительная скорость сдвига контактных поверхностей вычисляется из соотношения:

$$v_{rel} = r\omega, \quad (3)$$

где ω — угловая скорость вращения иглы относительно подпятника, а r — радиальная координата точки контактной поверхности, определяемая как

$$r = \sqrt{x^2 + z^2}, \quad (4)$$

где x и z — декартовы координаты точки контактной поверхности в указанной системе координат.

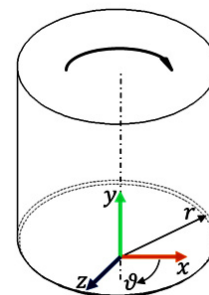


Рис. 2. Система координат для вычисления износа

Угловая координата точки на контактной поверхности отсчитывается от положительного направления оси OX и вычисляется из соотношения:

$$\vartheta = \arctan \frac{z}{x}. \quad (5)$$

Поскольку контактная поверхность подпятника в изначальном состоянии является сферической, то подобное определение координаты точки на контактной поверхности (без учета величины y) будет однозначным.

Решая задачу в стационарной постановке, мы переходим от нагружения во временной области к линейно меняющейся нагрузке за один расчетный шаг. При этом каждый расчетный шаг имеет условную длительность. Каждый расчетный шаг разбивается на подшаги (итерации) для уменьшения приращения нагрузки на каждом из них и, соответственно, улучшения численной сходимости нелинейной контактной задачи.

Таким образом, если обозначить за T общую условную длительность расчетного шага, за N — количество оборотов иглы относительно подпятника, моделируемое в рамках данного расчетного шага, а за Δt — условную длительность одной итерации, то число оборотов, моделируемое на данной итерации расчета, вычисляется из соотношения:

$$\Delta N = N \frac{\Delta t}{T}. \quad (6)$$

Относительный сдвиг точки контактной поверхности на данной итерации расчета, соответствующий ΔN оборотам иглы относительно подпятника равен:

$$\Delta l = 2\pi r \Delta N. \quad (7)$$

Условная линейная скорость относительного сдвига контактных поверхностей иглы и подпятника, считающаяся постоянной на протяжении итерации, соответственно вычисляется из соотношения:

$$\bar{v}_{rel} = \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad (8)$$

Принимая во внимание соотношение (3), можно записать выражение:

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = r \bar{\omega}, \quad (9)$$

где $\bar{\omega}$ — условная угловая скорость вращения иглы относительно подпятника на конкретном подшаге расчета.

Подставив выражение (7) в выражение (9), получим соотношение для вычисления условной угловой скорости вращения иглы относительно подпятника на конкретном подшаге расчета:

$$\bar{\omega} = 2\pi \frac{\Delta N}{\Delta t}. \quad (10)$$

С учетом всех вышеизложенных зависимостей, выражение (1) в рамках рассмотрения изнашивания осесимметричной контактной поверхности в статической постановке может быть записано в виде:

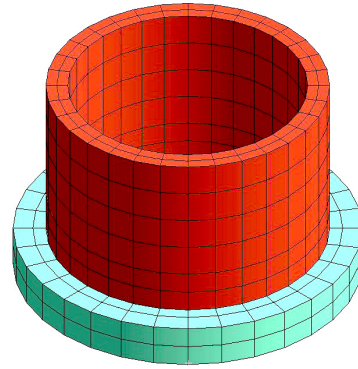


Рис. 3. Конечно-элементная модель для верификации пользовательской модели износа

$$\Delta w = \frac{k}{H} p^m (r\bar{\omega})^n \Delta t, \quad (11)$$

где Δw — величина износа контактной поверхности на данной итерации расчета.

Зависимость (11) реализована на языке программирования Fortran.

Верификация модели износа. Для верификации [7] модели износа (11) проведено сравнительное моделирование изнашивания трубы круглого поперечного сечения при её трении о вращающийся диск. На рис. 3 показана конечно-элементная модель, использованная для расчета изнашивания трубы:

— в нестационарной постановке с применением встроенной модели Арчарда (1);

— в стационарной постановке с применением встроенной модели Арчарда (1) и неявным учетом сдвиговой скорости (2);

— в стационарной постановке с применением пользовательской модели (11).

В случае такой простейшей геометрии имеется возможность провести аналитическую оценку величины износа. Для этого в (11) положим n и m равными 1,0, выразим контактное давление как отношение силы к площади контакта, предположив при этом, что она равняется площади поперечного сечения трубы и постоянна в процессе изнашивания, и подставим для вычисления угловой скорости выражение (10):

$$\Delta w = 2 \frac{k}{H} \frac{F}{(r_o^2 - r_i^2)} r \Delta N, \quad (12)$$

где r_i и r_o — внутренний и внешний радиусы трубы соответственно, F — значение вертикальной силы, прижимающей трубу к вращающемуся диску.

Из (12), в частности, видно, что величина износа должна зависеть от радиальной координаты точки контактной поверхности. Между тем в статической постановке в случае использования встроенной модели (1) и неявного учета сдвиговой скорости (2) величина износа будет зависеть от выбора среднего значения радиальной координаты \bar{r} .

В качестве \bar{r} выберем такое значение, при котором контактная поверхность будет разделена на две части одинаковой площади:

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{r_i^2 + r_o^2}{2}}. \quad (13)$$

Значения параметров модели для верификации

Коэффициент износа	Поверхностная твердость	Осевое усилие	Внутренний радиус	Внешний радиус	Количество оборотов
k	H	F	r_i	r_o	N
[—]	[МПа]	[Н]	[мм]	[мм]	[—]
0,1	1000	10	1,375	1,625	10

Таблица 2

Сравнительная таблица результатов расчетов

Постановка	Вертикальное перемещение торца трубы, мм	Значение объемного износа материала трубы, мм ³
Нестационарный трехмерный расчет с использованием встроенной модели (1)	0,0401	0,0937
Стационарный трехмерный расчет с использованием встроенной модели (1) и неявным учетом сдвиговой скорости (2)	0,0405	0,0945
Стационарный трехмерный расчет с использованием пользовательской модели (11)	0,0403	0,0941
Аналитическая оценка	0,0401	0,0946

В табл. 1 приведены значения параметров, определяющие начальную конфигурацию рассматриваемой задачи.

Для выбранной простой геометрии и сделанных предположений о постоянстве площади контактной поверхности величина объемного износа вычисляется по формуле:

$$W_V = \pi(r_o^2 - r_i^2)w. \quad (14)$$

В табл. 2 приведены численные значения вертикального перемещения свободного торца трубы и объемного износа, а также распределения величины износа по поверхности трубы, контактирующей с вращающимся диском, в конечный момент времени, полученные в результате проведенного конечно-элементного моделирования в трех постановках.

Значения для всех расчетных случаев отличаются не более чем на 1 %. Различия связаны в первую очередь с точностью вычисления контактного давления на достаточно грубой конечно-элементной сетке, с выбором среднего значения радиальной координаты \bar{r} , а также с тем фактом, что в рассмотренной модельной задаче не в точности выполняется предположение о равенстве площади контактной поверхности величине площади поперечного сечения трубы вследствие деформирования обоих контактирующих тел.

Основываясь на полученных результатах, был сделан вывод о том, что модель износа (11) можно считать верифицированной и она может быть использована для расчета изнашивания осесимметричных вращающихся контактных пар.

Оценка температуры контактной поверхности. Подобные методы расчета изнашивания уже предлагались ранее многими исследователями [1, 8–11]. Отличием настоящей работы является принятая попытка учета теплового состояния контактирующей поверхности без непосредственного вычисления поля температуры в контактирующих телах.

Величину теплового потока, генерируемого на контактной поверхности, предлагается вычислять в предположении изолированности контактной пары, а значит, равенстве работы сил трения величине тепловой энергии согласно первому закону термодинамики.

На каждой итерации расчета для контактного элемента (e) становятся известны значения радиальной координаты $r^{(e)}$, вычисляемые из соотношения (4), и относительной скорости сдвига $v_{rel}^{(e)}$, определяемые по формуле (3). Кроме того, известна площадь контактного элемента $A^{(e)}$ и значение контактного давления $p^{(e)}$.

Величина теплового потока, генерируемая на поверхности контактного элемента (e) может быть определена по формуле [12]:

$$q^{(e)} = \mu p^{(e)} v_{rel}^{(e)}, \quad (15)$$

где μ — значение коэффициента трения между контактирующими поверхностями. Следует отметить, что здесь для вычисления сдвиговой скорости следует использовать истинное значение угловой скорости относительного вращения иглы ω .

Суммарный тепловой поток, вычисляемый как

$$q = \frac{\sum_{(e)} q^{(e)} A^{(e)}}{\sum_{(e)} A^{(e)}}, \quad (16)$$

разделяется между двумя контактирующими поверхностями в соотношении [13]

$$q = q_{(1)} + q_{(2)} = \alpha q + (1 - \alpha)q, \quad (17)$$

где

$$\alpha = \left(1 + \sqrt{\frac{\kappa_{(2)} c_{(2)} \rho_{(2)}}{\kappa_{(1)} c_{(1)} \rho_{(1)}}} \right)^{-1}, \quad (18)$$

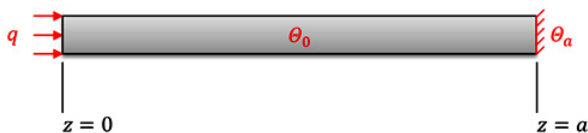


Рис. 4. Расчетная схема одномерной задачи теплопроводности



Рис. 5. Алгоритм методики расчета износа поверхности

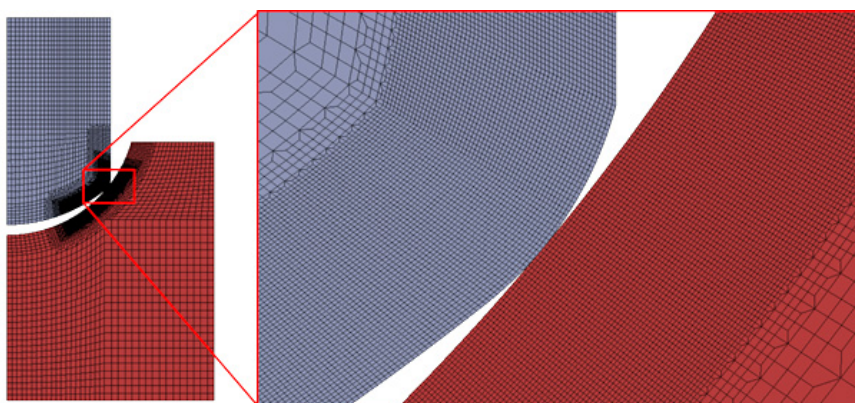


Рис. 6. Конечно-элементная модель для моделирования износа опорной пары

κ , c , ρ — коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала соответственно, индексы (1) и (2) указывают на номер контактной поверхности.

В [14] приведено выражение для вычисления температуры контактной поверхности, основанное на решении одномерной задачи теплопроводности в бесконечной области:

$$\Theta(t) = \frac{q\sqrt{t}}{\sqrt{\pi\kappa c\rho}} \quad (19)$$

Однако, как не трудно видеть, данная зависимость не учитывает отвод тепла.

Для учета конечных размеров контактной пары и отвода части тепла с контактной поверхности температуру контактной поверхности предлагается определять из решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями II рода на одной границе и граничными условиями I на другой (рис. 4):

$$\Theta(t) = \frac{4}{\pi^2\kappa} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^{j+1} \pi\kappa(\Theta_a - \Theta_0)(2j+1) - 2aq}{(2j+1)^2} \times e^{-\frac{\pi^2\kappa(2j+1)^2 t}{4a^2 c\rho}} + \Theta_a + \frac{aq}{\kappa} \quad (20)$$

где Θ_0 — значение температуры в начальный момент времени, Θ_a — постоянное (установившееся) значение температуры на удаленной границе.

Моделирование изнашивания с учетом изменения температуры поверхности. На рис. 5 приведена схема разработанной методики моделирования изнашивания осесимметричной пары трения в программном комплексе ANSYS Mechanical. Преимуществом данного подхода является его максимальная схожесть с процессом решения обыкновенных контактных задач в указанной среде — нет никаких особенностей в построении конечно-элементных моделей и задании граничных условий.

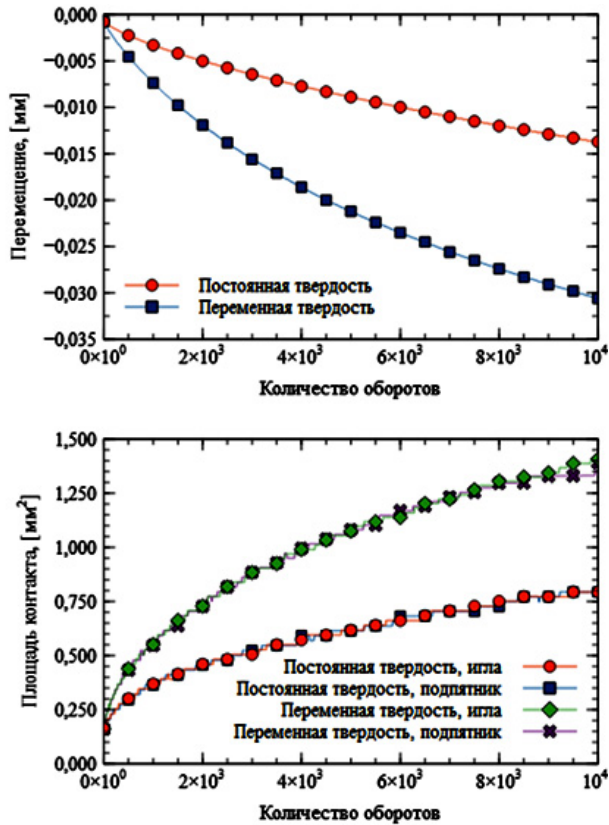


Рис. 7. Сравнение решений, получаемых при постоянном значении твердости и при учете зависимости твердости материала от температуры

Для демонстрации учета зависимости свойств материалов от температуры при расчете износа в качестве наиболее показательного параметра выбрано изменение величины поверхностной твердости при нагреве [15–19].

Разработанная модель износа с учетом зависимости поверхностной твердости материала от температуры была применена к моделированию изнашивания контактной поверхности быстровращающейся опорной пары трения типа «игла-подпятник». Конечно-элементная модель опорной пары трения представлена на рис. 6, задача рассматривается в осесимметричной постановке.

На рис. 7 приведены основные сравнительные результаты расчетов изнашивания с постоянным значением поверхностной твердости и с величиной твердости, зависящей от расчетной температуры контактной поверхности: изменение контактной площади и вертикального перемещения верхнего торца иглы в зависимости от количества совершенных оборотов опорной пары трения.

Заключение. В настоящей статье приведена методика учета изменения свойств материалов при моделировании изнашивания быстровращающихся осесимметричных контактных пар.

Приведенные результаты численного моделирования говорят о том, что учет изменения значений параметров модели износа необходим для повышения адекватности и достоверности результатов.

Дальнейшие направления исследований в рамках настоящей работы связаны с оценкой влияния теплового расширения материалов и моделированием несимметричного изнашивания вследствие наличия боковой нагрузки в рамках статической постановки задачи.

1. Dai X., Zhang K., Tang C. Friction and wear of pivot jewel bearing on oil-bath lubrication for high rotational speed application // *Wear*. 2013. Vol. 302. P. 1506–1513. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.032.

2. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. Москва: Физматлит, 2013. 352 с. ISBN 978-5-9221-1443-1.

3. Хандельсман Ю. М. Камневые опоры. Москва: Машиностроение, 1983. 152 с.

4. Archard J. F., Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions // *Proceedings of the Royal Society*. 1956. Vol. 236 (1206). P. 397–410. DOI: 10.1098/rspa.1956.0144.

5. Ansys Mechanical APDL Theory Reference, ANSYS Inc. URL: <https://pdfslide.us/documents/ansys-mechanical-apdl-theory-reference-15pdf.html?page=1> (дата обращения: 15.10.2023).

6. Ansys Mechanical APDL Programmers Reference, ANSYS Inc. URL: <https://pdfslide.net/documents/ansys-mechanical-apdl-programmers-reference.html?page=1> (дата обращения: 15.10.2023).

7. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. Введ. 2022–01–01. Москва: Стандартинформ, 2021. 15 с.

8. Pödra P., Andersson S. Simulating sliding wear with finite element method // *Tribology International*. 1999. Vol. 32. P. 71–81. DOI: 10.1016/S0301-679X(99)00012-2.

9. Hegadekatte V., Huber N., Kraft O. Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer // *Tribology Letters*. 2006. Vol. 24 (1). P. 51–60. DOI: 10.1007/s11249-006-9144-2.

10. Söderberg A., Andersson S. Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software // *Wear*. 2009. Vol. 267. P. 2243–2251. DOI: 10.1016/j.wear.2009.09.004.

11. Bastola A., Stewart D., Dini D. Three-dimensional finite element simulation and experimental validation of sliding wear // *Wear*. 2022. Vol. 504–505. P. 204402. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204402.

12. Kónya L., Váradi K. Wear simulation of a polymer-steel sliding pair considering temperature- and time-dependent material properties // *Tribology and Interface Engineering Series*. 2008. Vol. 55. P. 130–145. DOI: 10.1016/S1572-3364(08)55007-5.

13. Grigull U., Sandner H. Heat Conduction. Berlin, 1984. 187 p.

14. Чичинадзе А. В. Основы трибологии: (трение, износ, смазка). 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2001. 663 с. ISBN 5-217-03053-4.

15. Alpert C. P., Chan H. M., Bennison S. J. [et al.]. Temperature dependence of hardness of alumina-based ceramics // *Journal of American Ceramic Society*. 1988. Vol. 71. P. 371–373.

16. Huang Z., Gu L. Y., Weertman J. R. Temperature dependence of hardness of nanocrystalline copper in low-temperature range // *Scripta Materialia*. 1997. Vol. 37, no. 7. P. 1071–1075. DOI: 10.1016/S1359-6462(97)00209-1. EDN: YALXKD.

17. Wang H. L., Hon M. H. Temperature dependence of ceramics hardness // *Ceramics International*. 1999. Vol. 25, no. 3. P. 267–271.

18. Milman Yu. V., Chugunova S. I., Goncharova I. V. [et al.]. Temperature dependence of hardness in silicon-carbide ceramics with different porosity // *International Journal of Refractory Materials & Hard Materials*. 1999. Vol. 17. P. 361–368. DOI: 10.1016/S0263-4368(99)00022-0.

19. Wang R., Li D., Li W. Temperature dependence of hardness prediction for high-temperature structural ceramics and their composites // *Nanotechnology reviews*. 2021. Vol. 10. P. 586–595. DOI: 10.1515/ntrev-2021-0041.

ЖУРАВЛЕВ Дмитрий Николаевич, инженер-исследователь передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» Санкт-Петербургского политех-

нического университета Петра Великого (СПбПУ),
г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3817-9414

AuthorID (РИНЦ): 1169084

ORCID: 0000-0003-0346-7215

AuthorID (SCOPUS): 57193726167

Адрес для переписки: zhuravlev@compmechlab.ru

БОРОВКОВ Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент (Россия), проректор по цифровой трансформации, руководитель передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 6540-0980

AuthorID (РИНЦ): 6567

ORCID: 0000-0003-3177-0959

AuthorID (SCOPUS): 8840090300

Адрес для переписки: borovkov@compmechlab.com

Для цитирования

Журавлев Д. Н., Боровков А. И. Разработка методики учета температурной зависимости свойств материалов при моделировании изнашивания быстровращающейся опорной пары типа «игла-подпятник» // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 50 – 58. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-50-58.

Статья поступила в редакцию 29.11.2023 г.

© Д. Н. Журавлев, А. И. Боровков

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF MATERIAL PROPERTIES IN SIMULATION OF WEAR IN FAST-ROTATING PIVOT JEWEL BEARING SUPPORT

The pivot jewel bearing is an important node of some classes of industrial equipment; at nominal operating modes, the speed of relative rotation of the contact surfaces can reach 10^3 revolutions per second, while the operating time can be measured in years; under such conditions, it is necessary to take into account the wear of the contact surfaces; in this paper, a technique for modeling the dry friction wear of a fast-rotating support pair is proposed, taking into account changes in the properties of materials due to surface heating, based on solving the wear contact problem in a stationary formulation using Archard's law; the effect of taking into account the temperature dependence of material properties in wear modeling process is demonstrated.

Keywords: numerical simulation, finite element method, friction, wear, pivot jewel bearing, material properties.

References

1. Dai X., Zhang K., Tang C. Friction and wear of pivot jewel bearing on oil-bath lubrication for high rotational speed application // *Wear*. 2013. Vol. 302. P. 1506–1513. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.032. (In Engl.).
2. Popov V. L. *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryaseniya* [Mechanics of contact interaction and physics of friction. From nanotribology to earthquake dynamics]. Moscow, 2013. 352 p. ISBN 978-5-9221-1443-1. (In Russ.).
3. Khandel'sman Yu. M. *Kamnevyye opory* [Stone supports]. Moscow, 1983. 152 p. (In Russ.).
4. Archard J. F., Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions // *Proceedings of the Royal Society*. 1956. Vol. 236 (1206). P. 397–410. DOI: 10.1098/rspa.1956.0144. (In Engl.).
5. Ansys Mechanical APDL Theory Reference, ANSYS Inc. URL: <https://pdfslide.us/documents/ansys-mechanical-apdl-theory-reference-15pdf.html?page=1> (accessed: 15.10.2023). (In Engl.).
6. Ansys Mechanical APDL Programmers Reference, ANSYS Inc. URL: <https://pdfslide.net/documents/ansys-mechanical-apdl-programmers-reference.html?page=1> (accessed: 15.10.2023). (In Engl.).
7. GOST R 57700.37-2021. *Komp'yuternyye modeli i modelirovaniye. Tsifrovyye dvoyniki izdeliy. Obshchiye polozheniya* [Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow, 2021. 15 p. (In Russ.).
8. Pödra P., Andersson S. Simulating sliding wear with finite element method // *Tribology International*. 1999. Vol. 32. P. 71–81. DOI: 10.1016/S0301-679X(99)00012-2. (In Engl.).
9. Hegadekotte V., Huber N., Kraft O. Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer // *Tribology Letters*. 2006. Vol. 24 (1). P. 51–60. DOI: 10.1007/s11249-006-9144-2. (In Engl.).
10. Söderberg A., Andersson S. Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software // *Wear*. 2009. Vol. 267. P. 2243–2251. DOI: 10.1016/j.wear.2009.09.004. (In Engl.).
11. Bastola A., Stewart D., Dini D. Three-dimensional finite element simulation and experimental validation of sliding wear // *Wear*. 2022. Vol. 504–505. P. 204402. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204402. (In Engl.).
12. Kónya L., Váradi K. Wear simulation of a polymer-steel sliding pair considering temperature - and time-dependent material properties // *Tribology and Interface Engineering Series*. 2008. Vol. 55. P. 130–145. DOI: 10.1016/S1572-3364(08)55007-5. (In Engl.).
13. Grigull U., Sandner H. *Heat Conduction*. Berlin, 1984. 187 p. (In Engl.).
14. Chichinadze A. V. *Osnovy tribologii: (Treniye, iznos, smazka)* [Basics of tribology: (Friction, wear, lubrication)]. 2nd ed. Moscow, 2001. 663 p. ISBN 5-217-03053-4. (In Russ.).
15. Alpert C. P., Chan H. M., Bennison S. J. [et al.]. Temperature dependence of hardness of alumina-based ceramics // *Journal of American Ceramic Society*. 1988. Vol. 71. P. 371–373. (In Engl.).

16. Huang Z., Gu L. Y., Weertman J. R. Temperature dependence of hardness of nanocrystalline copper in low-temperature range // *Scripta Materialia*. 1997. Vol. 37, no. 7. P. 1071 – 1075. DOI: 10.1016/S1359-6462(97)00209-1. EDN: YALXKD. (In Engl.).

17. Wang H. L., Hon M. H. Temperature dependence of ceramics hardness // *Ceramics International*. 1999. Vol. 25, no. 3. P. 267 – 271. (In Engl.).

18. Milman Yu. V., Chugunova S. I., Goncharova I. V. [et al.]. Temperature dependence of hardness in silicon-carbide ceramics with different porosity // *International Journal of Refractory Materials & Hard Materials*. 1999. Vol. 17. P. 361 – 368. DOI: 10.1016/S0263-4368(99)00022-0. (In Engl.).

19. Wang R., Li D., Li W. Temperature dependence of hardness prediction for high-temperature structural ceramics and their composites // *Nanotechnology Reviews*. 2021. Vol. 10. P. 586 – 595. DOI: 10.1515/ntrev-2021-0041. (In Engl.).

ZHURAVLYOV Dmitry Nikolaevich, Research Engineer of Advanced Engineering School «Digital Engineering», Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg.

SPIN-code: 3817-9414

AuthorID (RSCI): 1169084

ORCID: 0000-0003-0346-7215

AuthorID (SCOPUS): 57193726167

Correspondence address: zhuravlev@compmechlab.ru

BOROVKOV Alexey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Digital Transformation, Head of Advanced Engineering School «Digital Engineering», SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 6540-0980

AuthorID (RSCI): 6567

ORCID: 0000-0003-3177-0959

AuthorID (SCOPUS): 8840090300

Correspondence address: borovkov@compmechlab.com

For citations

Zhuravlyov D. N., Borovkov A. I. Development of a methodology taking into account the temperature dependence of material properties in simulation of wear in fast-rotating pivot jewel bearing support // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 50 – 58. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-50-58.

Received November 29, 2023.

© D. N. Zhuravlyov, A. I. Borovkov

УДК 681.516.32
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-59-68
EDN: CDPHLB

Л. А. ПАЮК¹
Н. А. ВОРОНИНА¹
А. Д. УМУРЗАКОВА¹
Е. Е. ЛАЗУТКИНА¹
К. В. ХАЦЕВСКИЙ²

¹ Национальный исследовательский
Томский политехнический
университет,
г. Томск

² Омский государственный
технический университет,
г. Омск

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ТЕПЛИЧНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Работа посвящена разработке и исследованию автоматической системы управления микроклиматом тепличного комплекса пятого поколения, которая построена на основе аппарата нечеткой логики и позволяет автоматизировать процессы управления с использованием последних разработок в этой области. В ходе работы уточнено понятие «микроклимат тепличного комплекса» для региона зоны рискованного земледелия при выращивании крупноплодной земляники в закрытом грунте.

Ключевые слова: микроклимат тепличного хозяйства, аппарат нечёткой логики, зашторивание, проветривание, капельный полив, досветка, автоматическое управление.

Введение. В современных условиях нестабильности рынка важно нарастить темпы развития собственных тепличных хозяйств, как мелких, так и средних, которые сегодня бурно развиваются [1]. Согласно [2] за последние пять лет инвестиции в данной отрасли сельского хозяйства превысили 200 млрд рублей, было введено в эксплуатацию или начаты работы по строительству более 1,1 тыс. га теплиц.

Всё это ведет к независимости от импортируемой продукции сельхозназначения.

Тепличное хозяйство сегодня — это объект, который имеет большие площади (от 1 Га до 100 Га), развитую инфраструктуру, отдельное электро- и энергопотребление, систему хранения и транспортировки готовой продукции. Кроме того, имеется целый комплекс для анализа получаемого продукта с точки зрения его товарного вида и наличия полезных микроэлементов и витаминов. Все важные для потребителя характеристики готового продукта обеспечиваются системой микроклимата, которая учитывает целый ряд параметров и под-

держивает их на оптимальном уровне, а именно: освещённости, влажности воздуха и почвы, кислотности почвы, температуры внутри помещения. Все это обязательно происходит в реальном времени при помощи современных систем управления. Важно отметить, что одновременно с этим применяются на практике самые передовые технологии выращивания того или иного продукта сельхозназначения, например, интенсивные методы выращивания [3], которые позволяют минимизировать временной интервал созревания и увеличить урожайность.

Для достижения наибольшего урожая с минимальными энерго- и ресурсозатратами в тепличном комплексе (ТК) используется современная автоматическая система управления микроклиматом (АСУМ), которая позволяет значительно повысить урожайность выращиваемой сельхозкультуры [4].

Следует отметить, что использование современных технологий и автоматизации процессов контроля за процессами, протекающими в тепличном комплексе, позволяют минимизировать затраты труда и привлекают высококвалифицированных молодых специалистов. Построенная по последнему слову техники и технологий современная теплица невозможна без продуманной и надежной системы управления.

Считаем, что вопрос исследования энергоэффективности и надёжности микроклимата тепличного комплекса является актуальным.

При проектировании и строительстве ТК следует в первую очередь определить такие параметры, как климатические условия региона (место строительства), световую зону (Ш), вид и срок выращивания сельхоз культуры, далее наличие или отсутствие скважины, высоковольтной линии электропередач и подъездных путей [5].

Краткая теоретическая часть. Считается, что для достижения максимального урожая любой агрокультуры в закрытом грунте необходимо поддерживать требуемые параметры микроклимата внутри ТК. Отметим, что разные авторы (Пешко М. С., Змиева К. А.) включают в понятие «микроклимат тепличного комплекса» свои параметры, влияющие на эффективность тепличного комплекса в целом. Поэтому уточним данное понятие и выделим основные параметры для создания оптимального микроклимата при выращивании овощных и ягодных культур [6].

Каждый из рассматриваемых параметров является неотъемлемой частью системы микроклимата теплицы. Остановимся кратко на каждом из них:

1. Освещение — сложный комплекс мероприятий для достижения требуемого уровня освещенности технологического помещения по выращиванию агрокультуры в разные моменты развития растения. Современные технологии в данной области позволяют создавать и поддерживать необходимые условия микроклимата при использовании фитоламп как основного источника света [7, 8].

2. Система капельного полива — система подачи и распределения воды с микроэлементами, которая обеспечивает питание корней растений [9, 10]. Растворение удобрений производится в отдельных баках в соответствии с химической совместимостью удобрений. Полученный питательный раствор проходит очистку в системе на основе дискового фильтра.

3. Содержание углекислого газа в воздухе ТК — это важная составляющая в процессе роста и развития агрокультуры [6]. Диоксид углерода не имеет

цвета и запаха, но прекрасно фиксируется системой датчиков, установленных снаружи и внутри ТК.

4. Температура — основной параметр, который изменяется как от внешних условий, так и внутренних. На различных этапах развития растений температура должна корректироваться, мониторинг данного параметра должен производиться каждую минуту.

5. Кислотность почвы — зависит от состава почвы, её насыщенности микроэлементами, влажности и температуры в техническом помещении тепличного хозяйства.

6. Влажность — также сложный показатель системы микроклимата, но оказывающий значительное влияние на развитие агрокультуры на всех этапах его развития. Чаще всего используют автоматические распылители, реже ручное разбрызгивание воды.

Применение АСУМ, согласно [11–13], экономит от 15 до 25 % тепла, увеличивая урожайность сельхозкультуры, значительно повышает культуру производства и выводит на новый качественный уровень условия труда. Использование АСУМ в ТК, позволяет обеспечивать высокую точность требуемых параметров микроклимата с учетом внешних условий и решаемых задач в полном объеме. В режиме реального времени системами мониторинга и управления ТК отслеживаются следующие процессы:

- сбор метеорологических данных;
- мониторинг и управление системой отопления теплиц;
- управление форточной вентиляцией;
- управление рециркуляционными вентиляторами;
- управление системами дозирования углекислого газа, поддержание уровня концентрации углекислого газа в объеме теплиц;
- контроль и управление системой ассимиляционного освещения;
- управление горизонтальными шторными экранами.

Данные, которые получают с датчиков внутри и снаружи тепличного комплекса, в режиме реального времени передаются на монитор компьютера, планшета или телефона работника, чтобы потом быть проанализированными [3, 6].

Крупноплодная земляника (садовая) относится к многолетним травянистым растениям, вес одной ягоды достигает от 35 до 100 г, подвержены некоторым типичным болезням при выращивании в закрытом грунте, а именно: фитофтороз, ксантоз, мучнистая роса, гниль.

В зависимости от сорта ягоды, его особенностей необходимо соответствующим образом настраивать АСУМ в ТК для получения максимальной урожайности и минимальных затратах. Здесь необходима помощь агротехнолога, который настраивает и корректирует работу данной системы исходя из опыта работы.

Весь период жизни растения можно разделить на три цикла:

- I — посадка, 25 дней;
- II — цветение, около 20 дней;
- III — плодоношение.

Исходя из анализа вышеприведенных данных, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на микроклимат тепличного комплекса оказывают следующие параметры: температура, влажность и содержание CO_2 .

Параметры для микроклимата

Цикл	T (температура)		M (влажность)		Q (CO ₂)	
	теория	практика	теория	практика	теория	практика
I	не менее 11 °С	13°С	90 %	68 % – 75 %	900 ppm	850 ppm
II	18°С – 22°С	22°С	75 % – 80 %	70 % – 77 %	800 ppm	810 ppm
III	20°С – 25°С	23°С	85 % – 90 %	75 % – 80 %	1100 ppm	980 ppm

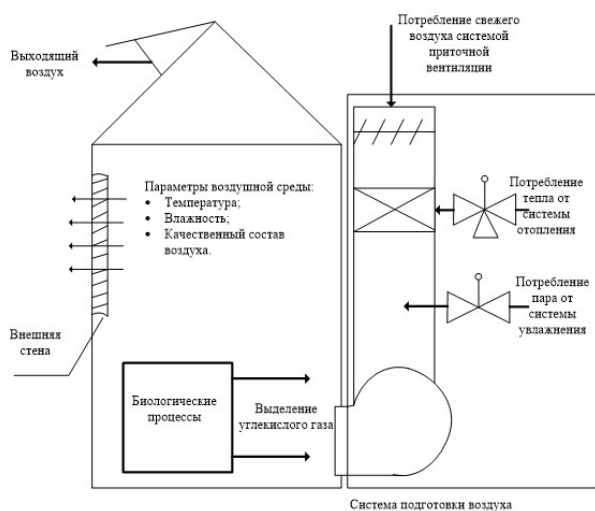


Рис. 1. Объект управления

Приведены (табл. 1) практические рекомендации по поддержанию основных параметров микроклимата для крупноплодной земляники.

Все выше обозначенные параметры для поддержания оптимального микроклимата в тепличном комплексе легко контролируются при помощи системы приточно-вытяжной вентиляции, с предварительной подготовкой воздуха (прогрев его при низкой температуре вне тепличного комплекса до приемлемого значения) и системы по регулировке влажности (рис. 1). Для этих целей используется промышленный кондиционер с высокой кратностью воздухообмена, с системой контроля химического состава воздуха (контроль уровня CO₂) [9].

Математическая модель для тепличного комплекса строится по принципу «чёрного ящика», т.к. присутствует ряд входных и выходных параметров, которые математически можно связать опосредованно. К выходным параметрам теплицы отнесём: температуру T_i , уровень углекислого газа M_{CO_2} , относительную влажность воздуха ϕ_i , освещённость L_i , которые зависят от управляющих и возмущающих воздействий и конфигурации тепличного комплекса [6].

Определим изменение температуры воздуха внутри тепличного комплекса (та часть, где происходит выращивание агрокультуры) T_i при помощи уравнения теплового баланса:

$$\rho_a C_a V \left(\frac{dT_i}{dt} \right) = Q_{heat} + Q_{short} - Q_{conv.cond} - Q_{infiltr} - Q_{long}, \quad (1)$$

где ρ_a — плотность воздуха внутри тепличного комплекса, кг·м⁻³;

C_a — удельная теплоёмкость воздуха внутри тепличного комплекса, Дж (кг·К);

V — внутренний объём тепличного комплекса, м³;

T_i — температура воздуха внутри тепличного комплекса, °С;

Q_{heat} — тепловые поступления от системы обогрева, Вт;

Q_{short} — тепловые поступления от солнечного излучения, Вт;

$Q_{conv.cond}$ — тепловые потери, возникающие при конвекции и кондукции теплового потока, Вт;

$Q_{infiltr}$ — инфильтрационные тепловые потери, Вт;

Q_{long} — тепловые потери, вызванные длинноволновым излучением, Вт.

Поступление тепла от солнечного излучения определим по формуле:

$$Q_{short} = \alpha_c \tau_c S I, \quad (2)$$

где α_c — коэффициент поглощающей способности солнечной радиации;

τ_c — коэффициент пропускания покрытия;

S — площадь поверхности теплицы, м²;

I — солнечная радиация, Вт·м⁻².

Подачу свежего воздуха из вне тепличного комплекса определим по формуле:

$$R = VwS_c, \quad (3)$$

Далее запишем уравнение баланса влаги внутри теплицы:

$$\rho_a V \left(\frac{dX_i}{dt} \right) = G_{in} X_a - X_i + G_{for}, \quad (4)$$

где X_i — абсолютная влажность воздуха внутри тепличного комплекса, кг_{H₂O}/кг_{возд};

X_a — абсолютная влажность воздуха снаружи тепличного комплекса, кг_{H₂O}/кг_{возд};

G_{for} — расход пара внутри тепличного комплекса, который распыляется при помощи форсунок принудительно, кг_{H₂O}/с.

Для связи абсолютной влажности воздуха с её относительным значением в тепличном комплексе воспользуемся следующим соотношением:

$$\phi = \left(\frac{X}{X_{np}} \right) 100\%, \quad (5)$$

где X_{np} — абсолютная влажность насыщенного пара, кг_{H₂O}/кг_{возд}.

Работу нечеткого регулятора можно свести к базе правил, которая описывает основные особен-

Оптимальные технологические режимы выращивания крупноплодной земляники

Температура	Влажность	Содержание CO ₂	Примечание
°С	%	ppm	
12–17	88–90	850–900	Оптимальные параметры
22	75–80	800	Оптимальные параметры
20–25	85–90	900–1100	Оптимальные параметры
18–23	75–85	–	Общее требование к крупноплодной землянике

ности работы данного регулятора и подкреплена теоретическими и практическими данными, полученными при выращивании крупноплодной земляники. Данные правила задают условия выполнения определенных критериев, которые либо попадают в область корректных параметров, либо нет. Они ограничивают систему автоматического управления микроклиматом тепличного комплекса и задают корректные режимы её работы в зависимости от внешних факторов и этапов развития, выращиваемой культуры [14, 15].

Работу систем подачи воздуха, зашторивания, полива и распыления влаги внутри тепличного комплекса автоматизируем для наибольшей эффективности при помощи контроллера с интеллектуальным управлением, который описан базой правил для каждого отдельного параметра [12, 15–20].

Приведём (табл. 2) параметры микроклимата для производства ягодной продукции, а именно крупноплодной земляники.

Обобщая теоретические (табл. 2) и практические данные, формулируем основные правила-стратегии, которые отражают логику выбора температурного режима с учетом температуры воздуха снаружи ТК в зимний период [11]:

1. При температуре воздуха снаружи ТК ниже $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ — придерживаемся номинальной температуры процесса выращивания крупноплодной земляники.

2. При температуре воздуха снаружи ТК ниже $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ — придерживаемся немного пониженного значения температуры при выращивании крупноплодной земляники.

3. При значении температуры снаружи ТК около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — придерживаемся немного повышенной температуры при выращивании крупноплодной земляники.

Полученные три правила-стратегии соответствуют для контроллера следующим режимам работы по контуру температуры (в зимний период), а именно:

— температура около $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ (обычное состояние) — правило 1,

— температура около $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже (холодно) — правило 2,

— температура около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тепло) — правило 3.

Температура в тепличном комплексе тесно связана с влажностью, поэтому при повышенных значениях температуры снаружи комплекса необходимо понижать значение влажности, а при пониженных температурах — наоборот, поддерживать номинальное значение последнего. С учётом коррекции влажности внутри тепличного комплекса управляющие стратегии для микроконтроллера будут более детальными с поправкой на влажность внутри технологического помещения. Правила-стратегии 1 и 2

поддерживают уровень влажности на номинальном уровне, при действии правила 3 устанавливаем новый режим — «немного пониженный» [13].

Следующий параметр системы микроклимата, концентрация CO₂, является важным фактором, но учитывается опосредованно. Он определяет во многом внешний вид продукции (влияет более чем на 30 %). Изменение концентрации CO₂ как внутри тепличного комплекса, так и снаружи осуществляется при помощи контроля системы вентиляции.

Добавленные в основные правила (1, 2, 3) условия по концентрации CO₂ в тепличном комплексе привносят дополнительные условия в стратегии технологического режима работы контроллера. Кратко обозначим основные моменты:

— концентрация CO₂ устанавливается на отметке «пониженная», если температура окружающей среды составляет около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (правило 3).

— концентрация CO₂ устанавливается на отметке «повышенная», если колебания температуры находятся на отметке около $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (правило 2).

— концентрация CO₂ устанавливается на отметке «номинальная» при наружной температуре окружающей среды около $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (правило 1).

После учёта концентрации CO₂ в наружном воздухе и влияния влажности внутри тепличного комплекса правила-стратегии для логического контроллера примут следующий вид:

1. Если температура снаружи ТК «номинальная», а содержание CO₂ снаружи ТК так же соответствует этому значению, то необходимо обеспечить несколько повышенную температуру процесса выращивания крупноплодной земляники в сочетании с немного пониженной влажностью воздуха и содержанием CO₂ внутри ТК.

2. Если фиксируется значение температуры снаружи ТК, соответствующее отметке — «номинальная температура», а содержание CO₂ снаружи ТК как «повышенное», то требуется обеспечить немного повышенную температуру процесса выращивания крупноплодной земляники, при этом немного понизить влажность воздуха и содержание углекислого газа в внутри ТК.

3. Если зафиксирована датчиками температура снаружи ТК как «пониженная», а наружное содержание CO₂ имеет «номинальное» значение, то необходимо выдерживать номинальные параметры при выращивании крупноплодной земляники.

4. Если датчиками температуры снаружи ТК зафиксировано значение, соответствующее понятию «пониженная температура», а содержание CO₂ — «повышенное», то система контроля настраивается таким образом, чтобы параметры микроклимата при выращивании крупноплодной земляники для температуры и влажности имели «номинальные»

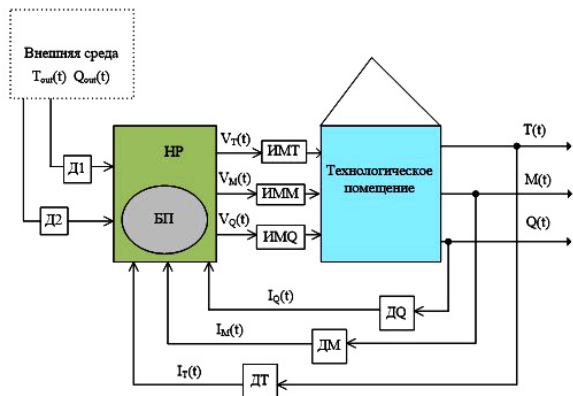


Рис. 2. Система управления: НР — нечёткий регулятор, БП — база правил

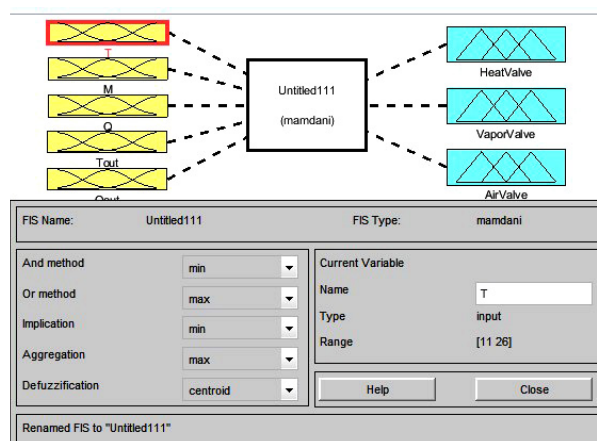


Рис. 3. Нечёткий регулятор, реализованный в Matlab

Таблица 3

Описание состояния параметров микроклимата и управления им в терминах нечеткого управления

Физическая величина	Значение величины	Лингвистическая переменная	Термы лингвистической переменной	Характеристика термы
Температура воздуха в технологическом помещении, °С	12...18	Температура процесса	<i>n</i>	пониженная
	17...19		<i>sn</i>	немного пониженная
	21...23		<i>z</i>	номинальная
	22...24		<i>sp</i>	немного повышенная
	23...25		<i>p</i>	повышенная
	24...25		<i>bp</i>	завышенная
Влажность воздуха, %	70...75	Влажность воздуха	<i>n</i>	пониженная
	75...80		<i>sn</i>	немного пониженная
	85...90		<i>z</i>	номинальная
	90...95		<i>sp</i>	немного повышенная
Концентрация CO ₂ в воздухе, ppm	400...600	Содержание углекислого газа	<i>bn</i>	заниженное
	400...700		<i>n</i>	пониженное
	700...800		<i>sn</i>	немного пониженное
	800...900		<i>z</i>	номинальное
	900...1000		<i>sp</i>	немного повышенное
	1000...1100		<i>p</i>	повышенное
	1100...1200		<i>bp</i>	завышенное
	1200...1300		<i>bbp</i>	значительно завышенное
Наружная температура, °С	-35...-15	Наружная температура	<i>bn</i>	заниженная
	-30...-3		<i>n</i>	пониженная
	-15...-3		<i>z</i>	номинальная
Наружная концентрация CO ₂ , ppm	370...500	Наружная концентрация углекислого газа	<i>z</i>	номинальная
	500...390		<i>p</i>	повышенная
Скорость открытия/закрытия исполнительных механизмов, мм/с	-100...-10	Упр. T Упр. M Упр. Q	C1	закрывать
	-10...10			
	10...100			

значения, при этом следует «немного повысить» содержание диоксида углерода внутри ТК.

5. Если при фиксации системой датчиков снаружи ТК температура оказывается в зоне «заниженная», а наружное содержание углекислого газа, напротив, «номинальное», то система контроля должна вывести параметры микроклимата ТК

на следующие значения: «немного пониженную» температуру процесса выращивания, «номинальную» влажность и «повышенное» содержание диоксида углерода внутри ТК.

6. Если температура снаружи ТК «заниженная», а наружное содержание диоксида углерода находится на отметке — «повышенное», то контрол-

лер выводит требуемые параметры микроклимата на следующие значения: «немного пониженное» значение температуры процесса выращивания крупноплодной земляники, «номинальной» влажности и «завышенным» содержанием диоксида углерода внутри помещения ТК [14].

Как видно из описания, все правила-стратегии дополняют друг друга, иногда определяя основной режим работы при разных исходных данных снаружи тепличного комплекса. Например, режим повышенной экономии энергоресурсов при наружной температуре воздуха « $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ » в зимний период в ущерб качеству продукции, устанавливает правило 5 и, наоборот, правило 1 — режим работы систем в экономически выгодных условиях при номинальной температуре наружного воздуха и номинальном значении влажности воздуха внутри ТК [10, 11].

Представлена система управления контроллера с нечёткими параметрами микроклимата тепличного комплекса при выращивании крупноплодной земляники (рис. 2), разработанного на основе правил-стратегий, описанных выше.

Структура контроллера формируется из блока правил, условий реализации различных режимов работы вентиляции, освещения, зашторивания, станции по выработке углекислого газа, анализе текущих параметров с датчиков, выше обозначенных элементов, с выбором оптимального режима работы систем в ТК для достижения максимальной производительности.

Нечеткий регулятор определяет управляющие воздействия: по температуре — $VT(t)$, влажности — $VM(t)$ и содержанию углекислого газа внутри ТК — $VQ(t)$ для соответствующих исполнительных механизмов в каналах управления $T(t)$, $M(t)$ и $Q(t)$. В результате устанавливаются необходимые параметры АСУМ, которые соответствуют условиям функционирования процесса выращивания крупноплодной земляники и поддерживаются автоматически с одновременным мониторингом всех изменений и условий функционирования ТК [6].

Нечеткий регулятор, реализованный в Matlab (рис. 3), имеет пять входных и три выходных лингвистических переменных, они выбирают оптимальный режим для каждого параметра по алгоритму Мамдани. В качестве функции принадлежности использовали «треугольную» функцию, которая представляет собой непрерывную линию. Аналитически такую функцию можно записать в виде выражения (6), а также представить графиком функции принадлежности (рис. 4) для температуры « T » при характеристике термы соответствующей «номинальной» (z , табл. 3).

$$f\Delta(x, a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{array} \right\}, \quad (6)$$

где x — текущий параметр; a, b, c — некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения, упорядоченные выражением: $a \leq b \leq c$. Здесь a, c — интервал, b — вершина треугольника (мода b).

Входные лингвистические переменные запишем следующим образом: « T » — температура процесса выращивания крупноплодной земляники; « M » — влажность; « Q » — концентрация углекислого газа

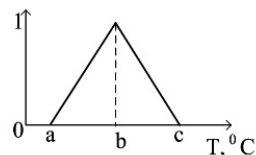


Рис. 4. График функции принадлежности для температуры « T »: $a = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 1$

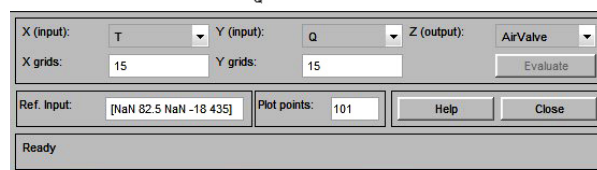
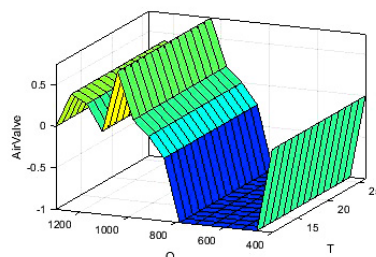


Рис. 5. Зависимость температуры и концентрации углекислого газа

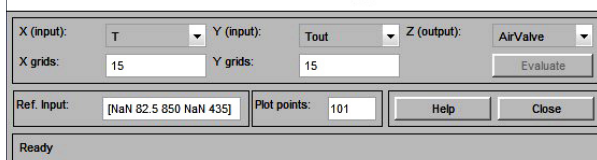
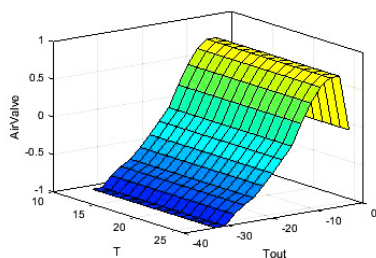


Рис. 6. Зависимость температуры внутри помещения и снаружи тепличного комплекса

в процессе выращивания крупноплодной земляники; « $Tout$ » — температура воздуха снаружи ТК; « $Qout$ » — содержание углекислого газа в воздухе, поступающего в систему вентиляции.

Выходами модели нечеткого регулятора являются лингвистические переменные, которые обозначим так: «HeatValve» — управляющее воздействие по контуру отопления; «VaporValve» — управляющее воздействие по контуру увлажнения; «AirValve» — управляющее воздействие по контуру проветривания.

На основе правил-стратегий (шесть основных) и модели нечеткого регулятора (рис. 4) была сформирована схема управления для системы микроклимата в терминах. Она отражает полную работу контроллера для исследуемого объекта (табл. 3).

Результаты экспериментов. К результатам анализа полученных данных можно отнести влияние

температуры и концентрации углекислого газа на управляющее воздействие по контуру проветривания и температуры внутри помещения и снаружи тепличного комплекса по тому же контуру, которые приведены ниже (рис. 5, 6).

Для роста растения требуется оптимальное содержание углекислого газа CO_2 на уровне 800 ppm и температуры внутри помещения 17°C (рис. 5), если эти значения превышены, то включается система принудительной вентиляции.

Зависимость температур, при понижении наружной температуры, ниже -15°C , температура внутри тепличного комплекса возрастает (рис. 6), таким образом, включается принудительная система вентиляции воздуха.

Выводы. Разработанная математическая модель микроклимата теплицы для выращивания клубники (виктории) учитывает максимально возможное количество факторов, влияющих на формирование микроклимата тепличного комплекса. При математическом описании микроклимата использованы уравнения теплового баланса, баланса влажности внутреннего воздуха и баланса концентрации углекислого воздуха в углекислом газе. Была разработана база правил, которая состоит из 78 наименований, на основании которых были построены 3D модели, наглядно отображающие работу систем: отопления, проветривания и увлажнения. Анализ полученных данных показал, что внутри тепличного комплекса, а именно в той части, где происходит выращивание крупноплодной земляники, можно уменьшить температуру на разных этапах её развития на 1°C , что приведет к уменьшению затрат на обогрев.

Библиографический список

1. Импортзамещение в тепличной отрасли России — факторы развития // Агробизнес. URL: <https://www.agbz.ru/articles/importozameshchenie-v-teplichnoy-otrasli-rossii-factory-razvitiya/> (дата обращения: 15.02.2023).
2. Волкова И. Н. Тепличная отрасль хозяйства России и факторы, влияющие на ее развитие и размещение // Географическая среда и живые системы. 2021. № 1. С. 93–109. DOI: 10.18384/2712-7621-2021-1-93-109. EDN: WOQICA.
3. Боярцева В. К. Микроклимат теплиц. Справочник садовода. 2010. 420 с.
4. Соболев А. В. Эффективность регулирования микроклимата в теплицах с помощью электричества // Вестник КрасГАУ. 2014. № 4. С. 154–156. EDN: RXMUDJ.
5. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. Санкт-Петербург: Невский диалект, 2001. 557 с. ISBN 5-7940-0069-4.
6. Системы управления микроклиматом // Профит-Агро. URL: <http://profit-agro.ru/sistemy/sistemy-upravleniya-mikroklimatom/> (дата обращения: 10.03.2023).
7. Семенов В. Г., Крушель Е. Г. Математическая модель микроклимата теплицы // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2009. № 6 (54). С. 32–35. EDN: KUАНMF.
8. Белов С. М. Система охлаждения в тепличных комплексах. Микроклимат в теплицах // Аспирант. 2021. № 5 (62). С. 55–58. EDN: ELFHPU.
9. Кульмаиринов С. А., Калабаев А. А. Новый подход управления режимами микроклимата в теплицах // Синергия наук. 2021. № 59. С. 308–327. EDN: QZACBF.
10. Цокур Д. С. Система стабилизации кислотности почвы при выращивании томатов в условиях закрытого грунта // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 93. С. 998–1020. EDN: PWFDDQK.

11. Пешко М. С. Адаптивная система управления параметрами микроклимата процессов производства и хранения пищевых продуктов: автореф. дис ... канд. техн. наук. Москва, 2015. 22 с.

12. Змиева К. А. Автоматическая система контроля и регулирования микроклимата тепличного комплекса // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: тр. Восьмой Всероссийской науч.-практ. конф., Новокузнецк, 20–21 ноября 2018 г. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2018. С. 49–53. EDN: YPJFU.

13. Юран С. И., Вершинин М. Н. Совершенствование системы регулирования микроклимата на основе нечеткой логики // Вестник НГИЭИ. 2019. № 9 (100). С. 33–45. EDN: FYYJWA.

14. Аверкин А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта: книга по требованию. Москва, 2013. 312 с.

15. Панфилов А. Э., Крушель Е. Г. Применение Matlab-приложения PDEarr для моделирования динамических процессов с распределенными параметрами // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы XVI Всерос. заоч. науч.-практ. конф. В 3-х т. Камышин, 22–25 ноября 2021 г., Волгоград: Изд-во ВолГТУ, 2021. Т. 1. С. 118–121. EDN: LOETOQ.

16. Шилкина С. В., Фокина Е. Н. Контроллер нечёткой логики в управлении технологическими процессами // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 1 (59). С. 106–114. EDN: YTMENS.

17. Ali R. B., Aridhi E., Mami A. [et al.]. Fuzzy logic controller of temperature and humidity inside an agricultural greenhouse // 7th International Renewable Energy Congress. Hammamet, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/IREC.2016.7478929.

18. Mohamed S., Hameed I. A. A GA-Based Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Greenhouse Climate Control System // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57 (2). P. 773–779. DOI: 10.1016/j.aej.2014.04.009.

19. Nicolosi G., Volpe R., Messineo A. An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse // Energies. 2017. Vol. 10, no. 5. P. 1–17. DOI: 10.3390/en10050722.

20. Li G., Tang L., Zhang X. [et al.]. Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques // 8th International Conference on Environment Science and Engineering. Barcelona, 2018. Vol. 167. P. 12–19. DOI: 10.1088/1755-1315/167/1/012019.

ПАЮК Любовь Анатольевна, кандидат технических наук, доцент Отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 3333-1750

AuthorID (РИНЦ): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

Адрес для переписки: pla@tpu.ru

ВОРОНИНА Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент Отделения электроэнергетики и электротехники ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 3176-9091

AuthorID (РИНЦ): 790645

ORCID: 0000-0001-9327-6441

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

Адрес для переписки: voronina@tpu.ru

УМУРЗАКОВА Анара Даукеновна, кандидат технических наук, старший преподаватель Отделения электроэнергетики и электротехники ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 8079-5187

AuthorID (РИНЦ): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

Адрес для переписки: granat_72@mail.ru

ЛАЗУТКИНА Елена Евгеньевна, старший преподаватель Отделения электроэнергетики и электротехники ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 5709-4911

AuthorID (РИНЦ): 891147

AuthorID (SCOPUS): 56486119300

ResearcherID: AAI-5296-2020

Адрес для переписки: see@tpu.ru

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7219-6033

AuthorID (РИНЦ): 465857

ORCID: 0000-0001-9504-1312

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

Адрес для переписки: xkv-post@rambler.ru

Для цитирования

Паюк Л. А., Воронина Н. А., Умурзакова А. Д., Лазуткина Е. Е., Хацевский К. В. Система управления микроклиматом тепличного комплекса на базе нечёткой логики // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 59–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-59-68.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023 г.

© Л. А. Паюк, Н. А. Воронина, А. Д. Умурзакова,

Е. Е. Лазуткина, К. В. Хацевский

GREENHOUSE CLIMATE CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC

Paper is devoted to development and research of the fifth generation greenhouse climate automatic control system. This system is based on fuzzy logic toolbox and it allows to automate control processes using the latest developments in this field. In the work the concept of «microclimate of greenhouse complex» for the region of the risky agricultural zone when growing large strawberries in a closed ground.

Keywords: greenhouse climate, fuzzy logic toolbox, curtaining, aeration, drip irrigation, lighting, automatic control.

References

1. Importozameshcheniye v teplichnoy otrasli Rossii – faktory razvitiya [Import substitution in the Russian greenhouse industry — development factors] // Agrobiznes. *Agribusiness*. URL: <https://www.agbz.ru/articles/importozameshchenie-v-teplichnoy-otrasli-rossii-factory-razvitiya/> (accessed: 15.02.2023). (In Russ.).
2. Volkova I. N. Teplichnaya otrasl' khozyaystva Rossii i faktory, vliyayushchiye na ee razvitiye i razmeshcheniye [Greenhouse industry of Russia and factors influencing its development and localization] // Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy. *Geographical Environment and Living Systems*. 2021. No. 1. P. 93–109. DOI: 10.18384/2712-7621-2021-1-93-109. EDN: WOQICA. (In Russ.).
3. Boyartseva V. K. Mikroklimat teplits. Spravochnik sadovoda [Greenhouse microclimate. Gardener's Guide]. 2010. 420 p. (In Russ.).
4. Sobolev A. V. Effektivnost' regulirovaniya mikroklimata v teplitsakh s pomoshch'yu elektrichestva [The efficiency of the microclimate regulation in greenhouses with the help of electricity] // Vestnik KrasGAU. *The Bulletin of KrasGAU*. 2014. No. 4. P. 154–156. EDN: RXMUDJ. (In Russ.).
5. Olsson G., Piani D. Tsifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya [Digital automation and control systems]. Saint Petersburg, 2001. 557 p. ISBN 5-7940-0069-4. (In Russ.).
6. Sistemy upravleniya mikroklimatom [Climate control systems] // Profit-Agro. *Profit-Agro*. URL: <http://profit-agro.ru/sistemy/sistemy-upravleniya-mikroklimatom/> (accessed: 10.03.2023). (In Russ.).
7. Semenov V. G., Krushel E. G. Matematicheskaya model' mikroklimata teplitsy [Mathematical model of a microclimate of a greenhouse] // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2009. No. 6 (54). P. 32–35. EDN: KUAHMF. (In Russ.).
8. Belov S. M. Sistema okhlazhdeniya v teplichnykh kompleksakh. Mikroklimat v teplitsakh [Cooling system in greenhouse complexes. Microclimate in greenhouses] // Aspirant. 2021. No. 5 (62). P. 55–58. EDN: ELFHPU. (In Russ.).
9. Kulmamirov S. A., Kalabayev A. A. Novyy podkhod upravleniya rezhimami mikroklimata v teplitsakh [A new approach to managing microclimate regimes in greenhouses] // Sinergiya nauk. *Synergy of Sciences*. 2021. No. 59. P. 308–327. EDN: QZACBF. (In Russ.).
10. Tsokur D. S. Sistema stabilizatsii kislotnosti pochvy pri vyrashchivaniy tomатов v usloviyakh zakrytogo grunta [The stabilization system of soil acidity when growing tomatoes in a greenhouse] // Nauchnyy zhurnal KubGAU. *Scientific Journal of KubSAU*. 2013. No. 93. P. 998–1020. EDN: PWFQDK. (In Russ.).
11. Peshko M. S. Adaptivnaya sistema upravleniya parametrami mikroklimata protsessov proizvodstva i khraneniya pishchevykh produktov [Adaptive system for controlling microclimate parameters of food production and storage processes]. Moscow, 2015. 22 p. (In Russ.).
12. Zmiyeva K. A. Avtomaticheskaya sistema kontrolya i regulirovaniya mikroklimata teplichnogo kompleksa [Automatic system for monitoring and regulating the microclimate of a greenhouse complex] // Avtomatizirovannyy elektroprivod i promyshlennaya elektronika. *Automated Electric Drive and Industrial Electronics*. Novokuznetsk, 2018. P. 49–53. EDN: IYPJFU. (In Russ.).
13. Yuran S. I., Vershinin M. N. Sovershenstvovaniye sistemy regulirovaniya mikroklimata na osnove nechetkoy logiki [Improvement of the microclimate control system based on fuzzy logic] // Vestnik NGIEI. *Bulletin NGIEI*. 2019. No. 9 (100). P. 33–45. EDN: FYYJWA. (In Russ.).
14. Averkin A. N. Nechetkiye mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta: kniga po trebovaniyu [Fuzzy sets in control models and artificial intelligence: book on demand]. Moscow, 2013. 312 p. (In Russ.).

15. Panfilov A. E., Krushel E. G. Primeneniye Matlab-prilozheniya PDEapp dlya modelirovaniya dinamicheskikh protsessov s raspredelennymi parametrami [Using the Matlab application PDEapp for modeling dynamic processes with distributed parameters] // *Innovatsionnyye tekhnologii v obuchenii i proizvodstve. Innovative Technologies in Training and Production*. Volgograd, 2021. Vol. 1. P. 118–121. EDN: LOETOQ. (In Russ.).

16. Shilkina S. V., Fokina E. N. Kontroller nechetkoy logiki v upravlenii tekhnologicheskimi protsessami [The controller of fuzzy logic in the management of technological processes] // *Vestnik SibADI. The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018. Vol. 15, no. 1 (59). P. 106–114. EDN: YTMCNS. (In Russ.).

17. Ali R. B., Aridhi E., Mami A. [et al.]. Fuzzy logic controller of temperature and humidity inside an agricultural greenhouse *Environmental Science // 7th International Renewable Energy Congress*. Hammamet, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/IREC.2016.7478929. (In Engl.).

18. Mohamed S., Hameed I. A. A GA-Based Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Greenhouse Climate Control System // *Alexandria Engineering Journal*. 2018. Vol. 57 (2). P. 773–779. DOI: 10.1016/j.aej.2014.04.009. (In Engl.).

19. Nicolosi G., Volpe R., Messineo A. An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse // *Energies*. 2017. Vol. 10, no. 5. P. 1–17. DOI: 10.1039/en10050722. (In Engl.).

20. Li G., Tang L., Zhang X. [et al.]. Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques // *8th International Conference on Environment Science and Engineering*. Barcelona, 2018. Vol. 167. P. 12–19. DOI: 10.1088/1755-1315/167/1/012019. (In Engl.).

PAYUK Lyubov Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk.

SPIN-code: 3333-1750

AuthorID (RSCI): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

Correspondence address: pla@tpu.ru

VORONINA Natalya Alekseyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electric

Power Engineering and Electrical Engineering Department, TPU, Tomsk.

SPIN-code: 3176-9091

AuthorID (RSCI): 790645

ORCID: 0000-0001-9327-6441

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

Correspondence address: voronina@tpu.ru

UMURZAKOVA Anara Daukenovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, TPU, Tomsk.

SPIN-code: 8079-5187

AuthorID (RSCI): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

Correspondence address: granat_72@mail.ru

LAZUTKINA Elena Evgenyevna, Senior Lecturer of Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, TPU, Tomsk.

SPIN-code: 5709-4911

AuthorID (RSCI): 891147

AuthorID (SCOPUS): 56486119300

ResearcherID: AAI-5296-2020

Correspondence address: see@tpu.ru

KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7219-6033

AuthorID (RSCI): 465857

ORCID: 0000-0001-9504-1312

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

Correspondence address: xkv-post@rambler.ru

For citations

Payuk L. A., Voronina N. A., Umurzakova A. D., Lazutkina E. E., Khatsevskiy K. V. Greenhouse climate control system based on fuzzy logic // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 59–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-59-68.

Received December 04, 2023.

© L. A. Payuk, N. A. Voronina, A. D. Umurzakova,
E. E. Lazutkina, K. V. Khatsevskiy

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ И СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В работе исследованы особенности оптимизации режимов электрической сети низкого напряжения для энергоэффективной электропередачи. Основными особенностями данных сетей являются высокие значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности и несоответствие значений напряжений необходимым требованиям. Поэтому в качестве мер улучшения перечисленных параметров сети выбраны симметрирование нагрузок по фазам и компенсация реактивной мощности. Одним из главных факторов эффективного решения данной задачи является определение точек симметрирования нагрузок и компенсации реактивной мощности, а также необходимой мощности используемых устройств. Для решения многокритериальной задачи определения точек подключения устройств проведён анализ существующих целевых функций. В результате предложена целевая функция, включающая в себя приведенные затраты, потери напряжения и коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности. При решении задачи оптимизации с помощью предложенной целевой функции значения напряжения и коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности в точках присоединения потребителей будут находиться в необходимых пределах. Приводятся результаты исследования оптимизационной функции на примере модельной сети. Расчеты проводились в два этапа: поиск сенсорных узлов, затем их исследование на оптимальность. Все расчеты проведены в среде MATLAB с учетом потерь напряжения и мощности. Согласно полученным результатам, в исследуемой сети потери мощности с использованием предложенной целевой функции могут быть уменьшены до 19 % от исходных потерь и получена значительная экономия финансовых средств.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, симметрирование нагрузок, компенсация реактивной мощности, несимметрия напряжений, качество электроэнергии, потери электроэнергии.

Введение. При передаче электрической энергии от источника потребителю неизбежно возникают ее потери. В случае неэффективной передачи и потребления эти потери значительно увеличиваются, что приводит к ухудшению качества поставляемой электрической энергии. Требования к качеству электрической энергии в России закреплены в государственном стандарте ГОСТ 32145-2013 [1]. Также существует международный стандарт на качество электроэнергии IEC 61000-3-2. Повышение энергоэффективности и энергосбережения является приоритетной задачей Российской Федерации [2]. Данная работа направлена на улучшение показателей качества электроэнергии и уменьшения потерь, что позволит повысить энергоэффективность и энергосбережение, поэтому является актуальной.

В данной работе исследованы особенности оптимизации режима работы в сетях низкого напряжения. Сети 0,4 кВ имеют несимметричную по фазам нагрузку вследствие наличия однофазных потребителей и непрерывного изменения потребляемой электроэнергии. Такое несимметричное по фазам потребление влечет дополнительные потери электроэнергии, вызывает несимметрию напряжения и отклонение напряжения, несоответствующее нормам качества электроэнергии. Несимметрия напряжения приводит к снижению срока службы электрооборудования. В некоторых случаях может привести к предаварийным режимам или поломке электрооборудования.

Несимметрию напряжения характеризуют такие показатели качества электроэнергии, как коэффи-

циенты несимметрии напряжений по обратной K_{2U} и нулевой последовательности K_{0U} . По ГОСТ 32145-2013 данные коэффициенты не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю. Значения напряжения характеризуются таким показателем качества электроэнергии, как отклонение напряжения. В точке присоединения потребителей отклонение напряжения не должно превышать 10 % от номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю [1].

В настоящее время разработано достаточно устройств для уменьшения несимметрии фазных напряжения и нагрузок, например, [3]. Для уменьшения отклонения напряжения, а также симметрирования напряжения эффективно использовать устройства компенсации реактивной мощности, например, [4]. Для ИЭС с ААС (интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью) такими устройствами могут быть так называемые устройства FACTS (гибкие системы передачи переменного тока) [4]. Обеспечение надежности электроснабжения и эффективного использования данных технических средств во многом зависит от правильного их выбора, определения точек подключения и расчета экономической эффективности.

Для определения типа устройств, точек их установки и необходимой мощности требуется решить многокритериальную оптимизационную задачу. В качестве критерия оптимизации обычно считают условие минимума потерь электроэнергии. В целевую функцию включают параметры, которые необходимо оптимизировать [5]. Параметры электрической сети, которые должны находиться в заданных пределах, можно задать в виде ограничений к целевой функции. В работах [6–8] целевые функции включают критерии: минимизацию потерь электроэнергии, отклонения напряжения, издержек и потерь активной мощности, а также максимизацию выгоды. Задачи по симметрированию напряжений и нагрузок в данных работах не решались. В работе [9] рассматривается задача определения мест подключения и мощности устройств компенсации реактивной мощности для симметрирования напряжений в системах электроснабжения с тяговыми подстанциями. В некоторых работах предлагается симметрирование фазных нагрузок группы приемников.

В этой работе предлагается методика определения оптимальных точек подключения устройств симметрирования нагрузок и компенсации реактивной мощности в сети низкого напряжения для уменьшения потерь активной мощности и обеспечения требуемых значений напряжений и коэффициента несимметрии по нулевой последовательности. Также приведены результаты исследования предложенной методики на модельной сети.

Основная часть. Будем считать задачей оптимизации уменьшение потерь активной мощности и напряжения и уменьшение значений коэффициента несимметрии по нулевой последовательности. С целью улучшения данных показателей рассмотрим целевую функцию, содержащую затраты, потери напряжения и коэффициент несимметрии по нулевой последовательности:

$$F = \lambda_1 I_{\Delta 3} + \lambda_2 I_{K_{0U}} + \lambda_3 I_{\Delta U} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\text{при } U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}.$$

Здесь λ — весовые коэффициенты, они должны иметь значения от 0 до 1 и в сумме давать 1, U_i — узловые напряжения, U_{\min} и U_{\max} — минимально и максимально допустимые значения напряжений. $I_{\Delta 3}$ — индекс затрат, определяемый отношением стоимости приведенных затрат после оптимизации Z_A к стоимости потерь электроэнергии до оптимизации Z_0 :

$$I_{\Delta 3} = \frac{Z_A}{Z_0}.$$

Затраты на потери электроэнергии до оптимизации равны [10]:

$$Z_0 = c_p \cdot \tau \cdot \Delta P_{\Sigma,0}.$$

Потери активной мощности равны сумме потерь активной мощности на всех участках сети:

$$\Delta P_{\Sigma,0} = \sum_{j=1}^N \Delta P_{ij},$$

$$\Delta P_{ij} = R_{ij} \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2}.$$

Здесь c_p — стоимость электроэнергии, тыс. руб./кВт·ч; τ — время максимальных потерь электроэнергии в сети, ч; $\Delta P_{\Sigma,0}$ — потери активной мощности, кВт.

Стоимость приведенных затрат после оптимизации равна сумме затрат на установку, обслуживание устройств КРМ (компенсации реактивной мощности) и симметрирования нагрузок и потерь электроэнергии:

$$Z_A = Z_{КРМ} + Z_C + Z_{\Delta P}.$$

Здесь $Z_{КРМ}(Z_C) = Z_{КРМ(C)уем} + Z_{КРМ(C)обсл}$, $Z_{\Delta P}$ — стоимость потерь электроэнергии после оптимизации.

Стоимость установки устройств КРМ и симметрирования нагрузок определялась:

$$Z_{КРМ(C)уем} = E_n \cdot (k_{КРМ(C)} \cdot \sum_j^N Q_j + k_{узл} k_{уем}),$$

$k_{КРМ(C)}$ — удельная стоимость устройства КРМ или симметрирующего; Q_j — мощность устройства КРМ (в кВАр) или мощность симметрирующего устройства P_j (в кВт) выбираются из дискретного ряда; j — узел размещения устройства; E_n — номинальный коэффициент эффективности капиталовложений для распределительной сети $E_n = 0,12$ [10]; $k_{узл}$ — количество узлов, в которые устанавливаются дополнительные устройства; $k_{уем}$ — стоимость установки устройства, тыс. руб. В качестве стоимости устройств использовалась средняя рыночная цена: для устройств КРМ — 4 тыс. руб./кВАр, для устройств симметрирования нагрузок — 7 тыс. руб./кВт.

Стоимость обслуживания установленных устройств вычислялась:

$$Z_{КРМ(C)обсл} = k_{узл} k_{обсл},$$

$k_{обсл}$ — удельная стоимость обслуживания устройства в одном узле в год (тыс. руб./год).

$I_{\Delta U}$ — индекс отклонения напряжения в формуле (1) равен:

$$I_{\Delta U} = \frac{I_{U,A}}{I_{U,0}}$$

где индекс потерь напряжения в исходном состоянии:

$$I_{U,0} = \sum_{i=2}^N \left[(U_{\max} - U_i^0)^2 + (U_i^0 - U_{\min})^2 \right].$$

U_i^0 — напряжение в сети в исходном состоянии, N — количество узлов. Индекс потерь напряжения после оптимизации определяется:

$$I_{U,A} = \sum_{i=2}^N \left[(U_{\max} - U_i^A)^2 + (U_i^A - U_{\min})^2 \right],$$

где U_i^A — напряжение в сети после оптимизации.

$I_{K_{0v}}$ — индекс несимметрии напряжения по нулевой последовательности определяется отношением:

$$I_{K_{0v}} = \frac{K_{0\Sigma}^A}{K_{0\Sigma}^0}.$$

$K_{0\Sigma}^0$ — суммарный коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности до оптимизации равен:

$$K_{0\Sigma}^0 = \sum_{i=1}^N K_{0i}^0,$$

K_{0i}^0 — значение коэффициента несимметрии напряжения в узле, N — количество узлов.

Суммарный коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности после оптимизации определяется аналогично:

$$K_{0\Sigma}^A = \sum_{i=1}^N K_{0i}^A.$$

Предварительно необходимо определить узлы, в которых необходимо установить устройства КРМ, так называемые сенсорные узлы. Согласно [11], такие узлы выбираются с учетом значений коэффициента чувствительности по реактивной мощности и коэффициента чувствительности по напряжению. Для определения потенциальных для симметрирования нагрузок узлов будем использовать коэффициенты чувствительности по активной мощности и по нулевой последовательности.

Коэффициент чувствительности потерь активной мощности определяется как первая производная от потерь активной мощности в линии по активной мощности в каждом узле j :

$$K_{\Delta P}^P = \frac{d\Delta P}{dP_j} = \frac{2P_j R_{jj}}{U_j^2}.$$

Так как $\Delta P = R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2}$. Для целей симметрирования нагрузок по фазам расчет данных коэффициентов необходимо произвести для каждой фазы ($K_{\Delta P A}^P$, $K_{\Delta P B}^P$, $K_{\Delta P C}^P$). Коэффициент чувствительности потерь реактивной мощности равен:

$$K_{\Delta P}^Q = \frac{d\Delta P}{dQ_j} = \frac{2Q_j R_{jj}}{U_j^2}.$$

Расчет также проводился для каждой фазы ($K_{\Delta P A}^Q$, $K_{\Delta P B}^Q$, $K_{\Delta P C}^Q$). Коэффициент чувствительности по несимметрии напряжения нулевой последовательности K_{0v} определяется как отношение значения коэффициента несимметрии K_{0v}^A в узлах к предельному нижнему значению (4 %). Коэффициент чувствительности по напряжению K_U равен отноше-

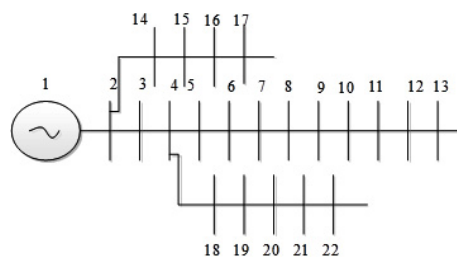


Рис. 1. Схема модельной сети

Таблица 1

Мощности нагрузок в узлах исследуемой сети

N узла	$P_{A'}$ кВт	$P_{B'}$ кВт	$P_{C'}$ кВт	$Q_{A'}$ кВАр	$Q_{B'}$ кВАр	$Q_{C'}$ кВАр
1	0,8	0,8	0,8	0,3	0,3	0,3
2	1	1	1	0,4	0,4	0,4
3	1,5	1,5	1,5	0,4	0,4	0,2
4	2	2	2	0,9	0,9	0,9
5	3	3	1	1,1	1,1	1,1
6	1,1	1,1	1,1	0,3	0,3	0,3
7	6	6	3	2	2	2
8	1,5	1,5	1,5	0,4	0,4	0,4
9	3	3	3	1	1	1
10	8	8	3	6	6	6
11	3	1	1	0,3	0,3	0,5
12	2	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
13	3	1,3	1,3	0,1	0,1	0,1
14	2,5	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3
15	3	1,8	1,8	0,4	0,4	0,4
16	1	3	3	0,1	0,1	0,1
17	2	1	2	0,2	0,2	0,2
18	3	1	1,2	0,4	0,4	0,4
19	2	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5
20	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
21	1,7	1,7	1,7	1	1	1
22	2,3	2,3	2,3	0,8	0,8	0,8

нию значения напряжения к предельному нижнему значению $0,9U_n$. Он рассчитывался по фазам и затем определялся суммарный для всех трех фаз.

Расчеты проводились для модельной сети, содержащей два ответвления и 22 узла (рис. 1) в среде MATLAB. В табл. 1 приведены мощности нагрузок в узлах исследуемой сети, в табл. 2 приведены активное и реактивные сопротивления участков линии. Полученные в результате расчетов коэффициенты чувствительности по активной, реактивной мощности для фазы А и коэффициента чувствительности по напряжению приведены в табл. 3. Также в табл. 3 приведены значения коэффициента чувствительности по нулевой последовательности.

Потенциальными для КРМ следует выбирать узлы, имеющие наибольшие значения коэффициента чувствительности по реактивной мощности и наименьшие значения коэффициента чувствительности по напряжению. Потенциальными для симметрирования нагрузок должны быть узлы, имеющие наибольшие значения коэффициента

Сопротивления линий исследуемой сети

Линия	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10
r , Ом	0,24	0,24	0,24	0,23	0,4	0,3	0,3	0,34	0,3
x , Ом	0,08	0,1	0,08	0,06	0,15	0,08	0,1	0,1	0,1
Линия	10–11	11–12	12–13	2–14	14–15	15–16	16–17	4–18	18–19
r , Ом	0,35	0,5	0,3	0,4	0,25	0,3	0,3	0,5	0,35
x , Ом	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	0,2
Линия	19–20	20–21	21–22						
r , Ом	0,4	0,25	0,5						
x , Ом	0,1	0,1	0,15						

Таблица 3

Результаты расчетов коэффициентов чувствительности

N узла	$K_{\Delta PA}^P$	$K_{\Delta PA}^Q$	K_{UA}	K_{KO}
1	0,4267	0,1417	1,2121	0,0000
2	0,4406	0,1460	1,1834	0,1245
3	0,3854	0,1444	1,1537	0,2502
4	0,3721	0,1409	1,1287	0,3605
5	0,5108	0,1986	1,1056	0,4632
6	0,2934	0,1148	1,0733	0,5971
7	0,3640	0,1442	1,0555	0,6746
8	0,2936	0,1217	1,0338	0,7707
9	0,3190	0,1360	1,0165	0,8520
10	0,2457	0,1090	0,9983	0,9408
11	0,1475	0,0203	0,9842	1,0122
12	0,1337	0,0214	0,9767	1,0490
13	0,0488	0,0016	0,9697	1,0815
14	0,1287	0,0151	1,1611	0,1755
15	0,0575	0,0067	1,1539	0,1871
16	0,0347	0,0035	1,1507	0,1883
17	0,0232	0,0023	1,1488	0,1857
18	0,2029	0,0704	1,1099	0,3752
19	0,1003	0,0442	1,1005	0,3948
20	0,0816	0,0425	1,0958	0,4007
21	0,0428	0,0192	1,0921	0,4006
22	0,0494	0,0172	1,0902	0,4005

чувствительности по активной мощности и коэффициента чувствительности по нулевой последовательности. Значение узлов, для которых коэффициенты чувствительности по активной и реактивной мощности имеют наибольшие значения, выделены полужирным шрифтом. Полужирным шрифтом также выделены значения узлов, имеющие значения коэффициента чувствительности по напряжению меньше 1,01, и узлы, имеющие коэффициенты чувствительности по нулевой последовательности больше единицы.

Как следует из табл. 3, узлы, имеющие наименьшие значения коэффициента чувствительности по напряжению и значения коэффициента чувствительности по нулевой последовательности больше единицы, не совпадут с узлами, имеющими наибольшие значения коэффициентов чувствительности по мощностям. Поэтому, также в качестве потенциальных для оптимизации среди узлов, имеющих недопустимые значения напряжения, был выбран узел, имеющий наибольшие значения коэффициентов чувствительности по активной и реактивной мощности, т.е. узел 10. Среди узлов, имеющих недопустимые значения коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности, был выбран узел, также имеющий наибольшие значения коэффициентов чувствительности по активной и реактивной мощности, это узел 11.

Таким образом, для симметрирования нагрузок выберем узлы под номерами 2, 5, 11, 12 и 13. Симметрирование нагрузок обычно осуществляется переключением части нагрузки с более нагруженной фазы на менее нагруженные. При этом в большинстве устройств перераспределяется полная нагрузка, а не только ее активная составляющая. Поэто-

Таблица 4

Уменьшение потерь мощности для исследуемых вариантов

	Симмет. в узлах 2 и 5	Симмет. и КРМ в узлах 2 и 5	Симмет. и КРМ в узлах 10 и 11	КРМ в узлах 2 и 5	Симмет. в узлах 2, 12, 13	КРМ в узлах 2, 5, 10, 11	КРМ в узлах 2, 5, 10, симмет. в узлах 2, 5
Уменьшение потерь, %	6,7	16,3	14,6	11,8	6,1	14,5	19
Экономия, тыс. руб.	93,39	438,32	497,37	428,37	89,57	499,72	499,87
F	0,4507	0,4356	0,5201	0,8021	0,5666	0,8010	0,4339

му при расчетах считалось, что симметрирование нагрузок производилось по активной и реактивной мощности. В качестве потенциальных для КРМ выберем узлы под номерами 2, 5, 10, 11, 12, 13.

Далее для исследуемой модельной линии проведен расчет уменьшения потерь и экономии для режимов КРМ и симметрирования нагрузок для различных вариантов оптимизации. Результаты расчетов приведены в табл. 4. При расчетах учитывались потери в нулевом проводе и взаимные индуктивности линий. Для КРМ в узлах 2, 5, 10, 11, 12 были взяты следующие мощности устройств: 30 кВАр, 25 кВАр, 10 кВАр, 5 кВАр, 2 кВАр соответственно. Узел 13 исключен из потенциальных для КРМ узлов ввиду малого значения реактивной мощности. При симметрировании нагрузок были использованы следующие значения мощностей устройств: в узле 2—30 кВт, 5—30 кВт, 10—10 кВт, 11—6 кВт, 12—4 кВт, 13—3 кВт.

Согласно приведённым в табл. 4 результатам, наибольшие значения уменьшения потерь соответствуют режиму КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования в узлах 2, 5 (до 19 %). При симметрировании нагрузок также в узле 11 значения напряжения будут превышать необходимые значения, поэтому для данного варианта оптимизации в нем симметрирование не производилось.

Результаты расчетов для различных режимов приведены в табл. 4. Таким образом, режиму КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования нагрузок в узлах 2, 5 будут соответствовать наибольшее уменьшение потерь и экономия финансовых средств, а также минимум целевой функции. Режим симметрирования в узлах 2 и 5 является невыгодным. Это объясняется достаточно большими затратами на симметрирование при соответствующем значении уменьшения потерь мощности. Полученные в результате расчетов значения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности для более эффективных режимов приведены в виде графиков на рис. 2, значения одного из фазных напряжений приведены на рис. 3. Согласно рис. 2, все режимы, кроме режима КРМ в узлах 2 и 5, обеспечивают необходимые значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности. Из анализа графиков, приведённых на рис. 3, следует, что лишь два режима обеспечивают требуемые значения фазного напряжения — режим КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования в узлах 2, 5 и режим КРМ и симметрирования в узлах 10 и 11.

Таким образом, режим КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования в узлах 2, 5 является наиболее оптимальным для КРМ и симметрирования нагрузок. По результатам исследования можно сделать вывод о необходимости учета при оптимизации не только коэффициентов чувствительности по активной, по реактивной мощности, по напряжению, но и по коэффициенту чувствительности по несимметрии нулевой последовательности. Включение в целевую функцию коэффициента несимметрии по нулевой последовательности позволяет более эффективно уменьшить потери и улучшить основные показатели качества электроэнергии в сети низкого напряжения.

Таким образом, использование предложенного метода оптимизации размещения компенсирующих и симметрирующих устройств в рассмотренной модельной линии позволит уменьшить потери мощности до 19 % по сравнению с исходным режимом и обеспечить необходимые значения коэффициента

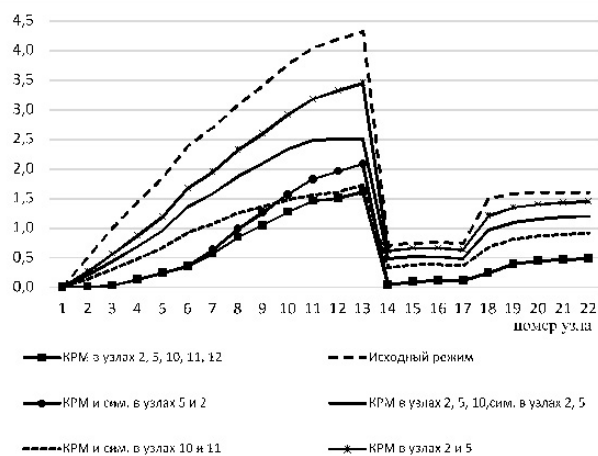


Рис. 2. Значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности (K_{0U} , %) в узлах

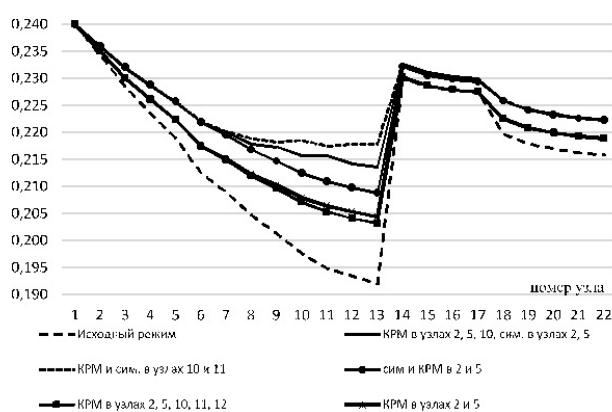


Рис. 3. Значения фазного напряжения в узлах (в кВ)

Таблица 5

Значения весовых коэффициентов и соответствующие им значения целевой функции

Значения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	F
0,1; 0,7; 0,2	0,4691
0,1; 0,8; 0,1	0,4339
0,4; 0,5; 0,1	0,5496
0,8; 0,1; 0,1	0,7632
0,4; 0,1; 0,5	0,8250
0,1; 0,1; 0,8	0,9074

энта несимметрии по нулевой последовательности и значения напряжения в узлах. Окончательный выбор того или иного варианта оптимизации зависит от стоимости необходимых технических средств, включая стоимость их обслуживания, и от требуемых значений показателей качества электроэнергии.

Значения весовых коэффициентов λ и соответствующие им значения целевой функции (1) для режима КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования в узлах 2, 5 приведены в табл. 5. При значениях весовых коэффициентов $\lambda_1 = 0,1$ и $\lambda_2 = 0,8$,

$\lambda_3 = 0,1$ целевая функция будет иметь наименьшее значение.

Заключение. В работе предложена целевая функция для эффективной оптимизации электрической сети низкого напряжения. Приведены результаты исследования оптимизации модельной сети низкого напряжения с помощью предложенной целевой функции. Целевая функция содержит индекс затрат, отклонения напряжения и коэффициент несимметрии по нулевой последовательности. Приводятся значения весовых коэффициентов, обеспечивающие минимум данной целевой функции. Ухудшение качества электроэнергии в сетях низкого напряжения в основном связано с несимметрией напряжения и значительными отклонениями напряжения от номинального. Поэтому в качестве мер оптимизации были выбраны КРМ и симметрирование нагрузок. С помощью предложенной методики можно определить точки подключения необходимых устройств и их мощность. При этом будут обеспечены значения напряжения и коэффициента несимметрии по нулевой последовательности во всей сети в необходимых пределах и значительная экономия финансовых средств.

Библиографический список

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/75c/uwl0o12ve2rp8gyo3lndsy7jdr8e6q25/document_119047.pdf (дата обращения: 14.06.2023).
3. Орлов В. В., Орлова Э. О. Анализ способов симметрирования напряжения в сетях 0,4/0,23 кВ // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2020. № 2 (59). С. 56–63. EDN: HCXTRQ.
4. Кубарьков Ю. П., Кулаев И. С., Алехин Р. А. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределённой генерацией // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Серия: технические науки. 2018. № 3 (59). С. 154–164. EDN: YPDAIP.
5. Варганова А. В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17, № 3. С. 48–55. DOI: 10.14529/power170309. EDN: ZGQBYH.
6. Толба М. А. Х. Развитие методов оптимизации размещения компенсирующих устройств и возобновляемой распределённой генерации в радиальных электрических сетях: дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2018. 171 с.

7. Sidorova V. T. Determining Mains Connection Points Charging Stations on RES for Electric Vehicles // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. 2021. P. 85–89. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446376.

8. Тульский В. Н., Ванин А. С., Толба М. А. Х. Оптимальное размещение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети // *Электричество*. 2017. № 6. С. 16–23. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-6-16-23. EDN: YQFRCZ.

9. Третьяков Е. А. Совершенствование методов управления передачей и распределением электроэнергии в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2021. 403 с.

10. Лыкин А. В. Электрические системы и сети. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 363 с. ISBN 978-5-7782-3037-8.

11. Abdelaziz A. Y., Ali E. S., Abd-Elazim S. M. Optimal Sizing and Locations of capacitors in radial distribution systems via flower pollination optimization algorithm and power loss index // *Engineering Science and Technology an International Journal*. 2016. Vol. 19, Issue 1. P. 610–618. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.09.002.

СИДОРОВА Вера Тагировна, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электромеханики Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

SPIN-код: 1146-4586

AuthorID (SCOPUS): 55036200000

ResearcherID: E-3970-2014

Адрес для переписки: veranig@yandex.ru

ВОЛКОВ Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), декан электроэнергетического факультета Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

SPIN-код: 9950-2158

ResearcherID: F-6987-2014

ОРЛОВ Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой электромеханики Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

SPIN-код: 9991-5367

AuthorID (SCOPUS): 57196714608

ResearcherID: F-5126-2014

Для цитирования

Сидорова В. Т., Волков С. В., Орлов А. И. Метод оптимизации размещения компенсирующих и симметрирующих устройств в электрических сетях низкого напряжения // *Омский научный вестник*. 2024. № 2 (190). С. 69–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-69-76.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023 г.

© В. Т. Сидорова, С. В. Волков, А. И. Орлов

THE METHOD FOR OPTIMIZING THE PLACEMENT OF COMPENSATING AND BALANCING DEVICES IN LOW VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS

The paper studies the optimization features of low-voltage electrical network modes for energy-efficient power transmission. The main features of these networks are the high values of the zero-sequence voltage unbalance factor and the mismatch of voltage values with the necessary requirements. Therefore, balancing the loads by phases and reactive power compensation are chosen as measures to improve the listed network parameters. One of the main factors for the effective solution of this problem is the determination of load balancing points and reactive power compensation, as well as the required power of the devices used. To solve the multicriteria problem of determining device connection points, an analysis of existing objective functions is carried out. As a result, a target function is proposed that includes costs, voltage losses, zero-sequence voltage asymmetry coefficient. When solving the optimization problem with the help of the proposed objective function, the voltage values and the voltage asymmetry factor at the consumer connection points will be within the required limits. The results of a study of the optimization function using the example of a model network are presented. The calculations are carried out in two stages: the search for sensor's nodes, then their study for optimality. All calculations are carried out in the MATLAB environment, taking into account voltage losses and power.

Keywords: multicriteria optimization, load balancing, reactive power compensation, voltage unbalance, power quality, power losses.

References

1. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 16 p. (In Russ.).
2. Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda [Energy strategy of the Russian Federation for the period until 2035]. URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/75c/uw10o12ve2rp8gyo3lndsy7jdr8e6q25/document_119047.pdf (accessed: 14.06.2023). (In Russ.).
3. Orlov V. V., Orlova E. O. Analiz sposobov simmetrirovaniya napryazheniya v setyakh 0.4/0.23 kV [Analysis of voltage symmetry methods in 0.38/0.22 kV networks] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. *Electricity. Transfer and Distribution*. 2020. No. 2 (59). P. 56–63. EDN: HCXTRQ. (In Russ.).
4. Kubar'kov Yu. P., Kulayev I. S., Alekhin R. A. Optimizatsiya urovney napryazheniya v aktivno-adaptivnykh setyakh s raspredelennoy generatsiyey [Optimization of voltage levels in active-adaptive networks with distributed generation] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskkiye nauki. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2018. No. 3 (59). P. 154–164. EDN: YPDAIP. (In Russ.).

5. Varganova A. V. O metodakh optimizatsii rezhimov raboty elektroenergeticheskikh sistem i setey [About optimization methods of power supply system and network modes] // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. *Bulletin of South Ural State University. Series Power Engineering*. 2017. Vol. 17, no. 3. P. 48–55. DOI: 10.14529/power170309. EDN: ZGQBYH. (In Russ.).
6. Tolba M. A. Kh. Razvitiye metodov optimizatsii razmeshcheniya kompensiruyushchikh ustroystv i vozobnovlyayemoy raspredelennoy generatsii v radial'nykh elektricheskikh setyakh [Development of methods for optimizing the placement of compensating devices and renewable distributed generation in radial electric networks]. Moscow, 2018. 171 p. (In Russ.).
7. Sidorova V. T. Determining Mains Connection Points Charging Stations on RES for Electric Vehicles // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. 2021. P. 85–89. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446376. (In Engl.).
8. Tul'skiy V. N., Vanin A. S., Tolba M. A. Kh. Optimal'noye razmeshcheniye batarey kondensatorov v radial'noy raspredelitel'noy seti [Optimal capacitor allocations and sizing in radial distribution networks using a novel hybrid particle swarm optimization algorithm] // *Elektrichestvo. Elektrichestvo*. 2017. No. 6. P. 16–23. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-6-16-23. EDN: YQFRCZ. (In Russ.).

9. Tretyakov E. A. Sovershenstvovaniye metodov upravleniya peredachey i raspredeleniyem elektroenergii v adaptivnykh sistemakh elektrosnabzheniya statsionarnykh potrebiteley zheleznykh dorog [Improving methods for managing the transmission and distribution of electricity in adaptive power supply systems for stationary railway consumers]. Omsk, 2021. 403 p. (In Russ.).

10. Lykin A. V. Elektricheskiye sistemy i seti [Electrical systems and networks]. Novosibirsk, 2017. 363 p. ISBN 978-5-7782-3037-8. (In Russ.).

11. Abdelaziz A. Y., Ali E. S., Abd-Elazim S. M. Optimal Sizing and Locations of capacitors in radial distribution systems via flower pollination optimization algorithm and power loss index // Engineering Science and Technology an International Journal. 2016. Vol. 19, Issue 1. P. 610–618. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.09.002. (In Engl.).

SIDOROVA Vera Tagirovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electromechanics Department, Mari State University, Yoshkar-Ola.

SPIN-code: 1146-4586

AuthorID (SCOPUS): 55036200000

ResearcherID: E-3970-2014

Correspondence address: veranig@yandex.ru

VOLKOV Sergei Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Electrical Power Engineering Faculty, Mari State University, Yoshkar-Ola.

SPIN-code: 9950-2158

ResearcherID: F-6987-2014

ORLOV Alexander Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Electromechanics Department, Mari State University, Yoshkar-Ola.

SPIN-code: 9991-5367

AuthorID (SCOPUS): 57196714608

ResearcherID: F-5126-2014

For citations

Sidorova V. T., Volkov S. V., Orlov A. I. The method for optimizing the placement of compensating and balancing devices in low voltage electrical networks // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 69–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-69-76.

Received June 21, 2023.

© V. T. Sidorova, S. V. Volkov, A. I. Orlov

¹ Омский институт
водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного
университета водного транспорта,
г. Омск

² Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

³ Омское командное
речное училище
имени В. И. Евдокимова
Омского института
водного транспорта — филиала
Сибирского государственного
университета водного транспорта,
г. Омск

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНДУКТИВНОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ n -Й ГАРМОНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

С помощью методологической базы исследования (основ теории вероятности и математической статистики) произведена обработка проведенного эксперимента на объекте исследования. Данным объектом является механический цех ЗАО «СибгазСтройдеталь», который занимается обеспечением нужд газовой, нефтяной и энергетической отраслей промышленности. В данной работе углублённо изучен вопрос об определении кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения $\{K_{U_n}\}$. Гармонические искажения являются постоянным явлением в электрических сетях. Высшие гармоники оказывают негативное влияние на электрическую сеть, в том числе и на электропотребителей (снижение срока службы, производительности и т.д.). Проблема несинусоидальности напряжений изучается довольно давно и результаты, полученные в ходе этих исследований, подтверждают наличие большого количества повреждений у потребителей электроэнергии, которые находятся в эксплуатации. Определена вероятность возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по K_{U_n} на полигоне исследования. В работе проводится анализ результатов, полученных с помощью проведенного исследования. По результатам анализа приведены соответствующие выводы.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, высшие гармоники, кондуктивная помеха, математическая статистика и теория вероятностей, коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения.

Введение. В настоящее время, методологические базы исследования (основы теории вероятности и математической статистики) распространяются в различные сферы научно-технической деятельности, чтобы произвести обработку результатов экспериментальных или лабораторных исследований. Благодаря математическому аппарату базы исследования можно определить вероятность появления различных отрицательных факторов, которые влияют на электрическое оборудование [1]. Проведённые ранее экспериментальные исследования по определению $K_{U(n)}$ были направлены в разные отрасли научно-технической деятельности: проведение математического анализа или с помощью приборов-анализаторов качества электроэнергии (КЭЭ) [2–5]. Результаты проверялись на соответствие с нормативными документами, регулирующими качество электроэнергии [6]. В данной статье предлагается совместный (двухсторонний) подход к изучению определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи (ЭМП).

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в электрических сетях объекта исследования наблюдается неудовлетворительное состояние КЭЭ [7–9]. Электромагнитная обстановка (ЭМО) в электрических сетях 0,4 кВ характеризуется отклонением такого показателя качества электрической энергии (ПКЭ), как несинусоидальность напряжения.

Гармонические искажения — довольно частое явление в электрических сетях различного класса напряжений и один из показателей, по которому оценивается КЭЭ [1]. Данный показатель характеризуется $K_{U(n)}$. Эти значения имеют случайный характер, наиболее полную характеристику случайных величин дают законы их распределения. Поэтому для анализа и дальнейшего прогноза изменения $K_{U(n)}$ необходимо применить методологические базы исследования.

Надёжность электроснабжения и КЭЭ и их проблемы изучаются уже давно. Данные темы имеют тесную связь между собой, т.к. при снижении КЭЭ также снижается надёжность электрооборудования и систем электроснабжения в целом. Вследствие этого, применяя методологические базы исследования, можно определять возникновение $K_{U(n)}$ в электрических сетях и спрогнозировать различные организационные или технические мероприятия для снижения $K_{U(n)}$, но и одновременно повышая надёжность электрооборудования.

Цель работы. С помощью методологической базы исследования определить вероятность появления $K_{U(n)}$, опираясь на проведенные испытания на объекте исследования [7–9]. Результаты проверялись на соответствие с нормативными документами, регулирующими КЭЭ.

Задачи:

- 1) на основании методологической базы исследования определить основные статистические параметры $K_{U(n)}$;
- 2) определить вероятность появления $K_{U(n)}$ на объекте исследования.

Основная часть. Нормальное функционирование многих предприятий, их безопасность и экономическая эффективность зависят от качества поставляемой электрической энергии. Ведущую роль в установлении требований к электрической энергии, поставляемой сетевыми организациями, играют стандарты электромагнитной совместимости и качества электрической энергии. Основным нормативно-техническим и методическим докумен-

том, устанавливающим показатели и нормы качества электрической энергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трёхфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются сети, находящиеся в собственности различных потребителей электрической энергии (точки подключения), является ГОСТ 32144-2013 [6]. В дальнейших наших исследованиях нормы показателей КЭЭ или согласованные значения принимаются уровнями ЭМС технических средств для кондуктивных низкочастотных ЭМП в системах электроснабжения СЭС общего назначения. Далее для сокращения записи термин «согласованные значения» опускается.

Показатели КЭЭ как технологические параметры режимов ЭЭС в значительной степени оказывают влияние на ЭМС технических средств. Соответствие уровней ЭМС для кондуктивных низкочастотных ЭМП, нормированным или согласованным согласно ГОСТ 32144-2013 требованиям, необходимо: для обеспечения мероприятий по защите жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного имущества, по охране окружающей среды; для повышения технико-экономических показателей производства и качества выпускаемой ими продукции [10–13].

Значения показателей КЭЭ, вышедшие за нормируемые пределы (далее нестандартные показатели КЭЭ), усложняют ЭМО в электрических сетях общего назначения. Из-за этого уровни ЭМС технических средств нарушаются, что влечёт за собой снижение качества функционирования электрических сетей [1].

Электроэнергия рассматривается как товар на оптовом и розничном рынках и обладает целым рядом специфических свойств, таких как непосредственное использование при создании многих видов продукции и оказание существенного влияния на экономические показатели производства и качество выпускаемой продукции. Качество электроэнергии влияет на качество функционирования электроприёмников [13, 14].

При изучении режимов ЭЭС и ЭМС технических средств применяются некоторые понятия, термины и определения, которые, в общем, дополняют друг друга при описании ЭМО. Приведенные определения можно при необходимости изменять, вводя в них производные признаки, раскрывая значения используемых в них терминов, указывая объекты определяемого понятия. Изменения не должны нарушать объем и содержание понятий. Эти требования ГОСТ Р 50397-92 учитываются при дальнейших исследованиях электромагнитных переходных процессов в ЭЭС.

Сложность обеспечения ЭМС технических средств в значительной мере объясняется нестабильностью электрических режимов в ЭЭС, низким качеством электроэнергии. В действительности в системе постоянно происходит множество изменений: включаются и отключаются потребители, меняется их режим работы, производятся нормальные технологические и аварийные коммутации оборудования, работают регуляторы частоты и напряжения, системная автоматика. К тому же достаточно часто происходят аварии, связанные, например, с короткими замыканиями, обрывами проводов и повреждениями кабелей, грозвыми поражениями оборудования и т.п. Строго говоря, установившегося режима ЭЭС не существует. Есть бесконечная, никогда не прекращающаяся смена режимов —

не прекращающийся переходный процесс, протекающий во времени [1].

Переходный процесс в ЭЭС происходит при любом изменении её параметров, схемы или режима. Его интенсивность определяется степенью нарушения баланса мощностей, сопровождающего это изменение. Для упрощения расчета и анализа переходных процессов их принято подразделять на электромагнитные и электромеханические [11]. Четкой границы между стадиями переходного процесса не существует. Все определяют цели и условия решаемых задач.

Средства измерений должны усреднять измеряемые показатели качества напряжения в интервале времени 10 мин, а показатель качества частоты в интервале времени 20 с в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30 [15].

В интервале усреднения формируется одно значение измеряемого показателя КЭ, являющегося результатом усреднения N -х измерений, каждое из которых получается как среднее значение на временном интервале длительностью от 8 до 16 периодов основной частоты (0,16–0,32) с. Эти периоды представляются измерительными окнами. Каждое усредненное значение показателя КЭ представляет текущее значение, измеренное в реальном времени.

Средства измерений должны обеспечивать выявление кратковременных перенапряжений, провалов и отключений измеряемых напряжений длительностью более 0,01 с. В случае, если на интервале измерений, равном ширине измерительного окна, происходит любое из этих явлений, результаты измерений в этом окне должны игнорироваться.

Средства измерений должны обеспечивать нормальную работу при снижении напряжения питания до 80 % от номинального напряжения. При большем снижении или исчезновении напряжения питания средства измерений должны обеспечивать сохранение установочных параметров, оперативных уставок, накопленной в памяти информации, а также отсчет текущего времени. При восстановлении напряжения питания до 80 % от номинального значения средства измерений должны обеспечивать автоматическое восстановление нормальной работы.

Средства измерений должны обеспечивать накопление измерительной информации за время не менее 7 суток и хранение этой информации при отключенном питании не менее 15 суток. Современные измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) по измерению и анализу показателей КЭ отвечают изложенным требованиям и осуществляют математическую обработку результатов измерения в соответствии с допустимыми алгоритмами. Все измерительные приборы должны соответствовать требованиям Госстандарта России [1].

Накоплен положительный опыт использования в наших экспериментальных исследованиях уровней ЭМС следующих приборов: ИВК «ОМСК-М», прибор показателей качества электроэнергии ППКЭ-1-50М, анализаторы качества электроэнергии ЭРИС-КЭ.02, АКЭ-823 и измеритель показателей качества электроэнергии «Ресурс-ПКЭ-1,5» [16].

Однако при значительных нарушениях показателей КЭ щитовые электроизмерительные приборы, кроме приборов, наделенных свойствами осциллографирования электрических величин, достоверно не отображают ЭМО из-за несоответствия интервалов усреднения скоростям электромагнитных

переходных процессов. По этим показателям КЭ можно только судить о нарушениях уровней ЭМС технических средств и косвенно судить о функционирующих в ЭЭС случайных процессах. К тому же показатели КЭ современными автоматизированными средствами представляются непрерывно распределенными случайными величинами в виде таблиц. Такому представлению случайного процесса присуща некоторая неопределенность, потому что табличное описание ЭМО предполагает выбор определенной системы интервалов, зависящей в известной степени от опыта исследователя и от точности измерений [1].

Изложенное свидетельствует также о необходимости поиска новых подходов к математической обработке результатов измерений. При оценке ЭМО должна учитываться вся имеющаяся информация о показателях КЭ.

Одним из важных условий для определения $K_{U(n)}$ является расхождение с требованиями нормативных документов, регулирующих КЭЭ на объекте исследования. Задачи, поставленные в работе, решались с применением методологической базы исследования. Полученные исследовательские данные обрабатывались с помощью программы для ЭВМ.

Функция $X(t)$ является стационарной. Все характеристики функции не зависят от временного промежутка. Она рассматривается как процесс, который продолжается непрерывно. Логично, что любой отрезок времени можно будет использовать как начало отсчёта исследования стационарного процесса. При длительном проведении экспериментального исследования возможно получение одних и тех же результатов. Процессы, которые протекают в электроэнергетических системах предприятий различной отрасли, являются стационарными. Проведение опытных испытаний является единственной реализацией определённой функции для получения характеристик случайной величины.

Но в этом случае реализации функции случайной величины должны обладать особым свойством — эргодичностью. Благодаря этому свойству, одна реализация определённой продолжительности позволяет заменить множество реализаций [17].

В методологической базе исследования в качестве практических расчётов принимается, что распределение энергетических характеристик подчиняется нормальному закону [18]. Зависимость между возможными значениями случайной величины и соответствующими вероятностями характеризуется плотностью вероятности вида

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{\text{лор}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(x) - \overline{\ln(x)}]^2}{2\sigma_{\text{лор}}^2}}, \quad (1)$$

где x — случайная величина;

$\ln(x)$ — натуральный логарифм случайной величины;

$\sigma_{\text{лор}}$ — среднеквадратичное отклонение.

Вероятность попадания $K_{U(n)}$ в различные интервалы (0 до a , от a до b и от b до бесконечности) определяется по следующим формулам, подставляя соответствующие значения a и b каждой соответствующей гармонической составляющей.

$$P(0 < K_{U(n)} < a) = \frac{1}{\sigma_{\text{лор}} \sqrt{2\pi}} \int_0^a e^{-\frac{[\ln(x) - \overline{\ln(x)}]^2}{2\sigma_{\text{лор}}^2}},$$

$$P(a < K_{U(n)} < b) = \frac{1}{\sigma_{\text{лог}} \sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{(\ln(x) - \overline{\ln(x)})^2}{2\sigma_{\text{лог}}^2}} dx,$$

$$P(b < K_{U(n)} < \infty) = \frac{1}{\sigma_{\text{лог}} \sqrt{2\pi}} \int_b^{\infty} e^{-\frac{(\ln(x) - \overline{\ln(x)})^2}{2\sigma_{\text{лог}}^2}} dx.$$

Если в качестве случайной величины принимается напряжение, то x имеет размерность [кВ], если в качестве случайной величины принимается коэффициент n -й гармонической составляющей, то величина x имеет размерность — [%].

Данный закон распределения называется Гауссовским законом распределения случайной величины. Кривая распределения случайной величины, изменяющейся по нормальному закону, имеет вид, представленный на рис. 1 [19].

Гауссовским (нормальным) законом распределения случайной величины x характеризуется следующими параметрами: математическим ожиданием — M_x и дисперсией (разбросом) случайной величины — D_x [17–19]. Математическое ожидание при нормальном законе распределения случайной величины определяется следующим выражением:

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} x_i \cdot f(x) dx. \quad (2)$$

Дисперсия случайной величины является характеристикой рассеивания и определяется через размерность квадрата случайной величины по формуле:

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - M_x)^2 \cdot f(x) dx. \quad (3)$$

Характеристика рассеивания имеет такую же размерность, что и случайная величина. Данная величина называется среднеквадратичным отклонением (СКО) случайной величины — σ . С возрастанием σ кривая плотности вероятности становится более полой. Значение СКО рассчитывается по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (4)$$

Для Гауссовского распределения случайной величины рассеивание укладывается на участке $\pm 3\sigma$ с вероятностью 0,9985 благодаря правилу «трёх сигм» [17–19]. Благодаря этому, зная параметры распределения (формулы (3–5)), можно указать интервалы возможных значений.

Для обоснованной оценки ПКЭ, как функции случайного процесса, необходимо знать параметры Гауссовского (нормального) закона распределения (M_x , D_x , σ_x).

С помощью современных приборов-анализаторов качества электроэнергии можно за расчетный период времени получить статистические данные о характере изменения рассматриваемого ПКЭ, причем снятые за период повторяемости нагрузки (сутки).

Основываясь на полученных данных и приняв, что распределение ПКЭ подчиняется нормальному закону (распределение Гаусса) можно построить график распределения стационарной случайной функции.

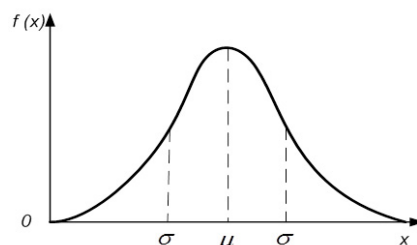


Рис. 1. Плотность вероятности нормального закона распределения

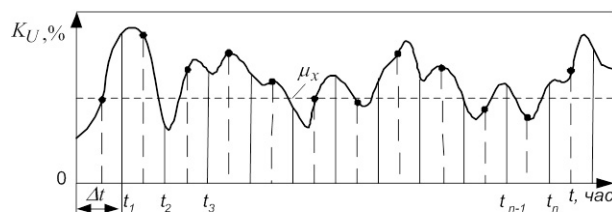


Рис. 2. Интервал записи случайной функции, разбитый на n равных частей

Для определения корреляционной функции диапазон случайной функции разбивается на равные части (n) (рис. 2) с одинаковым промежутком по времени (Δt). Для определения с требуемой точностью параметров Гауссовского (нормального) закона распределения (M_x , D_x , σ_x) необходимо большое количество равных частей (n) (порядка 100). Характер изменения случайной функции зависит от выбора длины промежутка [1].

Основные результаты. Исследования ПКЭ проводились на полигоне исследования — ЗАО «СибгазСтройдеталь» в цехе крутоизогнутых отводов. Данное предприятие занимается обеспечением нужд газовой, нефтяной и энергетической отраслей промышленности. Измерения производились с помощью прибора-анализатора качества электроэнергии «Ресурс-ПКЭ-1.7-оэ-А». Сводные данные результатов испытаний представлены в научных работах [7–9].

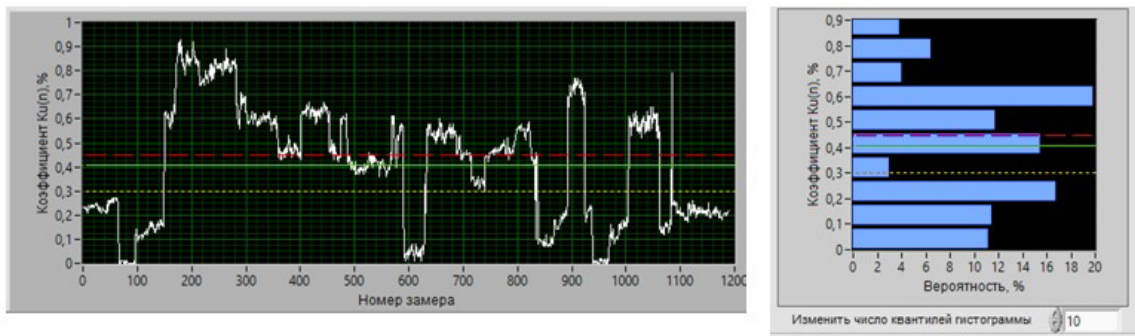
На основе данных [7–9] можно сделать вывод, что $K_{U(n)}$ не соответствуют значениям, приведённым в нормативных документах. Это приводит к ухудшению условий эксплуатации электрооборудования. На рис. 3 приведён интерфейс программы ЭВМ [20–22].

Обработка результатов осуществлялась с помощью программы ЭВМ, в которой заложен весь необходимый математический аппарат, изложенный выше. Программа для ЭВМ, используя математический аппарат, производит автоматизированный расчёт вероятности появления $K_{U(n)}$.

Далее осуществлялась обработка экспериментальных данных $K_{U(n)}$. Применяя методологическую базу исследования, определяли закон распределения случайной величины.

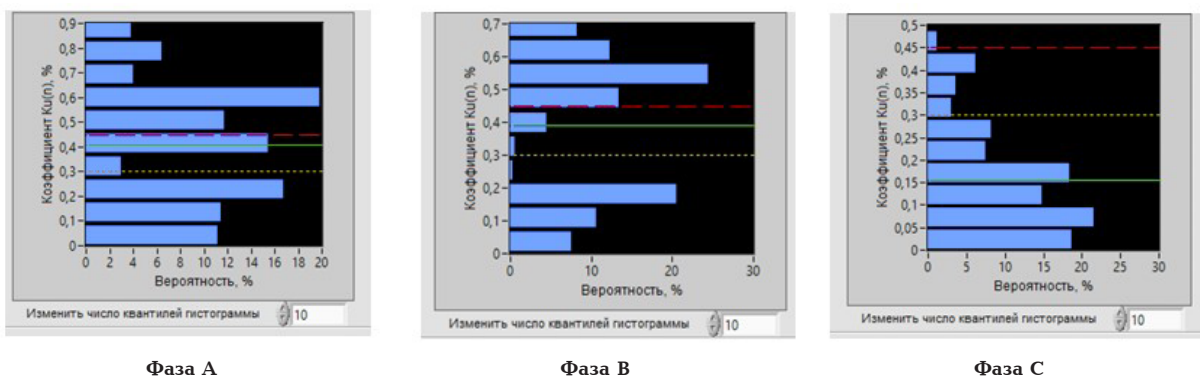
Первоначально количество измерений $K_{U(n)}$ составило 10080. Далее провели усреднение значений, в соответствии с ГОСТ 32144–2013, в 10-минутном интервале.

Объём выборки составил $N = 1008$. Далее проводится усреднение значений величины в соответствии с нормативными документами, регламентирующими КЭЭ (интервалы 10 минут в течение недели).



Фаза А

Рис. 3. Осциллограммы изменения коэффициента 15-й гармонической составляющей напряжения



Фаза А

Фаза В

Фаза С

Рис. 4. Осциллограммы изменения коэффициента и гистограммы распределения значений 15-й гармонической составляющей напряжения

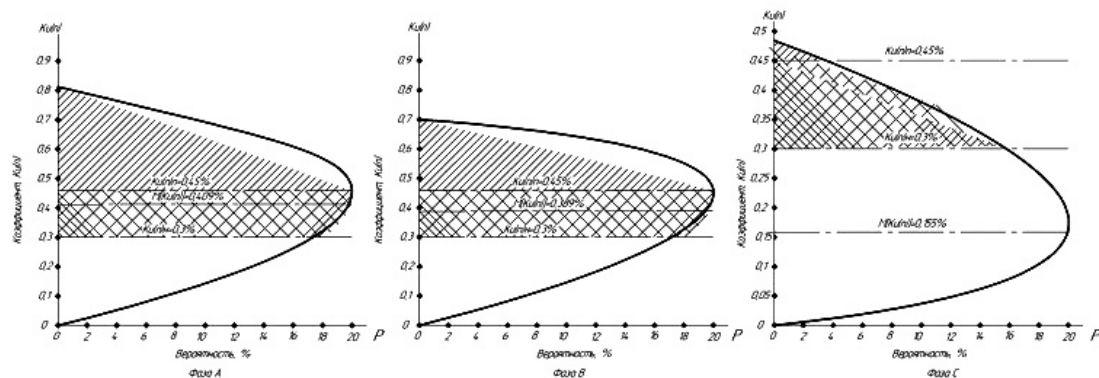


Рис. 5. Графики нормальной плотности вероятности распределения коэффициента 15-й гармонической составляющей напряжения, совмещённые с нормируемыми значениями уровней ЭМС

Пользуясь полученными значениями из работ [7–9], строятся гистограммы распределения значений n -й гармонической составляющей напряжения (рис. 4) и графики нормальной плотности вероятности распределения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения (рис. 5), которые в наглядной форме предоставляют информацию об изменениях случайной величины.

Вывод. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи по $K_{U(n)}$ формируются под действием различных негативных факторов, основная же ее особенность состоит в том, что ее невозможно предвидеть. Однако, применяя методологические базы исследования, можно определить вероятность появления $K_{U(n)}$.

Наличие необходимой информации об электромагнитной обстановке на объекте исследования позволяет представить научно-практический интерес для реализации различных мероприятий по устранению $K_{U(n)}$. Кроме того, применяя методологическую базу исследования, можно получить обширную информацию, на которую можно опираться для проведения профилактических мер для устранения негативного влияния высших гармоник. С помощью современных приборов-анализаторов качества электроэнергии можно, не прибегая к дополнительным расчётам, определить значения $K_{U(n)}$ благодаря их конструктивным и программным особенностям.

Заключение. Подводя итог вышеизложенному, следует отметить, что с внедрением в измерительно-

расчётную практику современных приборов-анализаторов качества электроэнергии и применяя методы расчетов, основанные на вероятностном подходе к анализируемой величине, можно добиться существенных результатов в обеспечении должного качества электрической энергии и, как результат, значительно повысить надёжность и экономическую эффективность работы системы электроснабжения общего назначения.

Библиографический список

1. Данилов Г. А., Денчик Ю. М., Иванов М. Н. [и др.]. Повышение качества функционирования линий электропередачи: моногр. 2-е изд. Москва-Берлин: Директ Медиа, 2015. 558 с. ISBN 978-5-4475-5859-8.
2. Руппель А. А., Иванова Е. В. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях 6–10 кВ. Омск: Омский филиал НГАВТ, 2004. 284 с.
3. Иванова Е. В., Куликов С. Г. Определение кондуктивной электромагнитной помехи по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения в сети общего назначения // Транспортное дело России. 2006. № 11–1. С. 42–44. EDN: KVTOHD.
4. Иванова Ю. М. Гармоническое воздействие на электро-механические преобразователи в электроэнергетической системе // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: тр. 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 5–7 июня 2007 г. В 2-х ч. Омск: Омский филиал НГАВТ, 2007. Ч. 2. С. 109–113. ISBN 978-5-8119-0296-5.
5. Вишнягов М. Г., Иванова Ю. М., Клеутин В. И. [и др.]. Анализ гармонического воздействия помех на электрические сети береговых объектов водного транспорта Западной Сибири // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 331–334. EDN: KXMDKV.
6. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
7. Руди Д. Ю., Антонов А. И., Вишнягов М. Г. [и др.]. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125. EDN: VQNFZY.
8. Руди Д. Ю. Электромагнитная совместимость в системе электроснабжения механического цеха ЗАО «Сибгазстрой-деталь» с электроустановками индукционного нагрева // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 10. С. 35–43. EDN: UFCKMB.
9. Руди Д. Ю., Горелов С. В., Антонов А. И. [и др.]. Анализ несинусоидальности напряжения в системах электроснабжения с электроустановками индукционного нагрева // Вестник Чувашского университета. 2021. № 1. С. 122–133. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-122-133. EDN: DBZXOF.
10. Володина Н. А., Карякин Р. Н., Куликов Л. В. [и др.]. Основы электромагнитной совместимости. Барнаул: ОАО Алтайский полиграфический комбинат, 2007. 480 с. ISBN 978-5-903387-07-6.
11. Гужов Н. П., Ольховский В. Я., Павлюченко Д. А. Системы электроснабжения. Ростов-на-Дону: Феникс, 2011. 382 с. ISBN 978-5-222-17730-3.
12. Сальников В. Г., Иванова Е. В., Иванов М. Н. Справочник электроэнергетика предприятий цветной металлургии. Москва: Металлургия, 1991. 384 с. ISBN 5-229-00253-0.
13. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 112 с.
14. Сальников В. Г. Руководство по выбору структуры и параметров системы электроснабжения предприятия с мощ-

ными сериями электролизёров цветных металлов. Москва: Металлургия, 1985. 78 с.

15. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электроэнергии. Введ. 2014–01–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 57 с.
16. Руди Д. Ю., Шитик Т. В. Оценка показателей качества электроэнергии с помощью прибора-анализатора «Ресурс-ПКЭ-1.7» // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России: сб. тр. IV Междунар. науч.-прак. конф., Сургут, 20–21 апреля 2023 г. Москва: Знание-М, 2023. С. 339–348.
17. Пугачёв В. С. Теория вероятностей и математической статистики. Москва: Наука, 1979. 496 с.
18. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. 3-е изд. Москва: Наука, 1969. 511 с.
19. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Москва: Наука, 1981. 721 с.
20. Rudi D. Y., Gorelov S. V., Khatsevskiy K. V. Algorithm for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference in electrical networks // Journal of Physics: Conference Series. 5. Series. «V Int. Scientific and Technical Conference «Mechanical Science and Technology Update», MSTU 2021. Vol. 1901. P. 012077. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012077. EDN: SRUWQI.
21. Руди Д. Ю., Горелов С. В., Зубанов Д. А., Антонов А. И. Разработка программы для ЭВМ для обработки результатов экспериментальных исследований по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения средствами среды графического программирования labview // Молодежь и XXI век-2021: материалы XI Междунар. молодежной науч. конф., Курск, 18–19 февраля 2021 г., В 6-ти томах. Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2021. Т. 6. С. 213–220. EDN: XMOVCN.
22. Руди Д. Ю., Вишнягов М. Г., Руппель А. А. Компьютерная программа для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 65–78. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78. EDN: ITCMBE.

РУДИ Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (ОИВТ) (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ), г. Омск.
SPIN-код: 5222-7906
AuthorID (РИНЦ): 830094
Адрес для переписки: dima_rudi@mail.ru

АНТОНОВ Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.
SPIN-код: 5682-8929
AuthorID (РИНЦ): 842787
Адрес для переписки: aleksandr_antonov_85@mail.ru

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.
SPIN-код: 3386-9834
AuthorID (РИНЦ): 423886
Адрес для переписки: ruppelsan@mail.ru

РУППЕЛЬ Елена Юрьевна, доцент кафедры «Физика и математика» Сибирского государственного

автомобильно-дорожного университета СибАДИ,
г. Омск.

SPIN-код: 3193-1914

AuthorID (РИНЦ): 651948

Адрес для переписки: elektrotex@mail.ru

ШИТИК Татьяна Вацлавовна, преподаватель специальных дисциплин отделения «Эксплуатация судовых энергетических установок» Омского командного речного училища имени В. И. Евдокимова ОИВТ (филиал) СГУВТ, г. Омск.

SPIN-код: 3127-0387

AuthorID (РИНЦ): 1202984

Адрес для переписки: sobolevska-1965@mail.ru

Для цитирования

Руди Д. Ю., Антонов А. И., Руппель А. А., Руппель Е. Ю., Шитик Т. В. Применение методологической базы исследования для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 77–86. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-77-86.

Статья поступила в редакцию 27.10.2023 г.

© Д. Ю. Руди, А. И. Антонов,

А. А. Руппель,

Е. Ю. Руппель, Т. В. Шитик

¹ Omsk Institute of Water
Transport (branch) Siberian
State University Water Transport,
Omsk, Russia

² Siberian State Automobile
and Highway University,
Omsk, Russia

³ Omsk River Command School
named after Captain V. I. Evdokimov
Omsk Institute of Water
Transport (branch) Siberian
State University Water Transport,
Omsk, Russia

THE USE OF THE METHODOLOGICAL BASE OF THE STUDY TO DETERMINE THE CONDUCTION OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ACCORDING TO THE COEFFICIENT OF THE N-TH HARMONIC COMPONENT OF THE VOLTAGE

With the help of the methodological base of the study (the foundations of probability theory and mathematical statistics), the processing of the experiment conducted at the research object is carried out. This object is the mechanical workshop of CJSC Sibgazstroydetal, which is engaged in providing for the needs of the gas, oil and energy industries. In this paper, the issue of determining the conductive low-frequency electromagnetic interference (EMI) by the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage ($K_{U,n}$) is studied in detail. Harmonic distortion is a constant phenomenon in electrical networks. Higher harmonics have a negative impact on the electrical network, including on electric consumers (reduced service life, productivity, etc.). The problem of non-sinusoidal voltages has been studied for quite a long time and the results obtained during these studies confirm the presence of a large number of damages to electricity consumers who are in operation. The probability of occurrence of conductive low-frequency EMF by $K_{U,n}$ at the research site is determined. The paper analyzes the results obtained with the help of the conducted research. According to the results of the analysis, the relevant conclusions are presented.

Keywords: quality of electric energy, higher harmonics, conductive interference, mathematical statistics and probability theory, the coefficient of the n-th harmonic component of stress.

References

1. Danilov G. A., Denchik Yu. M., Ivanov M. N. [et al.]. Povysheniye kachestva funktsionirovaniya liniy elektroperedachi [Improving the quality of operation of power lines]. 2nd ed. Moscow-Berlin, 2015. 558 p. (In Russ.).
2. Ruppel' A. A., Ivanova E. V. Konduktivnyye elektromagnitnyye pomekhi v setyakh 6–10 kV [Conducted

electromagnetic interference in 6–10 kV networks]. Omsk, 2004. 284 p. (In Russ.).

3. Ivanova E. V., Kulikov S. G. Opredeleniye konduktivnoy elektromagnitnoy pomekhi po koefitsiyentu iskazheniya sinusoidal'nosti krivoy napryazheniya v seti obshchego naznacheniya [Determination of conducted electromagnetic interference by the distortion factor of the sinusoidal voltage curve in a general-purpose network] // Transportnoye delo

- Rossii. *Transport Business of Russia*. 2006. No. 11–1. P. 42–44. (In Russ.).
4. Ivanova Yu. M. Garmonicheskoye vozdeystviye na elektromekhanicheskiye preobrazovateli v elektroenergeticheskoy sisteme [Harmonic influence on electromechanical converters in the electric power system] // *Energetika, ekologiya, energosberezheniye, transport. Energy, Ecology, Energy Saving. In 2 parts*. Omsk, 2007. Part 2. P. 109–113. (In Russ.).
5. Vishnyagov M. G., Ivanova Yu. M., Kleutin V. I. [et al.]. Analiz garmonicheskogo vozdeystviya pomekh na elektricheskoye seti beregovykh ob"yektov vodnogo transporta Zapadnoy Sibiri [Analyses by harmonic influences into electricity supply of coast objects water transport West Siberian] // *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. Scientific Problems of Transport of Siberia and the Far East*. 2009. No. 1. P. 331–334. (In Russ.).
6. GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 19 p. (In Russ.).
7. Rudi D. Yu., Antonov A. I., Vishnyagov M. G. [et al.]. Issledovaniye vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh nizkogo napryazheniya [Study of higher harmonics in low voltage electrical networks] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 6 (162). P. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125. EDN: VQNFZY. (In Russ.).
8. Rudi D. Yu. Elektromagnitnaya sovmestimost' v sisteme elektrosnabzheniya mekhanicheskogo tsekha EAO «Sibgazstroydetal'» s elektroustanovkami induktsionnogo nagreva [Electromagnetic compatibility in the power supply system of the mechanical shop of CJSC Sibgazstroydetal with induction heating electrical installations] // *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont. Electrical Equipment: Operation and Repair*. 2021. No. 10. P. 35–43. (In Russ.).
9. Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Antonov A. I. [et al.]. Analiz nesinusoidal'nosti napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya s elektroustanovkami induktsionnogo nagreva [Analysis of non-sinusoidal voltage in power supply systems with induction heating electrical installations] // *Vestnik Chuvashskogo universiteta. Bulletin of the Chuvash University*. 2021. No. 1. P. 122–133. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-122-133. EDN: DBZXOF. (In Russ.).
10. Volodina N. A., Karyakin R. N., Kulikov L. V. [et al.]. Osnovy elektromagnitnoy sovmestimosti [Fundamentals of electromagnetic compatibility: textbook. for universities]. Barnaul, 2007. 480 p. ISBN 978-5-903387-07-6. (In Russ.).
11. Guzhov N. P., Ol'khovskiy V. Ya., Pavlyuchenko D. A. Sistemy elektrosnabzheniya [Power supply systems]. Rostov-on-Don, 2011. 382 p. ISBN 978-5-222-17730-3. (In Russ.).
12. Sal'nikov V. G., Ivanova E. V., Ivanov M. N. Spravochnik elektroenergetika predpriyatiy tsvetnoy metallurgii [Directory of electric power industry of non-ferrous metallurgy enterprises]. Moscow, 1991. 384 p. ISBN 5-229-00253-0. (In Russ.).
13. Dreksler R. Izmereniye i otsenka kachestva elektroenergii pri nesimmetrichnoy i nelineynoy nagruzke [Measurement and assessment of power quality under asymmetrical and nonlinear loads]. Moscow, 1985. 112 p. (In Russ.).
14. Sal'nikov V. G. Rukovodstvo po vyboru struktury i parametrov sistemy elektrosnabzheniya predpriyatiya s moshchnymi seriyami elektrolizerov tsvetnykh metallov [Guide to choosing the structure and parameters of the power supply system for an enterprise with a powerful series of non-ferrous metal electrolyzers]. Moscow, 1985. 78 p. (In Russ.).
15. GOST 30804.4.30-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektroenergii [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods]. Moscow, 2014. 57 p. (In Russ.).
16. Rudi D. Yu., Shitik T. V. Otsenka pokazateley kachestva elektroenergii s pomoshch'yu pribora-analizatora «Resurs-PKE-1.7» [Assessment of power quality indicators using the analyzer device «Resurs-PKE-1.7»] // *Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsiy Severa Rossii. Problems of Electric Power Industry and Telecommunications of the Russian North*. Moscow, 2023. P. 339–348. (In Russ.).
17. Pugachev V. S. Teoriya veroyatnostey i matematicheskoy statistiki [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow, 1979. 478 p. (In Russ.).
18. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskiy I. V. Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy [Course on probability theory and mathematical statistics for technical applications]. 3rd ed. Moscow, 1965. 511 p. (In Russ.).
19. Bronshteyn I. N., Semendyayev K. A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of mathematics for engineers and university students]. Moscow, 1981. 721 p. (In Russ.).
20. Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Khatsevskiy K. V. Algorithm for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference in electrical networks // *Journal of Physics: Conference Series*. 5. Series. «V Int. Scientific and Technical Conference «Mechanical Science and Technology Update»», MSTU 2021. Omsk, 2021. Vol. 1901. P. 012077. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012077. EDN: SRUWQI. (In Engl.).
21. Rudi D. Yu., Gorelov S. V., Zubanov D. A., Antonov A. I. Razrabotka programmy dlya EVM dlya obrabotki rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy po koeffitsiyentu n-y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya sredstvami sredy graficheskogo programmirovaniya labview [Development of a computer program for processing the results of experimental studies on the coefficient of the nth harmonic component of voltage using the graphic programming environment labview] // *Molodezh' i XXI vek-2021. Youth and the 21st Century – 2021*. In 6 vols. Kursk, 2021. Vol. 6. P. 213 – 220. EDN: XMOVCN. (In Russ.).
22. Rudi D. Yu., Vishnyagov M. G., Ruppel' A. A. Komp'yuternaya programma dlya opredeleniya konduktivnoy nizkochastotnoy elektromagnitnoy pomekhi po koeffitsiyentu n-y garmonicheskoy sostavlyayushchey napryazheniya [Computer program for determining the conductive low-frequency electromagnetic interference by the coefficient of the nth harmonic component of the voltage] // *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal. International Technical and Economic Journal*. 2021. No. 1. P. 65–78. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-76-1-65-78. EDN: ITCMBE. (In Russ.).

RUDI Dmitry Yurievich, Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Omsk Institute of Water Transport (branch) Siberian State University Water Transport, (OIWT (branch) SSUWT), Omsk.

SPIN-code: 5222-7906

AuthorID (RSCI): 830094

Correspondence address: dima_rudi@mail.ru

ANTONOV Alexander Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, OIWT (branch) SSUWT, Omsk.

SPIN-code: 5682-8929

AuthorID (RSCI): 842787

Correspondence address: aleksandr_antonov_85@mail.ru

RUPPEL Alexander Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, OIWT (branch) SSUWT, Omsk.

SPIN-code: 3386- 9834

AuthorID (RSCI): 423886

Correspondence address: ruppelsan@mail.ru

RUPPEL Elena Yuryevna, Associate Professor of Physics and Mathematics Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk.

SPIN-code: 3193-1914

AuthorID (RSCI): 651948

Correspondence address: elektrotex@mail.ru

SHITIK Tatyana Vatslavovna, Lecturer of Special Disciplines of Operation of Ship Power Plants Department, Omsk River Command School named after Captain V. I. Evdokimov, OIWT (branch) SSUWT, Omsk.

SPIN-code: 3127-0387

AuthorID (RSCI): 1202984

Correspondence address: sobolevska-1965@mail.ru

For citations

Rudi D. Yu., Antonov A. I., Ruppel A. A., Ruppel E. Yu., Shitik T. V. The use of the methodological base of the study to determine the conduction of low-frequency electromagnetic interference according to the coefficient of the n-th harmonic component of the voltage // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 77 – 86. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-77-86.

Received October 27, 2023.

© **D. Yu. Rudi, A. I. Antonov, A. A. Ruppel,**

E. Yu. Ruppel, T. V. Shitik

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНДАРТА МЭК 61850 НА ПРИМЕРЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМИНАЛА SERAM СЕРИИ 1000+

В статье рассматривается вариант архитектуры реализации логической защиты линии на основании внедрения современных технологий. Большими темпами в мире развивалась идея разработки и внедрения цифровых подстанций, ядром которой является применение стандарта МЭК 61850. Данный стандарт в подстанциях способствует реализации новых способов защит электроустановок. В данной статье рассматривается способ построения защиты линии с применением метода логической селективности, а в качестве основных терминалов рассматриваются устройства Seram серии 1000+ как одни из наиболее широко распространённых устройств в электроэнергетической отрасли Российской Федерации, поддерживающих стандарт МЭК 61850.

Ключевые слова: цифровая подстанция, МЭК 61850, защита линии, децентрализованная релейная защита, логическая селективность, микропроцессорная релейная защита, локальная сеть подстанции, токовая защита.

I. Введение. Логическая селективность применяется для ускорения работы защит при наличии разрешающего сигнала. Логическая селективность широко применяется при реализации логической защиты шин (ЛЗШ) [1]. С появлением микропроцессорных релейных устройств защиты (МП РЗА) в электроэнергетике информация, полученная от этих устройств, стала объединяться в автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) [2]. Шаг за шагом количество устройств с поддержкой цифровых интерфейсов становилось больше, в свою очередь наблюдалась уверенная тенденция развития серии стандартов МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанции» и их поддержка устройствами МП РЗА. Это позволяет без дополнительных затрат интегрировать в уже функционирующие объекты новые алгоритмы защит, одним из которых является логическая защита линии (ЛЗЛ).

Логическая защита линии выполнена по принципу, аналогичному с ЛЗШ (рис. 1). Для МП РЗА вышестоящей подстанции (фидер) предусмотрены две ступени максимальной токовой защиты (МТЗ) [3], одна из которых с уставкой по времени 0,9 с се-

лективна с МТЗ ввода, а другая с малой выдержкой времени (0,1–0,2 с) и условием логической селективности.

При повреждении на нижестоящей подстанции ток аварийного режима протекает через МП РЗА ввода и фидера. По факту пуска МТЗ ввода формируется блокирующий сигнал. Повреждение отключается действием защит нижестоящей подстанции. При повреждении на защищаемой линии ток протекает только через МП РЗА фидера и повреждение отключается действием ЛЗЛ с малой выдержкой времени.

ЛЗЛ ранее не имела широкого распространения в связи со сложностью передачи сигналов МП РЗА между подстанциями. С разработкой серии стандартов МЭК 61850 и применением положений стандарта на энергообъектах [4] стал возможен быстроедействующий обмен информацией в стандартизованном виде между устройствами внутри подстанции и за ее пределами. Для передачи сигналов управления, защиты и блокировок разделом 8.1 стандарта МЭК 61850 предусмотрен протокол GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) [5].

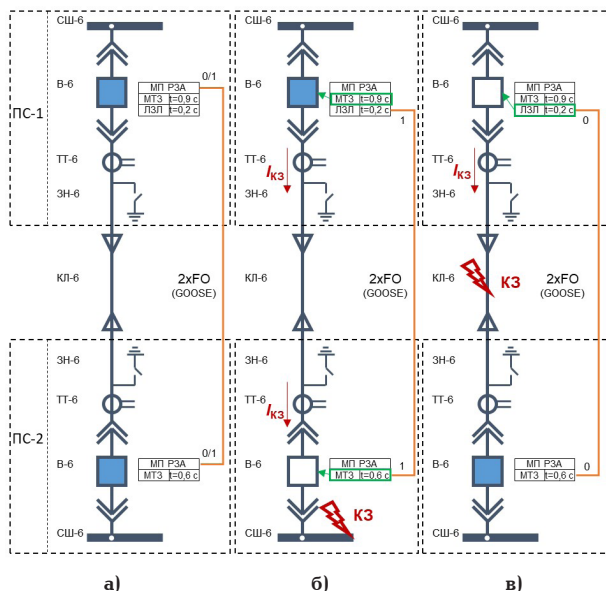


Рис. 1. Принцип работы логической защиты линии

Существует три способа передачи сигнала блокировки с нижестоящей подстанцией на вышестоящую:

— с двойным преобразованием. Может применяться в случае, если МП РЗА ввода и фидера не способны к обмену данными по протоколу GOOSE. В этом случае дискретный сигнал с МП РЗА ввода преобразуется в цифровой устройством сопряжения (УСО) и передается на вышестоящую подстанцию, где осуществляется обратное пре-

образование и отправка сигнала на вход МП РЗА фидера;

— с однократным преобразованием. Применяется в случае, если один из МП РЗА способен принимать сигналы по протоколу GOOSE. В этом случае преобразование из дискретного сигнала в цифровой (или цифрового в дискретный) выполняется однократно;

— без преобразования. Применяется в случае, когда оба МП РЗА способны принимать сигналы по протоколу GOOSE.

При организации ЛЗЛ должны быть предусмотрены способы принудительного или автоматического блокирования защиты в случае повреждения линии связи.

В данной статье рассматривается способ без преобразования, что позволит рассмотреть алгоритм ЛЗЛ и продемонстрировать все положительные стороны стандарта МЭК 61850.

II. Настройка конфигурации по части коммуникации по протоколу МЭК-61850 в терминалах Sepam 1000+.

Проекты, реализованные с помощью оборудования МП РЗА компании Schneider Electric в области электроснабжения как сетевых организаций, так и предприятий нефтегазовой отрасли за последние 16 лет составляют весомую часть от общего количества применяемых в электроэнергетике решений. Комплексные решения в комплекте поставки в области управления электроэнергией и промышленной автоматизации могли оставаться незамеченными и до конца не реализованными, ведь поддержка стандарта МЭК 61850 устройствами МП РЗА компании заявлялась ещё задолго до повсеместного его распространения в электроэнергетической инфраструктуре Российской Федерации. Как итог имеются сотни подстанций, где ре-

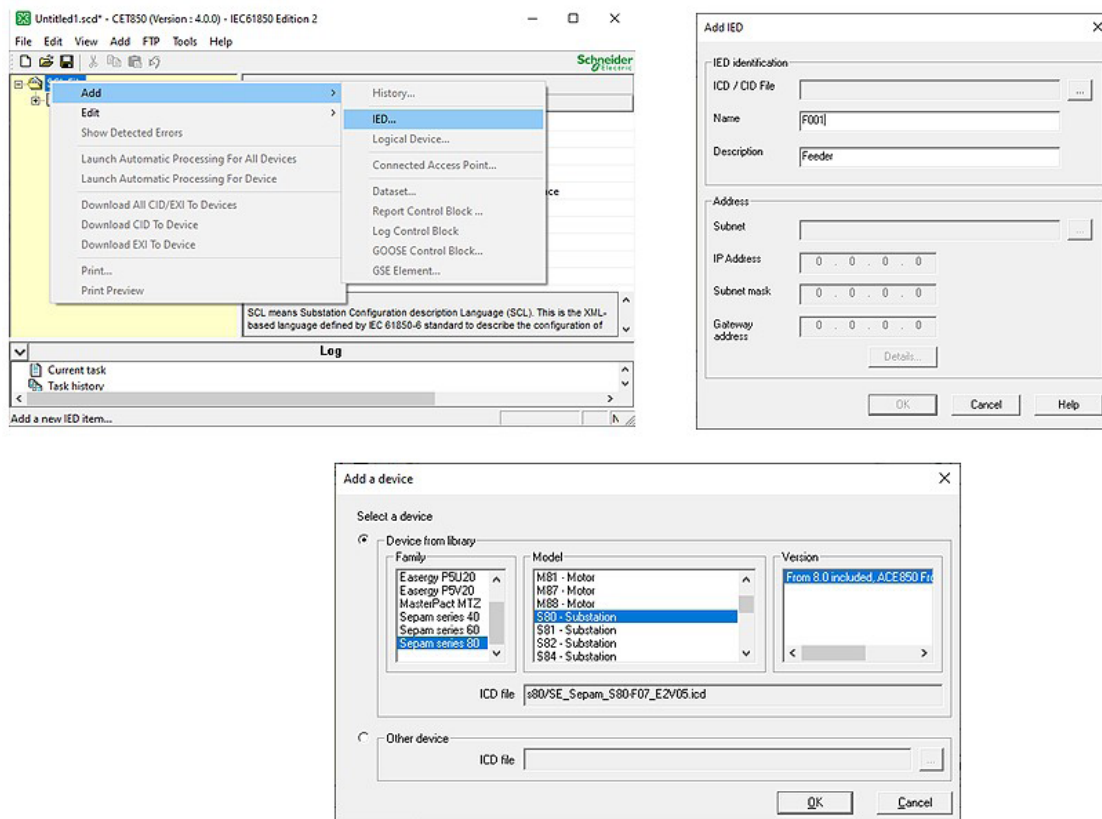


Рис. 2. Создание МП РЗА в структуре SCL отходящей линии в ПО CET850

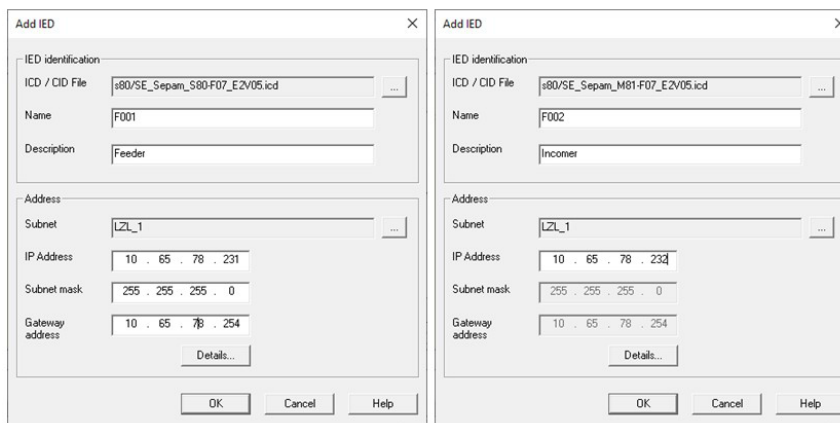


Рис. 3. Настройка подсети МП РЗА отходящей линии в ПО SET850

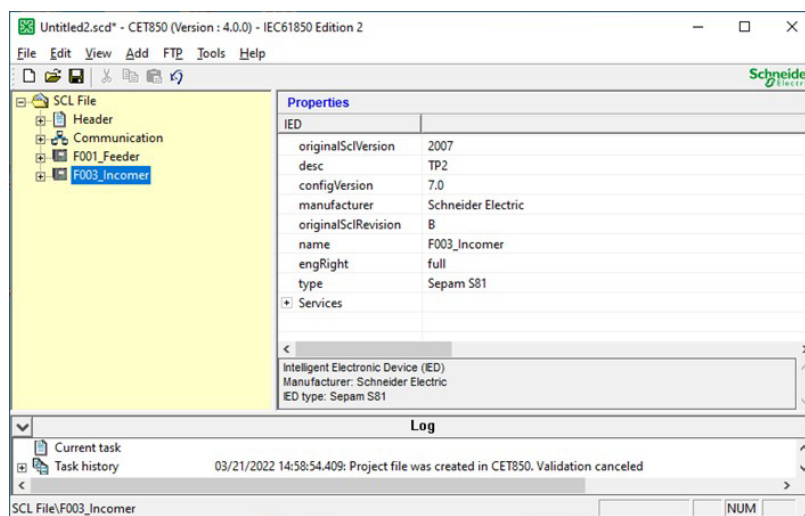


Рис. 4. Общий вид файла CID устройства МП РЗА вводной ячейки в ПО SET850

ализация предлагаемого алгоритма ограничивается лишь отсутствием разветвлённой локальной вычислительной сети (ЛВС) АСУ ТП, которых при нынешнем тренде на цифровизацию отрасли осталось малое количество.

Ввиду вышеизложенного в качестве опытных образцов были выбраны МП РЗА Sepam серии 1000+, которые по умолчанию способны принимать дискретные сигналы, но в комплект поставки для организации АСУ ТП и работы с протоколом МЭК 61850 входит и дополнительная плата связи ACE850TP.

Настройка конфигурации протокола МЭК 61850 в терминалах компании Schneider Electric и Механотроника осуществляется в специализированном программном обеспечении (ПО) SET850. При запуске ПО SET850 [6] требуется указать версию редакции МЭК 61850, которая соответствует конфигурации терминала Sepam. Для настройки конфигурации необходимы два типа файлов, одним из которых является SCL (System Configuration description Language — язык описания конфигурации системы). В обычном понимании файл SCL — это файл конфигурации системы стандарта IEC 61850. Он отображает систему управления подстанцией, в том числе информацию о связи и всех точках ввода данных, в соответствии с требованиями IEC 61850. Кроме того, файл содержит все необходимые сведения о первичном распределительном устройстве, например, информацию о состоянии всех выключателей,

а также данные о состоянии блокировки. Описание конфигурации устройства задаётся в файле — CID (Configured IED Description). Данный файл параметрируется в ПО (рис. 2) для дальнейшего экспорта непосредственно в само устройство. Этот файл является исчерпывающим описанием конфигурации данного устройства в части коммуникаций. В ПО SET850 осуществляется настройка структуры SCL и файла конфигурации CID.

В окне выбора или настройки подсети необходимо создать подсеть с именем (Subnet Name), содержащим назначение и номер подстанции, например — LZL_TP1. После выбора подсети, указываются IP адрес, маска и шлюз терминала МП РЗА. В нашем случае значение маски подсети (Subnet mask) принимается 255.255.255.0, последние три цифры адреса (IP-address) должны соответствовать номеру присоединения, а последние цифры адреса шлюза (Gateway address) должны быть xxx.xxx.xxx.254. При одинаковой маске подсети IP-адреса должны быть уникальными для каждого устройства в сети (рис. 3).

Аналогично создается CID устройства, публикующего GOOSE. Вид простейшей структуры SCL, состоящего из двух IED (Intelligent Electronic Devices), представлен на рис. 4.

III. Формирование набора данных по протоколу МЭК 61850, задействованных в терминалах Sepam 1000+. Сообщения GOOSE используются для быстрой передачи критически важной инфор-

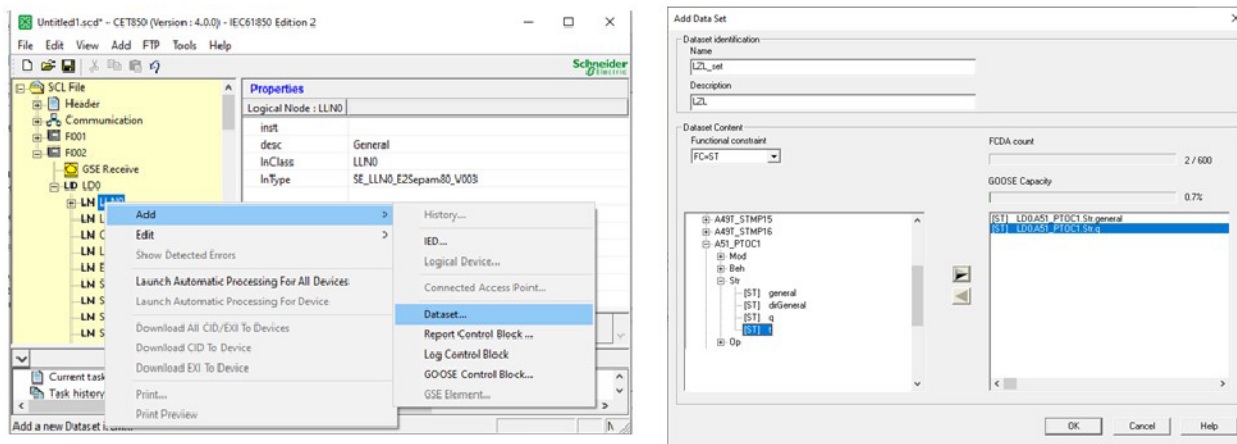


Рис. 5. Формирование набора данных устройства МП РЗА вводной ячейки в ПО SET850

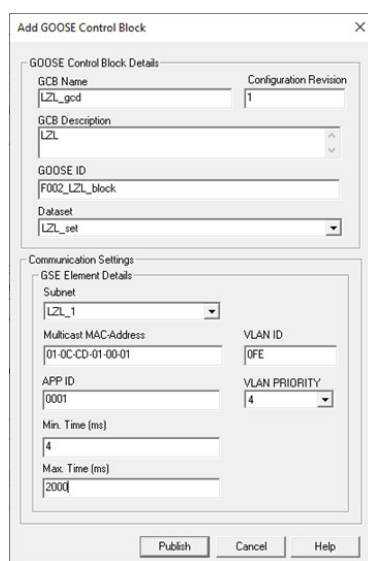


Рис. 6. Формирование блока контроля GOOSE-сообщений устройства МП РЗА вводной ячейки в ПО SET850

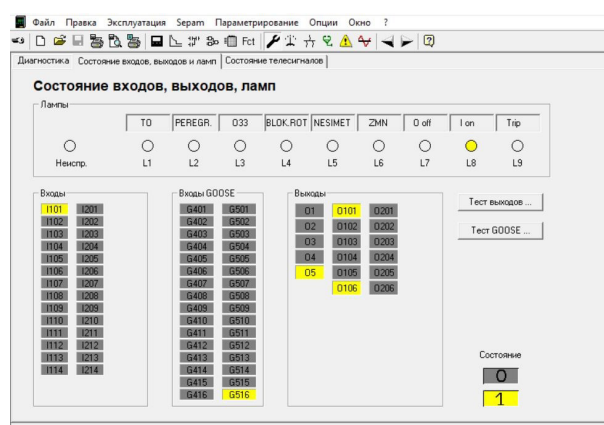


Рис. 7. GOOSE-сообщения устройства МП РЗА вводной ячейки

мации, требующей немедленного реагирования: в данном случае информация не подтверждается, а распространяется в многоадресном режиме. Сообщения GOOSE могут принимать как устройства МП РЗА, так и испытательные установки. Данные сообщения, в свою очередь, содержат ряд наборов данных — Dataset, которые в нашем случае будут передавать сведения о работе защит на устройстве МП РЗА ввода, находящемся на конце отходящей линии. Наборы данных (рис. 5) должны храниться в нулевом логическом узле (LLN0).

Логические узлы токовой защиты имеют наименование «A51_PTOC1.n» в зависимости от числа ступеней п. В окне настройки набора данных указать имя набора (Name) и описание (Description). Имя должно содержать слово «set», содержать имя устройства. В описании указывается назначение набора данных и наименование подстанции. Далее в окне функциональных констант выбираем узел «A51_PTOC» с соответствующим номером ступени (в нашем случае это будет ступень 1) и переносим эту переменную в набор данных. В набор данных может включаться как переменная целиком (тем самым будет занято больше ёмкости GOOSE-

сообщения), так и отдельные атрибуты. В последнем случае атрибут данных (general) должен располагаться над элементом качества (q).

Для указания параметров исходящего GOOSE-сообщения в конфигурации МП РЗА ввода посредством ПО SET850 требуется создать блок контроля. Как и наборы данных, блоки контроля должны храниться в нулевом логическом узле (LLN0). В данном блоке контроля необходимо указать его имя (GCB Name), описание (Description), идентификатор GOOSE (GOOSE ID), задать Multicast MAC-Address, APP ID, VLAN ID, указать максимальное и минимальное время публикации GOOSE. Предпочтительно, чтобы имя блока контроля начиналось с букв «gcb» и содержало наименование терминала. В свою очередь, GOOSE ID должен начинаться с наименования терминала и содержать сведения о подстанции и типе присоединения. В меню окна «Dataset» необходимо выбрать созданный ранее набор данных. Адресация в Multicast MAC-Address задается последними четырьмя цифрами (недопустимо наличие двух одинаковых MAC-адресов в сети), в APP ID последними тремя цифрами. Для удобства цифры должны коррелировать с номером присоединения (рис. 6).

Для того чтобы терминал МП РЗА отходящей линии (F001) принял GOOSE-сообщение от устройства МП РЗА вводной ячейки (F002), требуется указать ему параметры принимаемых сообщений. Для этого необходимо произвести настройку параметров бло-

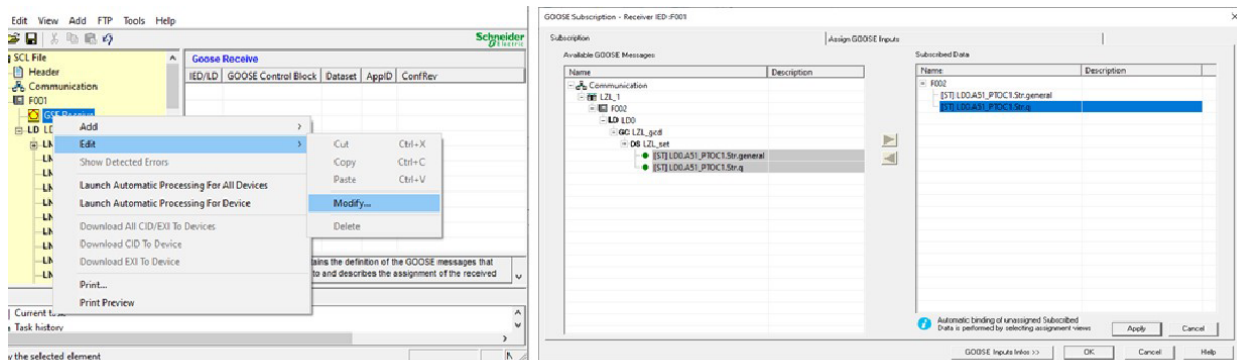


Рис. 8. Формирование блока приёма GOOSE-сообщений устройства МП РЗА ячейки отходящей линии в ПО SET850

IED Name	DA	Description	G401	G402	G403	G404	G405	G406	G407	G408	G409	G410	G411	G412	G413	G414	G415	G416	G501	G50
1 F002	QR	Quality										X								
2 F002	QD	Quality Da...										X								
3 F002	[STJ LDO.A51_PTOC1.Str.general		X																	
4 F002	[STJ LDO.A51_PTOC1.Str.q												X							

Рис. 9. Формирование в матрице назначений GOOSE-сообщений устройства МП РЗА ячейки отходящей линии в ПО SET850

ка «GSE Receive». В открывшемся окне отобразятся все GOOSE-сообщения, которые может принять терминал F001. Для целей реализации ЛЗА нужен атрибут пуска токовой защиты используемой ступени и атрибут качества (PTOC1.Str.general и PTOC1.Str.q соответственно). Ведь именно наличие этих сигналов (рис. 7) будет свидетельствовать о том, что короткое замыкание произошло не на отрезке питающей линии, а за вводным выключателем, который получает питание от этой линии.

В SET850 символом «о» отмечены атрибуты, которые могут быть приняты, и символом «х» — те, принимать которые устройство не будет. После назначения символ «о» закрашивается и меняет цвет. В матрице назначений (рис. 8) GOOSE-сообщений атрибут данных необходимо назначить на выбранный вход (в нашем случае это G401), а все атрибуты качества данных назначить на вход G410 (рис. 9). В результате терминал F001 подписан на GOOSE-сообщение от терминала F002. По окончании настройки параметров МЭК 61850 в ПО SET850 необходимо записать и сохранить изменения в CID каждого из устройств. Для этого в древе необходимо вызвать контекстное меню, нажав на устройстве (F001 и F002), и выбрать пункт «Launch Automatic Processing For Device», сохранить файл проекта (SCD) и файлы конфигурации устройств (CID) в выбранной директории.

Окончательным этапом является экспорт CID в устройства МП РЗА. Для этого необходимо вызвать контекстное меню устройства во вкладке «Communication» и выбрать пункт «Download CID To Device».

IV. Настройки внутренней логики, интерфейсов терминалов Seram 1000+, сборка системы для проверки правильности ЛЗА. Для того чтобы произвести проверку работоспособности предлагаемого технического решения, необходимо реализовать систему из двух терминалов МП РЗА, объединённых в локальную сеть. Рассматриваемая в данной статье система включала в себя: 1) источник GOOSE-сообщений — Seram M81 совместно с блоком ACE850 (далее F002 или МП РЗА ввода); 2) приёмник GOOSE-сообщений — Seram S80 совместно с блоком ACE 850 (далее F001 или МП РЗА отходящей линии); 3) коммутатор, соединяющий терминалы — Hirshmann RS20; 4) комплекс программно-технический измерительный — РЕТОМ-51 (основной источник переменного тока, секундомер регистратор).

От устройства РЕТОМ-51 до токового блока F001 к фазе 1 присоединяется фаза А («А» и «N» провода РЕТОМ-51). К фазе 1 устройства F002 присоединяется фаза В («В» и «N» провода РЕТОМ-51). Неиспользуемая фаза С устройства РЕТОМ-51 должна быть замкнута накоротко на неиспользуемый N этого же устройства. Для анализа времени и факта срабатывания защит необходимо присоединить дискретные входы РЕТОМ-51 к свободным выходам OXXX устройств Seram. В рассматриваемом случае это выходы: O102 (F001, клеммы N1:34, N1:35) и O105 (F002 клеммы N1:43, N1:44). Полная схема проведения испытаний приведена на рис. 10.

Начальным этапом проверки правильности работы ЛЗА является сверка настроек терминала защиты ввода. Для этого, используя программное

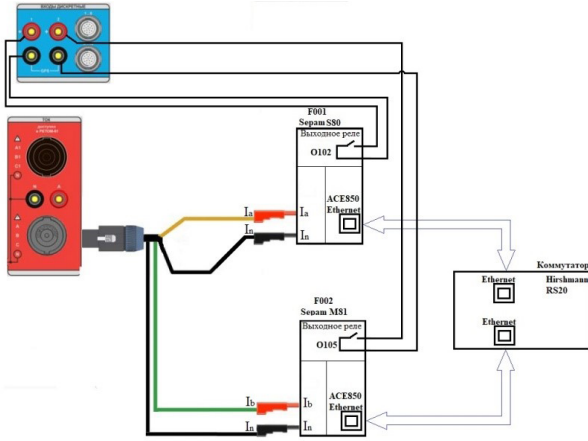


Рис. 10. Схема проверки правильности работы ЛЗЛ с помощью устройства РЕТОМ-51

обеспечение SFT2841, производится подключение к терминалу [7].

Особое внимание следует уделить тому, что передаваемая в наборе данных (Dataset) ступень защиты 50/51 без выдержки времени введена в работу без действия на выключатель и имеет соответствующую подпись «Блок. ЛЗЛ» (рис. 11) (в рассматриваемом случае это 4-я ступень).

Для замера времени срабатывания и визуализации факта срабатывания функции ЛЗЛ терминала F002 в матрице назначений необходимо назначить действие 1-й ступени защиты 50/51 на свободный выход OXXX (в рассматриваемом случае — O105).

Для сверки настроек терминала защиты отходящей линии, используя программное обеспечение SFT2841, производится подключение к терминалу. Во вкладке «Настройки защиты» производится проверка выставленных уставок в соответствии

Выходы	Сообщ. на англ.	Сообщ. русск.	Осц.
50/51 - 1	?	ТО	X
50/51 - 2	?	МТЗ II	X
50/51 - 3	?	БЛОК. ЛЗЛ	X
50/51 - 4	?	БЛОК. ЛЗЛ	X
50/51 - 5			
50/51 - 6			
50/51 - 7			
50/51 - 8			
50N/51N - 1	?	ЗАМ. НА ЗЕМ.	X
50N/51N - 2			
50N/51N - 3			
50N/51N - 4			
50N/51N - 5			
50N/51N - 6			
50N/51N - 7			
50N/51N - 8			

■ Не используется (функция или элемент не активированы)
■ Используется в стандартной функции SEPAM
■ Доступно для параметрирования
■ Используется в Logiram

Рис. 11. Матрица назначений сообщений терминала F002

Назначение ввода GOOSE

Вход GOOSE	Ин.	Вход GOOSE	Ин.
G401 Персон. использова...		G501 Персон. использова...	
G402 Персон. использова...		G502 Персон. использова...	
G403 Персон. использова...		G503 Персон. использова...	
G404 Персон. использова...		G504 Персон. использова...	
G405 Персон. использова...		G505 Персон. использова...	
G406 Персон. использова...		G506 Персон. использова...	
G407 Персон. использова...		G507 Персон. использова...	
G408 Персон. использова...		G508 Персон. использова...	
G409 Персон. использова...		G509 Персон. использова...	
G410 Неисправность при...		G510 Персон. использова...	
G411 Неисправность при...		G511 Персон. использова...	
G412 Персон. использова...		G512 Персон. использова...	
G413 Персон. использова...		G513 Персон. использова...	
G414 Персон. использова...		G514 Персон. использова...	
G415 Персон. использова...		G515 Персон. использова...	
G416 Персон. использова...		G516 Присутствие ACE850	

Рис. 12. Управление величиной тока терминалов F001 и F002, время срабатывания 1-й ступени защиты 50/51 терминала F002

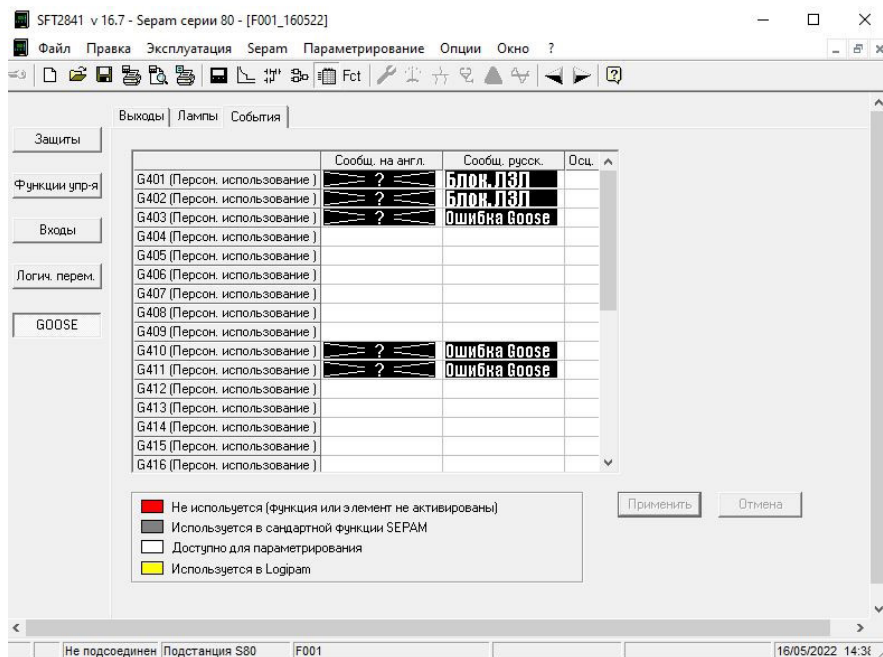


Рис. 13. Журнал событий терминала F002

с картой уставок. В рассматриваемом случае для работы ЛЗЛ задействована 1-я ступень защиты 50/51. Для визуализации наличия/отсутствия тех или иных GOOSE-сообщений (передаваемых в наборе данных) им также необходимо обеспечить наличие подписей в матрице назначений. Для замера времени срабатывания и визуальной оценки правильности срабатывания терминала F001 в матрице назначений необходимо назначить действие 1-й ступени защиты 50/51 на свободный выход OXXX (в рассматриваемом случае — O102).

В смонтированных терминалах Seram 1000+, где логика работы реализована в программной среде Logiram, есть возможность использовать GOOSE-сообщение непосредственно в программной среде. Для этого необходимо в конфигурации МП РЗА фидера открыть вкладку «Настройки Seram» — «GOOSE» (рис. 12) и из списка GOOSE-сообщений выбираются те, на которые назначены массивы данных QR, QD, PTOCn.Op.General, PTOCn.Op.q, (где n-номер ступени защиты, используемый без выдержки времени) из передаваемого набора данных (Dataset) от нижестоящего присоединения. Для того, чтобы иметь возможность использовать эти GOOSE-сообщения в программной среде Logiram, необходимо назначить им функцию «Персональное использование». В рассматриваемом примере используются следующие назначения:

- на GOOSE-сообщение G402 назначен массив срабатывания 4-й ступени защиты 50/51 нижестоящего присоединения — PTOC4.Op.General;
- на GOOSE-сообщение G403 назначен массив качества данных 4-й ступени защиты 50/51 нижестоящего присоединения — PTOC4.Op.General;
- на GOOSE-сообщение G410/411 назначены атрибуты QR/QD GOOSE сообщений от нижестоящего присоединения.

Используемым GOOSE-сообщениям во вкладке «Матрица» необходимо присвоить их события для визуального восприятия работы терминала (рис. 13).

Далее из МП РЗА производится выгрузка используемой ранее логики работы, редактирование

которой осуществляется в программном обеспечении SFT2885. В логику работы терминала необходимо добавить вышеперечисленные GOOSE-сообщения (G402, G403, G410, G411), соединив их между собой параллельно, а затем последовательно со стандартной функцией блокировки защиты P50/51_n_113 (где n — номер блокируемой ступени защиты 50/51).

V. Проверка работоспособности реализованной ЛЗЛ посредством воздействия на терминалы Seram 1000+. Производится проверка правильности сборки испытательной схемы для терминалов МП РЗА и устройства РЕТОМ-51. На дискретный вход № 1 РЕТОМ-51 подключается выход терминала F001, а на вход № 2 выход терминала F002. Управление величиной тока фазы А прибора РЕТОМ-51, будем изменять величину тока, протекающего через фидер F001, а величина тока фазы В — величина тока, протекающего через ввод F002.

В программе управления прибором РЕТОМ-51 «Retom» выбирается управление током фаз А и В (рис. 14) и подаётся величина, большая или равная уставке (в нашем случае 2А), производится наблюдение за поведением входов № 1 и № 2 РЕТОМ-51.

Производится выбор функции «Секундомер» — «Min-Max» (значение Max = 2А) и остановка по контакту № 2 (1 ст. 50/51 ввода F002). Фиксируется время срабатывания $t = 0,41484$ секунд. В терминале F002 во вкладке «Сообщения» фиксируется, что терминал Ввода сначала отправил сигнал «Блок. ЛЗЛ» в наборе данных, а затем отработала 1-я ступень защиты 50/51, и жмём «Сброс» (рис. 15).

В терминале F001 во вкладке «Сообщения». На данной странице фиксируется, что терминал сначала получил сигнал «Блок ЛЗЛ», и наблюдается отсутствие сообщения о срабатывании 1-й ступени защиты 50/51, производится нажатие кнопки «Сброс» (рис. 16).

Выбираем управление током фаз А и В, «Секундомер» — «Min-Max» (значение Max = 2А) и остановка по контакту № 1 (1 ст. 50/51 фидера F001). Секундомер не фиксирует время срабатывания по контакту № 1, что является повторным свиде-

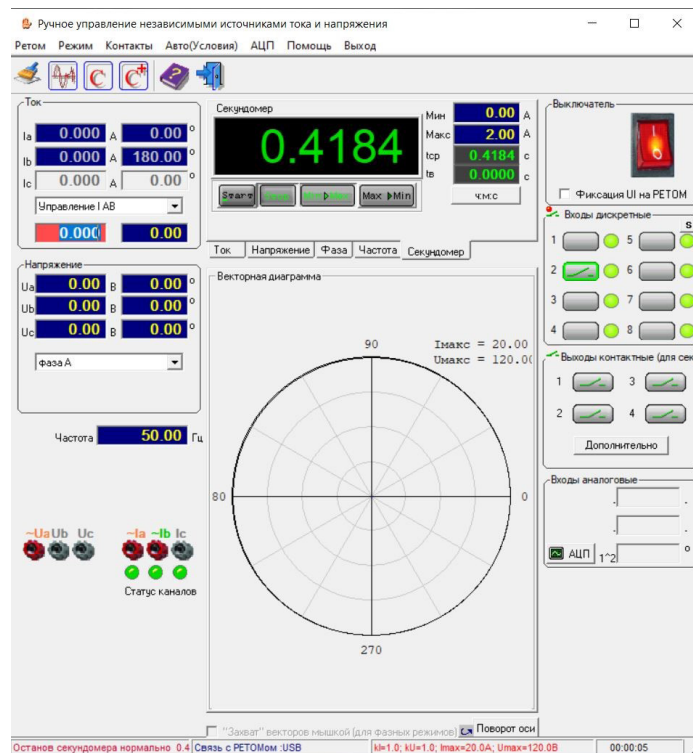


Рис. 14. Управление величиной тока терминалов F001 и F002, время срабатывания 1-й ступени защиты 50/51 терминала F002

Дата	Время	Ступень	Группа	Сообщение	Доп. информ.
19/05/22	10:36:49.599	Ступень 1	группа А	ТО	1
19/05/22	10:36:49.235	Ступень 4	группа А	БЛОК. ЛЗЛ	1
19/05/22	08:54:02.048			ЧВЕНЧ. У выт.	
19/05/22	08:54:17.434			Мех. неиспр.	
19/05/22	08:54:02.048			ЧВЕНЧ. У выт.	
13/05/22	13:32:14.433			Мех. неиспр.	
13/05/22	13:31:59.146			ЧВЕНЧ. У выт.	
13/05/22	10:12:16.434			Мех. неиспр.	
13/05/22	10:12:01.160			ЧВЕНЧ. У выт.	
11/05/22	10:37:34.434			Мех. неиспр.	
11/05/22	10:37:19.160			ЧВЕНЧ. У выт.	

Рис. 15. Журнал событий терминала F002

тельством блокировки ЛЗЛ. Правильность работы ЛЗЛ подтверждает анализ журнала событий терминалов F001 и F002.

В программе управления прибором РЕТОМ-51 «Retom» производим выбор управления током фазы А. Далее «Секундомер» — «Min-Max» (значение Max = 2А) и сигнал «Стоп» по контакту № 1 (1 ст. 50/51 терминала F001). Запускаем секундомер и фиксируем время срабатывания 1-й ступени 50/51 при отсутствии блокировки от нижестоящего Ввода F002 $t = 0.2177$ секунд. В терминале F001 во вкладке «Сообщения» фиксируем, что работу 1-й ступе-

ни защиты 50/51 с выдержкой времени, согласно уставке, производится нажатием кнопки «Сброс».

Необходимо произвести имитацию работы ЛЗЛ при потере связи терминала F001 с терминалом F002. Отсоединяя кабель RJ 45, обеспечивающий связь модуля ACE850 терминала F002 с коммутатором, необходимо наблюдать за изменением состояния GOOSE-сообщений, отвечающих за качество и полноту передачи (в рассматриваемом примере это сообщения G403, G411). Согласно вышесказанному, можно сделать вывод, что таким способом с высокой достоверностью проверяется блокировка

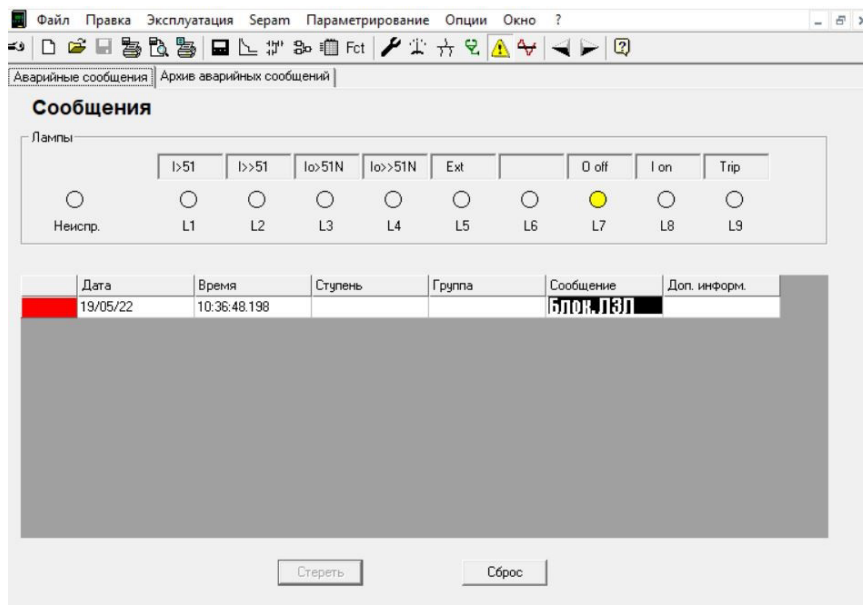


Рис. 16. Журнал событий терминала F001

ЛЗЛ при потере GOOSE-сообщений или приём некачественных GOOSE-сообщений приёмником.

Для полноценной проверки работы ЛЗЛ в подобных условиях выбирается управление током фаз А и В, «Секундомер» — «Min-Max» (значение Max = 2A) и остановка по контакту № 1 (1 ст. 50/51 терминала F001). Нажимаем кнопку «Start» на секундомере РЕТОМ-51 и фиксируем отсутствие срабатывания секундомера по контакту № 1. В терминале F001 во вкладке «Сообщения» видно, что терминал получил сигнал «Ошибка GOOSE», а также отсутствие срабатывания 1-й ступени защиты 50/51, производится нажатие кнопки «Сброс».

Второй вариант проверки необходимо произвести, приближая момент потери GOOSE к возникновению КЗ. Отсоединяя кабель RJ 45, обеспечивающий связь модуля ACE850 терминала F002 с коммутатором, следом без промедления производится нажатие на кнопку «Start» на секундомере РЕТОМ-51 — фиксируется несрабатывание 1-й ступени защиты 50/51. В терминале F001 во вкладке «Сообщения» видно, что терминал сначала получил сигнал «Ошибка GOOSE», а также отсутствие срабатывания 1-й ступени защиты 50/51, производится нажатие кнопки «Сброс».

VI. Результаты исследования. В настоящее время существуют различные стандарты, которые уже применяются в электроэнергетической инфраструктуре Российской Федерации, такие как МЭК 61850, CIM, Modbus, DNP и OPC-UA. Эти стандарты имеют разные цели и разные структуры, что затрудняет обеспечение функциональной совместимости [8]. Предлагаемый способ реализации защиты использует информационную модель на основе МЭК 61850 и может принимать другие стандарты информационных моделей.

МЭК 61850 — это новый международный стандарт связи, который позволяет интегрировать все функции подстанции, такие как защита, управление, измерение и мониторинг. Данный стандарт расширяет сферу взаимодействия многих частей энергосистемы благодаря его широкому набору инструментов [9, 10].

Централизованные и единообразные методы реализации разнообразных функций в рамках стан-

дарты становятся основными эксплуатационными преимуществами данного стандарта [11, 12].

Благодаря предложенному способу, существует возможность реализовать принудительную или автоматическую блокировку защиты в случае повреждения линии связи, благодаря чему достигаются требования надёжности и селективности.

Рассмотрев процесс работы предлагаемого способа защиты, с точки зрения теории организации технологических процессов на подстанции, можно сделать вывод, что предлагаемое решение является перспективным подходом к разработке математических моделей энергосистем, которые могут быть в дальнейшем эффективно использованы при проектировании подстанций, а также для диагностики их состояния.

VII. Выводы и заключение. Реализация ЛЗЛ посредством цифровых унифицированных интерфейсов сбора и обмена информацией обеспечивает следующие преимущества:

- 1) упрощение вторичных присоединений в результате замены электрических кабелей на волоконно-оптические линии связи;
- 2) возможен быстродействующий обмен информацией в стандартизованном виде между устройствами внутри подстанции и за ее пределами;
- 3) отсутствие электрической связи между первичным и вторичным оборудованием, электромагнитные помехи с первичного оборудования не передаются во вторичные цепи.

Перечисленные преимущества обуславливают предпосылки реализации ЛЗЛ, а именно:

- 1) соблюдены основные требования к устройствам РЗА: селективность, надёжность, быстродействие и чувствительность;
- 2) снижение расходов на техническое перевооружение за счет того, что протокол МЭК 61850 в терминалах компании Schneider Electric и Механотроника осуществляется в общем ПО — SET850.

Библиографический список

1. А. с. 1644287 СССР, МПК H02H 7/26. Устройство для централизованной токовой защиты сети / Болгарцев Г. Е.,

Клецель М. Я., Никитин К. И. [и др.]. № 4352486; заявл. 30.12.87; опубл. 23.04.91, Бюл. № 15.

2. Хлебцов А. П., Шилин А. Н. Тенденции и перспективы развития информационно-измерительных систем диагностики цифровых подстанций // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2018. № 2. С. 31–36. EDN: XTMGAP.

3. ГОСТ Р 56865-2016. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Релейная защита и автоматика. Технический учет и анализ функционирования. Общие требования. Введ. 2016–09–01. Москва: Стандартинформ, 2016. 22 с.

4. Симаков А. В., Харламов В. В., Скороходов В. И. Разработка метода проверки комплексов цифровой релейной защиты электроэнергетических установок // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 58–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-58-63. EDN: OHICNT.

5. СТО 56947007-29.240.10.299-2020. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС. Введ. 26–02–2020. Москва: ПАО «ФСК ЕЭС», 2020. 125 с. URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.299-2020.pdf (дата обращения: 06.12.2023).

6. Electrical network protection. User's manual 01/2013 CET850 IEC 61850 configuration software. Schneider Electric, 2013. 52 p. URL: <https://manualzz.com/doc/o/ca1u7/cet850--schneider-electric-cet850-description> (дата обращения: 06.12.2023).

7. Защита электрических сетей. Sepam серии 80. Измерения, защита, управление и контроль. Schneider Electric, 2006. 247 с. URL: <https://manualzz.com/doc/9833888/sepam-serii-80.-izmereniya--zashhita--upravlenie-i-kontrol> (дата обращения: 06.12.2023).

8. Шалимов А. С. Схемы испытаний устройств релейной защиты и автоматизации на основе стандарта IEC 61850 // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 3 (36). С. 34–36. EDN: VBCVEB.

9. Ali N., Eissa M. Accelerating the protection schemes through IEC 61850 protocols // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018. Vol. 102. P. 189–200. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.04.035.

10. Чайкин В. С., Иванов А. В. МЭК 61850: язык описания конфигурации подстанции // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2. С. 66–71. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_66. EDN: PEGUTY.

11. Долежилек Д. Опыт разработки, создания, тестирования и поддержки цифрового вторичного оборудования для систем РЗА // Релейщик. 2018. № 2 (32). С. 44–61. EDN: OGGZQU.

12. Никитин В. В., Варавин А. С., Эзирбаев Т. Б., Магомадов Р. А. М. Практическая реализация требований серии стандартов МЭК 61850 на энергетических объектах России // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2022. Т. 7, № 2 (28). С. 118–127. DOI: 10.25744/genb.2022.92.42.013. EDN: DGLNKN.

ДАВЫДОВ Дмитрий Александрович, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2555-1432

ORCID: 0009-0004-2042-481X

Адрес для переписки: 7shaq7@gmail.com

ХОЛМОВ Михаил Александрович, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2561-3270

AuthorID (РИНЦ): 1087396

ORCID: 0000-0003-4803-7729

Адрес для переписки: misha97h@gmail.com

НИКИТИН Константин Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Адрес для переписки: n-c-i@mail.ru

КЛЕЦЕЛЬ Марк Яковлевич, доктор технических наук, доцент (Республика Казахстан), профессор кафедры «Электроэнергетика» НАО «Торайгыров университет», г. Павлодар, Республика Казахстан.

Для цитирования

Давыдов Д. А., Холмов М. А., Никитин К. И., Клецель М. Я. Способ построения защиты линии с применением стандарта МЭК 61850 на примере микропроцессорного терминала Sepam серии 1000+ // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 87–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-87-98.

Статья поступила в редакцию 13.12.2023 г.

© Д. А. Давыдов, М. А. Холмов, К. И. Никитин, М. Я. Клецель

THE METHOD OF LINE PROTECTION CONSTRUCTION WITH APPLICATION OF IEC 61850 STANDARD ON THE EXAMPLE OF SEPAM 1000+ SERIES MICROPROCESSOR TERMINAL

The paper raises a variant of architecture of realization of logical line protection on the basis of implementation of modern technologies. The idea of development and implementation of digital substations, the core of which is the application of IEC 61850 standard, has been developing at a great pace in the world. The appearance of this standard in substations opens new ways of realization of protection of electrical installations. In this article we consider the method of construction of line protection using the method of logical selectivity, and as the main terminals are considered Sepam devices series 1000+, as one of the most widely distributed devices in the electric power industry of the Russian Federation, the basic support for the standard IEC 61850.

Keywords: digital substation, IEC 61850, line protection, decentralized relay protection, logic selectivity, microprocessor relay protection, local substation network, current protection.

References

1. Certificate of Authorship. 1644287 USSR, IPC H 02 H 7/26. Ustroystvo dlya tsentralizovannoy tokovoy zashchity seti [Device for centralized overcurrent protection of network] / Bolgartsev G. E., Kletsel' M. Ya., Nikitin K. I. [et al.]. No. 4352486. (In Russ.).
2. Khlebtsov A. P., Shilin A. N. Tendentsii i perspektivy razvitiya informatsionno-izmeritel'nykh sistem diagnostiki tsifrovyykh podstantsiy [Trends and prospects for the development of information and measuring systems for the diagnostics of digital substations] // *Energo- i resursoberezhniye: promyshlennost' i transport. Energy and Resource Saving: Industry and Transport*. 2018. No. 2. P. 31–36. EDN: XTMGAP. (In Russ.).
3. GOST R 56865-2016. Edinaya energeticheskaya sistema i izolirovanno rabotayushchiye energosistemy. Operativno-dispetcherskoye upravleniye. Releynaya zashchita i avtomatika. Tekhnicheskyy uchet i analiz funktsionirovaniya. Obshchiye trebovaniyat [United power system and isolated power systems. Operational dispatch management. Relay protection and automation. Technical accounting and operations analysis. General requirements]. Moscow, 2016. 22 p. (In Russ.).
4. Simakov A. V., Kharlamov V. V., Skorokhodov V. I. Razrabotka metoda proverki kompleksov tsifrovoy releynoy zashchity elektroenergeticheskikh ustanovok [Digital relay protection complex testing method development for electric power equipment] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2019. No. 5 (167). P. 58–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-58-63. EDN: OHICNT. (In Russ.).
5. ISO 56947007-29.240.10.299-2020. Tsifrovaya podstantsiya. Metodicheskiye ukazaniya po proyektirovaniyu TsPS [Digital substation. Methodological guidelines for the design of digital substation]. Moscow, 2020. 125 p. URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.299-2020.pdf (accessed: 06.12.2023). (In Russ.).
6. Electrical network protection. User's manual 01/2013 CET850 IEC 61850 configuration software. Schneider Electric, 2013. 52 p. URL: <https://manualzz.com/doc/o/ca1u7/cet850--schneider-electric-cet850-description> (accessed: 06.12.2023). (In Engl.).
7. Zashchita elektricheskikh setey. Sepam serii 80. Izmereniya, zashchita, upravleniye i kontrol' [Protection of electrical networks. Sepam Series 80. Measurement, protection, control and monitoring]. Schneider Electric, 2006. 247 p. URL: <https://manualzz.com/doc/9833888/sepam-serii-80.-izmereniya--zashchita--upravlenie-i-kontrol> (accessed: 06.12.2023). (In Russ.).
8. Shalimov A. S. Skhemy ispytaniy ustroystv releynoy zashchity i avtomatiki na osnove standarta IEC 61850 [Testing schemes for IEC 61850 IEDS] // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya. Relay Protection and Automation*. 2019. No. 3 (36). P. 34–36. EDN: VBCBEB. (In Russ.).
9. Ali N., Eissa M. Accelerating the protection schemes through IEC 61850 protocols // *International Journal of Electrical*

Power & Energy Systems, 2018. Vol. 102. P. 189–200. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.04.035. (In Engl.).

10. Chaykin V. S., Ivanov A. V. MEK 61850: yazyk opisaniya konfiguratsii podstantsii [IEC 61850: System configuration description language] // *Intellektual'naya elektrotehnika. Smart Electrical Engineering*. 2021. No 2. P. 66–71. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_66. EDN: PEGUTY. (In Russ.).

11. Dolezhilek D. Opyt razrabotki, sozdaniya, testirovaniya i podderzhki tsifrovogo vtorichnogo oborudovaniya dlya sistem RZA [Experience in designing, building, testing and supporting digital secondary equipment for RPA systems] // *Releyshchik. Relayman*. 2018. No. 2 (32). P. 44–61. EDN: OGGZQU. (In Russ.).

12. Nikitin V. V., Varavin A. S., Ezirbayev T. B., Magomadov R. A. M. Prakticheskaya realizatsiya trebovaniy serii standartov MEK 61850 na energeticheskikh ob"yektakh Rossii [Practical implementation of the requirements of the IEC 61850 series of standards in Russian energy facilities] // *Grozny Natural Science Bulletin*. 2022. Vol. 7, no. 2 (28). P. 118–127. DOI: 10.25744/genb.2022.92.42.013. EDN: DGLNKN. (In Russ.).

DAVYDOV Dmitriy Aleksandrovich, Graduate Student of Theoretical and General Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2555-1432

ORCID: 0009-0004-2042-481X

Correspondence address: 7shaq7@gmail.com

KHOLMOV Mikhail Aleksandrovich, Graduate Student of Theoretical and General Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2561-3270

AuthorID (RSCI): 1087396

ORCID: 0000-0003-4803-7729

Correspondence address: misha97h@gmail.com

NIKITIN Konstantin Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Theoretical and General Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3733-8763

AuthorID (RSCI): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Correspondence address: n-c-i@mail.ru

KLETSEL Mark Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Power Engineering Department, Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan.

For citations

Davydov D. A., Kholmov M. A., Nikitin K. I., Kletsel M. Ya. The method of line protection construction with application of IEC 61850 standard on the example of Sepam 1000+ series microprocessor terminal // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 87–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-87-98.

Received December 13, 2023.

© D. A. Davydov, M. A. Kholmov, K. I. Nikitin, M. Ya. Kletsel

УДК 621.317
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-99-106
EDN: HLUWKG

С. В. БИРЮКОВ¹
А. В. ТЮКИН²
Л. В. ТЮКИНА³

¹ Омский государственный
технический университет,
г. Омск

² Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

³ Омский промышленно-
экономический колледж,
г. Омск

РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ СДВОЕННОГО ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА

Предлагается новый метод измерения напряженности электрического поля. В основу метода положен метод измерения по среднему значению, в котором используется сдвоенный электроиндукционный сферический датчик. Использование сдвоенного датчика для реализации метода позволило расширить функциональные возможности метода по среднему значению. Метод измерения по среднему значению предполагает одновременное измерение двух значений напряженности E_1 и E_2 в одной точке электрического поля с противоположными по знаку погрешностями. Как показала теория построения нового метода, по двум значениям напряженностей можно определить не только результат измерения как среднее из них, так и оценить погрешность результата измерений и ориентировочно определить расстояние до источника поля. Для определения расстояния до источника поля вводится коэффициент отношения двух найденных напряженностей в каждой точке поля, по которому находится эмпирическая зависимость относительного расстояния до источника поля. Относительное расстояние представляет собой соотношение между радиусом сферического датчика и расстоянием до источника

поля. Определяя по этой зависимости относительное расстояние в каждой точке измерений и подставляя его в известное выражение для погрешности, определяют погрешность результата в точке измерений. Через относительное расстояние определяют и расстояние до источника поля. Таким образом, новый метод измерения позволяет повысить точность измерения напряженности электрического поля, определить погрешность результата измерений и расстояние до источника поля.

Ключевые слова: метод измерения, электроиндукционный датчик, сдвоенный датчик, электрическое поле, погрешность измерения, расстояние до источника поля.

Введение. В настоящее время существуют различные методы измерения напряженности электрического поля (НЭП). Приборы для измерения напряженности поля используют в основном следующие методы: электроиндукционный, электропространственный, электромеханический, газоразрядный, емкостный и оптический.

В работе будут рассматриваться электроиндукционные методы измерения, в которых используются электроиндукционные датчики [1, 2]. Большая часть электроиндукционных датчиков НЭП относится либо к одинарным [3], либо к двойным [4]. В данной статье предложен новый метод, позволяющий измерять НЭП с помощью сдвоенного датчика нового типа. Таким датчиком является сдвоенный электроиндукционный датчик, позволяющий определять значение напряженности поля, погрешность результата измерений и оценивать расстояние до источника поля.

Существует большое количество методов измерения НЭП [5–14]. Все они решают конкретные задачи. К таким задачам можно отнести: повышение точности измерений, повышение чувствительности, облегчение процесса измерений и др. Предлагаемый в работе метод относится к методам, повышающим точность измерений и расширяющим функциональные возможности измерений. В основу нового метода положен метод измерения по среднему значению [15–17]. Рассмотрим его теоретические особенности.

Теория. Достоинством выбранного метода измерений НЭП по среднему значению является возможность одновременного получения в одной точке измерений двух значений напряженности E_1 и E_2 , имеющих противоположные по знаку погрешности, относительно значения E_0 в точке измерений. Реализовать этот метод позволяют датчики НЭП нового типа — сдвоенные сферические датчики, основанные на явлении электрической индукции [18, 19]. Сдвоенные датчики совмещают в себе два двойных датчика, расположенных на одних координатных осях. В связи с этим сдвоенный датчик вырабатывает два выходных сигнала, соответствующих напряженностям ЭП E_1 и E_2 .

Сдвоенный электроиндукционный датчик [15, 16] представлен на рис. 1.

Датчик состоит из двух частей: механической и измерительной.

Механическая часть состоит из проводящего сферического основания 1 и двух пар проводящих чувствительных элементов, являющихся частями сферической поверхности датчика. Первая пара чувствительных элементов 2 и 3 выполнена в форме сферических сегментов и входит в состав первого датчика, а вторая пара чувствительных элементов 4 и 5 выполнена в форме сферических слоёв и входит в состав второго датчика. Обе пары чувствительных

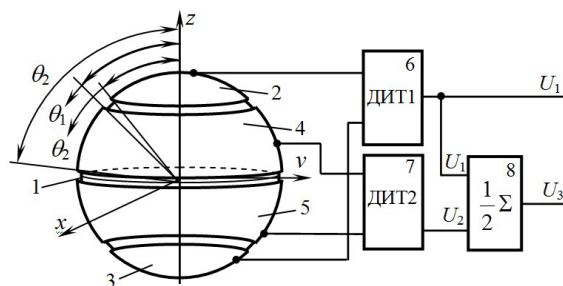


Рис. 1. Сдвоенный датчик напряженности электрического поля

элементов симметрично расположены на поверхности сферы и изолированы от неё тонким изоляционным слоем толщиной ~50 мкм. Таким образом, механическая часть состоит из двух независимых датчиков.

Измерительная часть состоит из дифференциальных интеграторов тока 6 (ДИТ1), 7 (ДИТ2) и полусумматора 8. Полусумматор 8 суммирует выходные сигналы дифференциальных интеграторов тока 6 и 7 с коэффициентом суммирования $\frac{1}{2}$.

Чувствительные элементы 2 и 3, имеющие форму сферических сегментов, ограничены угловым размером $\theta_0 = 45^\circ$ как у двойного сферического датчика, представленного в работе [20].

Чувствительные элементы 4 и 5, имеющие форму сферических слоёв, ограничены угловыми размерами: у вершины $\theta_0 = 45^\circ$ и основания $\theta_0 = 90^\circ$, как у двойного сферического датчика, представленного в работе [21].

Конструктивно механическая часть датчика выполнена так, что все проводящие чувствительные элементы изолированы между собой и проводящим сферическим основанием.

При внесении датчика в электрическое поле на чувствительных элементах 2–5 индуцируются электрические заряды, пропорциональные напряженности электрического поля. Электрические заряды с чувствительных элементов снимаются дифференциальными интеграторами тока 6 и 7, которые преобразуют разность зарядов с противоположных элементов датчика 2–3 и 4–5 преобразуют в напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$. Эти напряжения полусумматором 8 преобразуются в напряжение $U_3(t)$. Сформированные, таким образом, сдвоенным датчиком напряжения $U_1(t)$ и $U_3(t)$ являются его выходными сигналами, пропорциональными напряженностям электрического поля E_1 и E_2 в одной точке измерения.

В работе приняты условия, которые необходимы для реализации нового метода измерения НЭП с повышенной точностью и возможностью определения погрешности измерения и расстояния до источника поля и заключаются в следующем:

1) необходимо иметь два значения НЭП E_1 и E_2 , измеренные в данной точке измерений с исходной напряженностью E_0 ;

2) необходимо, чтобы значения НЭП E_1 и E_2 были измерены с противоположными по знаку погрешностями $+\delta_1$ и $-\delta_2$;

3) для определения погрешностей $+\delta_1$ и $-\delta_2$ использовать выражение [22]:

$$\delta(a) = \left[\begin{array}{l} \frac{1-a^2}{3a^2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_1)} \times \\ \left(\frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{1+2a \cos \theta_1 + a^2}} - \right. \\ \left. - \frac{1}{\sqrt{1-2a \cos \theta_2 + a^2}} - \right. \\ \left. - \frac{1}{\sqrt{1+2a \cos \theta_2 + a^2}} \right) \cdot 100, \quad (1) \end{array} \right] \cdot 100,$$

полученное при взаимодействии сферического датчика с полем точечного источника. Дадим пояснения к выражению (1): $a = R/d$ — относительное расстояние до источника поля, ограничивающее пространственный диапазон измерений; R — радиус датчика; d — расстояние от центра датчика до источника поля; θ — угол, между осями, выходящими из центра сферического основания датчика и проходящими через центр и край сферического чувствительного элемента, определяющий размеры сферического сегмента и сферического слоя. Для сферического сегмента у вершины $\theta = \theta_1 = 0^\circ$ и у основания $\theta = \theta_2 = 45^\circ$. Для сферического слоя у вершины $\theta = \theta_1 = 45^\circ$ и у основания $\theta = \theta_2 = 90^\circ$.

При подстановке угловых размеров чувствительных элементов в форме сферических сегментов и сферических слоёв в выражение (1) можно упростить его и привести к видам:

для сферического сегмента ($\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 45^\circ$):

$$\delta_1(a) = \left[\frac{4}{3a^2} \left(1 - \frac{(1-a^2)(\sqrt{1+\sqrt{2}a+a^2} + \sqrt{1-\sqrt{2}a+a^2})}{2\sqrt{1+a^4}} \right) - 1 \right] \cdot 100, \quad (2)$$

для сферического слоя ($\theta_1 = 45^\circ$ и $\theta_2 = 0^\circ$):

$$\delta_2(a) = \left[\frac{4}{3a^2} \left(\frac{(1-a^2)(\sqrt{1+\sqrt{2}a+a^2} + \sqrt{1-\sqrt{2}a+a^2})}{2\sqrt{1+a^4}} - \frac{(1-a^2)}{\sqrt{1+a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100. \quad (3)$$

Выходными напряжениями датчика являются напряжения $U_1(t) = kE_1(t)$ и $U_3(t) = kE_2(t)$. При этом напряжение $U_3(t) = [U_1(t) + U_2(t)]/2$ формируются на выходе полусумматора 8 и объединяют электрические заряды, индуцированные на чувствительных элементах 2 + 4 и 3 + 5.

Для напряжений $U_1(t)$ и $U_2(t)$ с учетом их погрешности можно записать:

$$\begin{cases} U_1(t) = kE_1(t) = kE_0(1 + \delta_1), \\ U_2(t) = kE_2(t) = kE_0(1 + \delta_2). \end{cases} \quad (4)$$

Для напряжения $U_3(t)$ с учетом погрешности запишем

$$\begin{aligned} U_3(t) &= \frac{k[E_1(t) + E_2(t)]}{2} = \\ &= kE_3(t) = kE_0(t) \cdot (1 + \delta_3), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\delta_3 = (\delta_1 + \delta_2)/2. \quad (6)$$

Подставив в выражение для δ_3 выражения (2) и (3), получим

$$\begin{aligned} \delta_3(a) &= \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{4}{3a^2} \left(1 - \frac{(1-a^2)(\sqrt{1+\sqrt{2}a+a^2} + \sqrt{1-\sqrt{2}a+a^2})}{2\sqrt{1+a^4}} \right) - 1 \right] + \right. \\ &\left. + \left[\frac{4}{3a^2} \left(\frac{(1-a^2)(\sqrt{1+\sqrt{2}a+a^2} + \sqrt{1-\sqrt{2}a+a^2})}{2\sqrt{1+a^4}} - \frac{(1-a^2)}{\sqrt{1+a^2}} \right) - 1 \right] \right\} \cdot 100 = \\ &= \left[\frac{2}{3a^2} \left(1 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+a^2}} \right) - 1 \right] \cdot 100. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) после определения параметра a , что будет показано ниже, позволяет определять погрешность результата измерения НЭП E_0 .

Теперь несложно записать НЭП E_1 и E_2 в функции от пространственного диапазона измерения a :

$$E_1(a) = E_0(a)[1 + \delta_1(a)] \quad \text{и} \quad E_2(a) = E_0(a)[1 + \delta_3(a)], \quad (8)$$

где E_0 — напряженность ЭП исходного поля в точке измерения до внесения датчика.

Введем в рассмотрение коэффициент $k(a)$

$$k(a) = \frac{E_1(a)}{E_2(a)}, \quad (9)$$

который будет использоваться для определения расстояния для источника поля.

Постановка задачи. Для создания нового метода измерений и достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

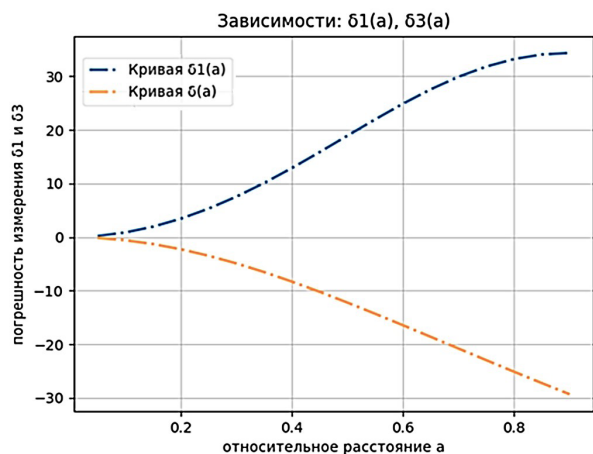


Рис. 2. График зависимости погрешностей δ_1 и δ_3 измерения напряженности от относительного расстояния a

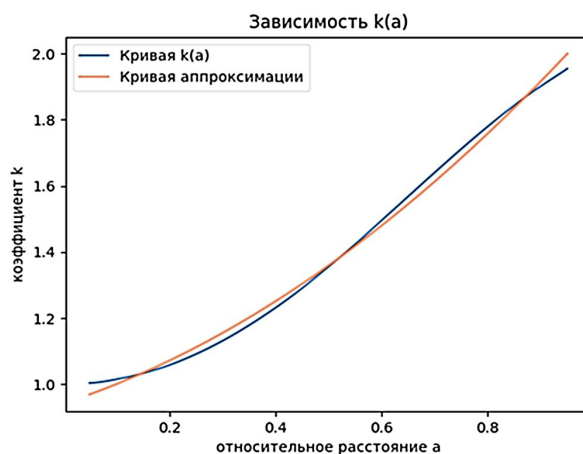


Рис. 3. График зависимости $k(a)$ и аппроксимирующей кривой

1. Произвести расчет погрешностей измерений $\delta_1(a)$ и $\delta_3(a)$ для пространственного диапазона измерений a (относительного расстояния) от 0 до 0,95 с шагом 0,05, используя выражения (2) и (7).

2. Построить график зависимостей $\delta_1(a)$ и $\delta_3(a)$ и представить их (рис. 2).

3. Рассчитать коэффициенты $k(a)$ (выражение (9)) для пространственного диапазона измерений a от 0 до 0,95 с шагом 0,05 с учетом выражения (8)

$$k(a) = \frac{E_1(a)}{E_2(a)} = \frac{E_0[1 + \delta_1(a)]}{E_0[1 + \delta_3(a)]} = \frac{1 + \delta_1(a)}{1 + \delta_3(a)}. \quad (10)$$

Полученные результаты записать в табл. 1.

4. По данным (табл. 1) получить эмпирическое выражение для функциональной зависимости параметра a от $k(a)$.

Полученное эмпирическое выражение для a имеет вид [23]:

$$a = \frac{R}{d} = 1,123\sqrt{k(a) - 0,94} - 0,21, \quad (11)$$

Для наглядности подтверждения уменьшения погрешности $\delta(a)$ предложенного метода построим график этой погрешности в зависимости от пространственного диапазона a и представим его на рис. 4.

Из графика (рис. 4) следует, что погрешность измерения предложенного метода измерений положительна и не превышает 4,6 % во всем пространственном диапазоне измерений a .

где R — радиус датчика; d — расстояние от центра датчика до источника поля.

На графике (рис. 3) представлена зависимость коэффициента $k(a)$ от пространственного диапазона измерения a и кривая аппроксимации.

Используемый в работе метод измерения по среднему значению, включенный в состав предлагаемого авторами нового метода, позволяет повысить точность НЭП E по отношению к исходному полю E_0 . Поясним это утверждение, для чего с учетом выражения (8) запишем:

$$E(a) = \frac{E_1(a) + E_2(a)}{2} = E_0(a) \left[1 + \frac{\delta_1(a) + \delta_3(a)}{2} \right], \quad (12)$$

где

$$\delta(a) = (\delta_1(a) + \delta_3(a))/2. \quad (13)$$

В выражении (13) погрешность $\delta_1(a)$ положительная, а погрешность $\delta_3(a)$ отрицательная. После подстановки в выражение (13) выражений (2) и (7) для погрешностей $\delta_1(a)$ и $\delta_3(a)$ получим выражение для результирующей погрешности сдвоенного датчика $\delta(a)$:

$$\delta(a) = \left\{ \frac{1}{3a^2} \left[3 - (1 - a^2) \left(\frac{\sqrt{1 + \sqrt{2}a + a^2} + \sqrt{1 - \sqrt{2}a + a^2}}{\sqrt{1 + a^4}} + \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right) \right] - 1 \right\} 100. \quad (14)$$

Обсуждение полученных результатов. Полученные в работе результаты исследований позволили сформулировать новый метод измерения НЭП, который сводится к следующему:

1) одновременно измеряются сдвоенным датчиком значения напряженностей ЭП $E_1(a)$ и $E_2(a)$ в интересующихся точках поля;

2) определяется результат измерения НЭП как среднее значение из $E_1(a)$ и $E_2(a)$: $E = (E_1 + E_2) / 2$:

Значения коэффициента k_0 в зависимости от пространственного диапазона измерения a

Таблица 1

a	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$k(a)$	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	
$k(a)$	1,423	1,495	1,568	1,64	1,711	1,779	1,843	1,901	1,954	

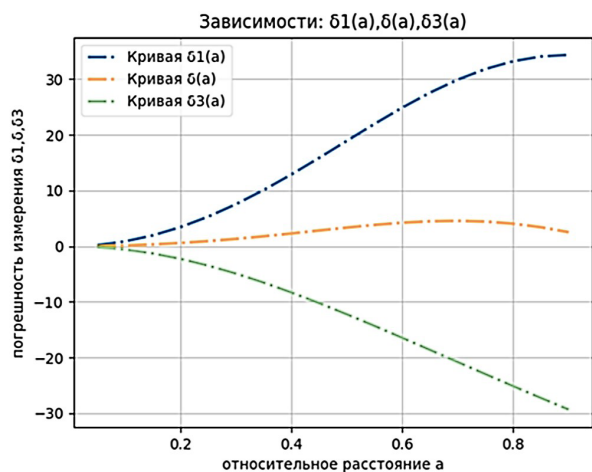


Рис. 4. График зависимостей погрешностей δ_1 и δ_3 измерения напряженности E от a и результирующей погрешности δ значения

3) определяется значения введенного коэффициента $k(a)$ для каждой точки измерения как $k(a) = E_1(a) / E_2(a)$;

4) определяется по найденным значениям коэффициента $k(a)$ и эмпирическому выражению (11) пространственный диапазон измерения в каждой точке поля;

5) определяется по найденным значениям в п. 4 относительных расстояний a и выражению (14) погрешность $\delta(a)$ в каждой точке измерений;

6) производится уточнение полученного результата измерений НЭП:

$$E_0(a) = \frac{E(a)}{[1 + \delta(a)]},$$

где $E(a)$ — результаты измерений, полученные в п. 2 метода измерений; $\delta(a)$ — погрешность результата измерения, полученная по выражению (14); $E_0(a)$ — НЭП в точке измерения до внесения датчика.

Данный метод является принципиально новым [24].

Заключение. В результате проведенных исследований предложен новый метод измерения НЭП с использованием сдвоенного электроиндукционного сферического датчика. Приведены требования к сдвоенному датчику и его конструктивные решения. Использование сдвоенного датчика позволило расширить функциональные возможности метода измерений по среднему значению. Сдвоенный датчик позволил не только измерить НЭП, но и:

- вычислить погрешность результата измерений;
 - уточнить результат измерений через его погрешность;
 - определить расстояние до источника поля.
- Метод подтвержден численным экспериментом.

Библиографический список

- Xiao D., Ma Q., Xie Y. [et al.]. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // *Sensors* (Basel). 2018. Vol. 18 (4). 1053. DOI: 10.3390/s180410532.
- Suo C., Wei R., Suo C. [et al.]. Research on the Three-Dimensional Power Frequency Electric Field Measurement

System // *Journal of Sensors*. 2021. Vol. 16. P. 1–15. DOI: 10/1155/2021/8859022.

- Берент Г. Н., Плейс И. Р. Датчик электрического поля // *Приборы для научных исследований*. 1971. № 6. С. 141–142.
- Гатман С. А. Двойной измеритель электрического поля с защитой // С. Гатман // *Приборы для научных исследований*. 1968. № 1. С. 45–49.
- Юркевич В. М., Кондратьев Б. Л. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // *Измерительная техника*. 1980. № 5. С. 57–59.
- Чугунов С. А., Юркевич В. М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // *Измерительная техника*. 1981. № 1. С. 33–35.
- Кондратьев Б. Л., Юркевич В. М. Измерения в электрическом поле с выравниванием потенциалов // *Труды Московского энергетического института*. Москва, 1979. Т. 432. С. 20–22.
- 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.
- Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 // *Rev. Gen. Elec.* 1988. No. 7. P. 27–38.
- 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 участ. зарубеж. специалистов. Москва, 01–31 мая 2002 г. / под ред. В. Н. Азарова. Москва: Изд-во МГИЭМ, 2002. С. 25–26.
- Бирюков С. В. Методы измерения напряженности неоднородных электрических полей вблизи источников поля трехкоординатными датчиками // *Известия вузов. Электротехника*. 2003. № 4. С. 22–25. EDN: HTUFYJ.
- 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: материалы междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72)*. Москва: Энергия, 1974. С. 33–43.
- Eggert S., Goltz S. NFM-1 ein aperiodisches Nahfeld – Stärkemessgerät für Messungen an Hochfrequenzarbeitsplätze // *Radio Fernsehen Elektronik*. 1976. Vol. 25, no. 15. S. 488–490.
- Сукманов В. И., Сафонов В. И., Ильин А. Н. [и др.]. Прибор для измерения напряженности электрического поля // *Электрические станции*. 1987. № 6. С. 69–71.
- Пат. 2743617 С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля повышенной точности / Бирюков С. В., Глуховера Е. Г. № 2020118083; заявл. 02.06.2020; опубл. 20.02.2021. Бюл. № 5. 10 с.
- Пат. 2773868 С1 Российская Федерация, МПК 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. 8 с.
- Тюкина Л. В., Бирюков С. В., Тюкин А. В. Новый подход к применению метода измерений напряженности электрического поля по среднему значению // *Омский научный вестник*. 2022. № 3 (183). С. 122–127. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-122-127. EDN: GRAKRH.
- 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. 10 с.
- Глуховера Е. Г. Датчики напряженности электрического поля на новых физических эффектах и явлениях // *Актуальные проблемы современной науки: материалы IX Регион.*

науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск, 29 мая 2020 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 47–50.

20. Цигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.

21. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for Scientific Research. 1978. Vol. 49, no. 7. P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497.

22. Шкарин Ю. П. Влияние электроустановок высоко-го напряжения на окружающую среду: пер. докл. междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-86). Москва: Энергоатомиздат, 1988. 104 с. ISBN 5-283-02447-4.

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. № 29. 9 с.

24. 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. 9 с.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

ТЮКИН Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и математика» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск.

SPIN-код: 4516-7742

AuthorID (SCOPUS): 57203100232

ORCID: 0000-0002-7316-3797

ТЮКИНА Людмила Владимировна, преподаватель Омского промышленно-экономического колледжа, г. Омск.

SPIN-код: 6018-7429

Для цитирования

Бирюков С. В., Тюкин А. В., Тюкина Л. В. Разработка нового метода измерения напряженности электрического поля на основе сдвоенного электроиндукционного датчика // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 99–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-99-106.

Статья поступила в редакцию 29.11.2023 г.

© С. В. Бирюков, А. В. Тюкин, Л. В. Тюкина

DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR MEASURING THE ELECTRIC FIELD STRENGTH BASED ON A DUAL ELECTRO-INDUCTION SENSOR

A new method for measuring electric field strength is proposed. The method is based on the mean value measurement method, which uses a dual electroinduction spherical sensor. The use of the dual sensor for the method implementation allows to extend the functionality of the method by mean value. The method of measurement by the mean value assumes simultaneous measurement of two values of intensity E_1 and E_2 in one point of electric field with opposite sign errors. As the theory of construction of the new method has shown, it is possible to determine not only the measurement result as an average of two values of the strengths, but also to estimate the error of the measurement result and tentatively determine the distance to the field source. In order to determine the distance to the field source, a coefficient of the ratio of the two found strengths at each point of the field is introduced, by which the empirical dependence of the relative distance to the field source is found. The relative distance is the ratio between the radius of the spherical sensor and the distance to the field source. By determining the relative distance at each measuring point according to this relationship and substituting it into the known expression for the error, the error of the result at the measuring point is determined. The relative distance is also used to determine the distance to the field source. Thus, the new method of measurement allows to increase the accuracy of measurement of electric field strength, determined by the relative distance to the source of the field.

Keywords: measurement method, electroinduction sensor, dual sensor, electric field, measurement error, distance to the field source.

References

1. Xiao D., Ma Q., Xie Y. [et al.]. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement // *Sensors* (Basel). 2018. Vol. 18 (4). 1053. DOI: 10.3390/s180410532. (In Engl.).
2. Suo C., Wei R., Suo C. [et al.]. Research on the Three-Dimensional Power Frequency Electric Field Measurement System // *Journal of Sensors*. 2021. Vol. 16. P. 1–15. DOI: 10/1155/2021/8859022. (In Engl.).
3. Berent G. N., Pleys I. R. Datchik elektricheskogo polya [Electric field sensor] // *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy. Instruments for Scientific Research*. 1971. No. 6. P. 141–142. (In Russ.).
4. Gatman S. Dvoynoy izmeritel' elektricheskogo polya s zashchitoy [Double electric field meter with protection] // *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy. Instruments for Scientific Research*. 1968. No. 1. P. 45–49. (In Russ.).
5. Yurkevich V. M., Kondratyev 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. Measurement Techniques*. 1980. No. 5. P. 57–59. (In Russ.).
6. Chugunov S. A., Yurkevich V. M. Rasshireniye zony izmereniya parametrov elektricheskogo polya pri primenenii zondovogo metoda [Expanding the area for measuring electric field parameters when using the probe method] // *Izmeritel'naya tekhnika. Measurement Techniques*. 1981. No. 1. P. 33–35. (In Russ.).
7. Kondrat'yev B. L., Yurkevich V. M. Izmereniya v elektricheskom pole s vyravnivaniyem potentsialov [Electric field measurements with potential equalization] // *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta. Proceedings Moscow Energy Institute*. Moscow, 1979. Vol. 432. P. 20–22. (In Russ.).
8. 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. Ekspress-*

информация. *Electric Power Stations Networks and Systems. Express Information*. 1977. No. 19. P. 10–26. (In Russ.).

9. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 // *Rev. Gen. Elec.* 1988. No. 7. P. 27–38. (In Engl.).

10. 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)* / Ed. by V. N. Azarova. Moscow, 2002. P. 25–26. (In Russ.).

11. Biryukov S. V. Metody izmereniya napryazhennosti neodnorodnykh elektricheskikh poley vblizi istochnikov polya trekhkoordinatnymi datchikami [Methods for measuring the strength of non-uniform electric fields near field sources using three-coordinate sensors] // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. Russian Electromechanics*. 2003. No. 4. P. 22–25. EDN: HTUFYJ. (In Russ.).

12. 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.).

13. Eggert S., Goltz S. NFM-1 ein aperiodisches Nahfeld – Stärkemessgerät für Messungen an Hochfrequenzarbeitsplätze [NFM-1 an aperiodic near field strength meter for measurements at high frequency locations] // *Radio Fernsehen Elektronik. Radio Television Electronics*. 1976. Vol. 25, no. 15. P. 488–490. (In Germ.).

14. Sukmanov V. I., Safonov V. I., Ilin A. N. [et al.]. Pribor dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya [Electric field strength measuring device] // *Elektricheskie stantsii. Electric Stations*. 1987. No. 6. P. 69–71. (In Russ.).

15. Patent 2743617 C1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya povyshennoy tochnosti [Method of highest accuracy for electric field measuring] / Biryukov S. V., Glukhoverya E. G. No. 2020118083. (In Russ.).

16. Patent 2773868 U1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/08. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya sdvoyennym datchikom [Method for measuring the electric field strength with a dual sensor] / Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120230. (In Russ.).

17. Tyukina L. V., Biryukov S. V., Tyukin A. V. Novyy podkhod k primeneniyu metoda izmereniy napryazhennosti elektricheskogo polya po srednemu znacheniyu [A new approach to application of the method of measuring electric field strength by average value] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 3 (183). P. 122–127. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-122-127. EDN: GRAKRH. (In Russ.).

18. Patent 210806 U1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sdvoyenny 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.).

19. Glukhoverya E. G. Datchiki napryazhennosti elektricheskogo polya na novykh fizicheskikh effektakh i yavleniyakh [Electric field strength sensors based on new physical effects and phenomena] // *Aktualnyye problemmy sovremennoy nauki. Current Problems of Modern Science*. Omsk, 2020. P. 47–50. (In Russ.).

20. Shchiglovskiy K. B., Aksel'rod V. S. Pribory dlya izmereniya parametrov elektrostatischeeskogo polya i ikh kalibrovka [Instruments for measuring electrostatic field parameters and their calibration] // *Izmeritel'naya tekhnika. Measurement Techniques*. 1978. No. 5. P. 63–65. (In Russ.).

21. Misakian M., Kotter F. R., Kahler R. L. Miniature ELF Electric Field Probe // *Instruments for Scientific Research*. 1978. Vol. 49, no. 7. P. 933–935. DOI: 10.1063/1.1135497. (In Engl.).

22. Shkarin Yu. P. Vliyaniye elektroustanovok vysokogo napryazheniya na okruzhayushchuyu sredu [Impact of high voltage electrical installations on the environment]. Moscow, 1988. 104 p. ISBN 5-283-02447-4. (In Russ.).

23. Patent 2776097 S1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya s ispol'zovaniyem datchika sdvoyennogo tipa [Method for measuring the electric field intensity using a dual-type sensor] / Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120706. (In Russ.).

24. Patent 2774654 C1 Russian Federation, IPC G 01 R 29/12. Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya datchikom sdvoyennogo tipa [Method for measuring the electric field strength by a dual-type sensor] / Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. No. 2021120704. (In Russ.).

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

TYUKIN Alexander Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Physics and Mathematics Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk.

SPIN-code: 4516-7742

ORCID: 0000-0002-7316-3797

AuthorID (SCOPUS): 57203100232

TYUKINA Lyudmila Vladimirovna, Lecturer at the Omsk Industrial and Economic College, Omsk.

For citations

Biryukov S. V., Tyukin A. V., Tyukina L. V. Development of a new method for measuring the electric field strength based on a dual electro-induction sensor // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 99–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-99-106.

Received November 29, 2023.

© S. V. Biryukov, A. V. Tyukin,

L. V. Tyukina

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА ИХ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА—БРИЛЛЮЭНА

В этой работе представлены результаты исследований возможностей автоматизации обработки данных измерений, полученных от бриллюэновского оптического рефлектометра, световодов, содержащих различные виды одномодовых оптических волокон. Анализируя параметры рассеяния Мандельштама—Бриллюэна, полученных из данных бриллюэновских рефлектограмм, возможно осуществлять классификацию оптических волокон в исследуемых оптических кабелях телекоммуникационных систем, а также оценивать изменение бриллюэновского частотного сдвига и определять степень продольного натяжения оптических волокон. Начальные значения бриллюэновского частотного сдвига и спектр рассеяния Мандельштама—Бриллюэна для каждой разновидности оптических волокон отличаются. Представлены разработанные программы для автоматизированной обработки бриллюэновских рефлектограмм. С помощью анализа уровня обратно отражённого сигнала можно выделить фактор, оказавший преимущественное влияние на параметры сигнала рассеяния Мандельштама—Бриллюэна в исследуемых участках оптических волокон, и компенсировать влияние температурных изменений в графиках распределения продольного натяжения. Это позволяет построить график распределения продольного натяжения вдоль световода, вызванного именно механическими воздействиями на оптические волокна. Сделаны выводы о точности оценок, полученных по различным алгоритмам, на основании накопленного опыта по работе с представленными программами.

Ключевые слова: оптическое волокно, натяжение волокон, бриллюэновская рефлектометрия, спектр рассеяния Мандельштама—Бриллюэна, профиль бриллюэновского спектра.

Для выявления участков оптических волокон (ОВ) с изменённым натяжением и температурой в оптических кабелях (ОК) применяются бриллюэновские рефлектометры (БОИР — бриллюэновский оптический импульсный рефлектометр) [1–6]. В основу работы БОИР положен анализ характеристик рассеяния Мандельштама—Бриллюэна (РМБ) [5–8].

В настоящее время для различных назначений разработано множество разновидностей ОВ [1, 8–11]. За последние годы изменился состав поставщиков материалов, применяемых для производства ОВ и изготовления ОК на территории России [1, 9].

Оценка оптических характеристик ОВ в проложенных ОК, а также классификация разновидностей ОВ в ОК (в том числе ОВ, схожих типов, но разных производителей) являются актуальными задачами [8–12].

Для их решения целесообразно получить и проанализировать бриллюэновские рефлектограммы. С помощью графиков, полученных с использованием БОИР, можно классифицировать тип ОВ в проложенном ОК, поскольку даже волокна одной разновидности, но разных производителей имеют заметные различия в частотных характеристиках РМБ [8–11].

В структуре современных ОВ может существовать несколько слоёв, оптические и акустические свойства которых различны, что оказывает влияние на формирование спектра РМБ (СРМБ) [9–11].

Для изучения параметров РМБ (СРМБ и вычисления частоты главного максимума СРМБ — бриллюэновского сдвига частоты — БЧС) для всех тестируемых разновидностей ОВ требуются данные из рефлектограмм БОИР [9, 12–14]. Имея набор параметров РМБ (профилей СРМБ) различных видов ОВ, можно классифицировать ОВ в ОК, а так-

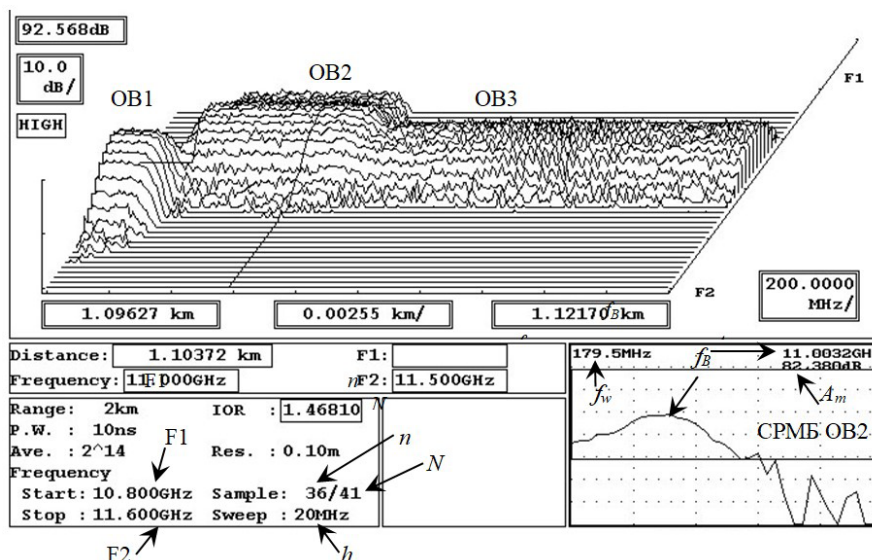


Рис. 1. Пример исходной бриллюэновской рефлектограммы световода

же ускорить выявление потенциально ненадёжных участков ОВ ВОЛС за счёт автоматизирования процесса [13–16].

На рис. 1 представлена рефлектограмма БОИР (распределение СРМБ по длине световода, полученное после обработки результатов измерений в БОИР "Ando AQ 8603"). Световод состоит из ОВ нормализующей катушки (ОВ1 (рекомендация МСЭ–Т G.652) — длина примерно 1 км) и из двух видов ОВ со смещенной длиной волны отсечки (рекомендация МСЭ–Т G.654 — ОВ со смещенной длиной волны отсечки, равной 1530 нм [1, 9]): ОВ2 — ОВ–G.654E "Fujikura" и ОВ3 — ОВ–G.654 "Corning".

В правом нижнем углу показан профиль СРМБ в выбранном поперечном сечении световода (на расстоянии 1103,72 м, где участок световода состоит из ОВ2 — ОВ–G.654E "Fujikura"). Там же указаны БЧС ($f_B = 11,0032$ ГГц), ширина полосы СРМБ ($f_w = 179,5$ МГц) и уровень обратно отражённого сигнала в максимуме ($A_m = A(f_B) = 82,380$ дБ).

В левом нижнем углу приведены данные о предельной дистанции измерений (2 км), показателе преломления (1,46810), длительности зондирующего импульса (10 нс), о количестве усреднений (2^{14}), о представляемом после обработки разрешении по длине световода (0,1 м), а также данные частотных характеристик сканирования (F_1 , F_2 , n , N и h), которые требуются для получения значений в точках сетки по оси частот [13–16].

Для формирования рефлектограммы БОИР (получение СРМБ, а после этого вычисление БЧС и продольного натяжения) проводится частотное сканирование, которое в данном случае начинается с частоты F_1 (для примера на рис. 1 $F_1 = 10,8$ ГГц = $=f_1$) с шагом h ($h = 20$ МГц).

Конечная частота F_2 ($F_2 = 11,6$ ГГц на рис. 1) достигается только при прохождении процесса сканирования по всем точкам сетки частот ($n = N = 41$). Поскольку процесс сканирования при работе БОИР можно останавливать на любом шаге n (на рис. 1 $n = 36$), то частота завершения сканирования в этом случае равна:

$$f_2 = f_1 + h(n - 1). \quad (1)$$

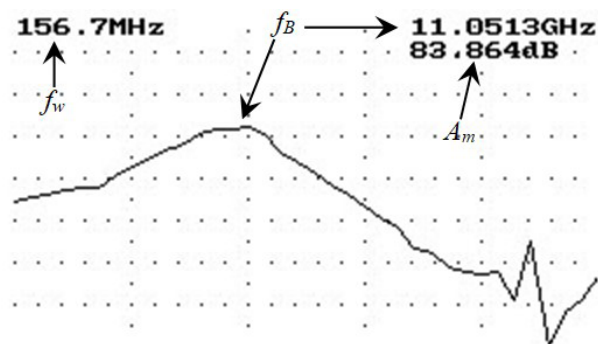


Рис. 2. СРМБ ОВ–G.654E «Corning» (OB3)

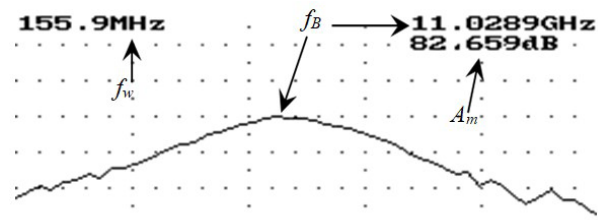


Рис. 3. СРМБ ОВ–G.654E «Саранск»

Например, для рефлектограммы на рис. 1 $f_2 = 11,5$ ГГц.

Наибольшее значение уровня обратно отражённого сигнала (A_m) будет наблюдаться на частоте, равной БЧС (f_B).

На рис. 2 приведён пример профиля СРМБ, взятый при том же измерении на другом участке того же световода. Но на этом участке (OB3) использовано ОВ другого производителя ("Corning"), хотя и той же разновидности (ОВ–G.654). При этом БЧС равен 11,0513 ГГц.

На рис. 3 представлен профиль СРМБ для аналогичной разновидности G.654E ОАО "Волоконно-оптические системы" (Саранск) при нормальных условиях [1]. БЧС в этом случае равен 11,0289 ГГц.

Сравнивая профили СРМБ, представленные на рис. 1–3, можно заметить их отличия, которые можно использовать для выявления типов ОВ.

Проанализируем алгоритмы, используемые для определения типа ОБ при наличии образцов бриллиантовых рефлектограмм (шаблонов) ранее изученных ОБ. Ранее в работах [8, 9, 14–16] уже были рассмотрены некоторые алгоритмы, которые на основе корреляционной оценки совпадения загруженного изображения СРМБ с шаблонами из базы рефлектограмм, в том числе по критерию г-Пирсона.

Данные загруженного графика заносятся в одномерный массив, после чего происходит сравнение его с уже заранее загруженными в программу шаблонами графиков; для определения типа рефлектограмм используются специальные алгоритмы.

Корреляционная оценка загруженного изображения по сравнению с шаблонами производится по следующему алгоритму:

1. Находится сумма всех координат по оси «у».
2. Находится среднее значение координат.
3. Значение каждого элемента массива изменяется на полученную в пункте 2 величину в меньшую сторону. В итоге получается, что среднее значение нового массива равно нулю («центрирование»).

4. Если по модулю математическое ожидание появления очередной координаты получается разным для каждого шаблона, то производится корректировка вычислений по отношению $\{M_g\}/\{M_0\}$, где $\{M_g\}$ — математическое ожидание, взятое по модулю у образца исследуемой рефлектограммы, а $\{M_0\}$ — математическое ожидание, взятое по модулю у каждого из остальных образцов-шаблонов.

1. Корреляционная оценка рассчитывается по следующей формуле:

$$K_r = \sum_{i=1}^N (k_0 \cdot k_g), \quad (2)$$

где K_r — корреляционная оценка, k_0 — координата «образца» (шаблона), k_g — координата из загруженного графика [14–16].

Суммирование в (2) происходит по всему массиву координат графика.

Анализ показал [1, 9], что с учётом специфики процесса обработки данных результатов измерений в БОИР (бриллиантовых рефлектограмм), корреляционную оценку (K_r) по критерию г-Пирсона удобно переписать в следующей форме:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - A_A)(A_i^1 - A_A^1)}{\sum_{i=1}^N \sqrt{(A_i - A_A)^2} \sum_{i=1}^N \sqrt{(A_i^1 - A_A^1)^2}}, \quad (3)$$

где A_i — значение ординат в i -м узле сетки частот (абсцисс) загруженного массива, A_A — среднее арифметическое значение ординат загруженного массива, A_i^1 — значение ординат в i -м узле сетки частот оцениваемого шаблона, A_A^1 — среднее арифметическое значение ординат оцениваемого шаблона, N — количество координат диапазона частот для анализа [14–16].

Процесс вычисления K_r проводится для всех образцов из базы рефлектограмм ОБ, и в результате выбирается «образец» с максимальным значением K_r .

При совпадении частотных диапазонов (или после приведения в соответствие графиков по частоте) оценку совпадения рефлектограмм следует проводить по такой формуле:

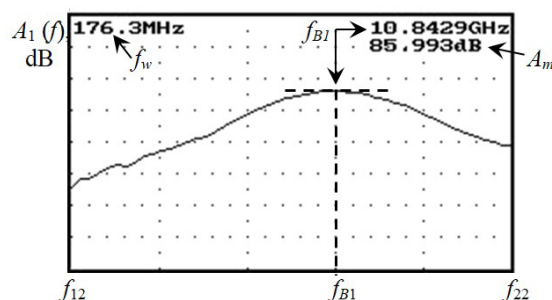
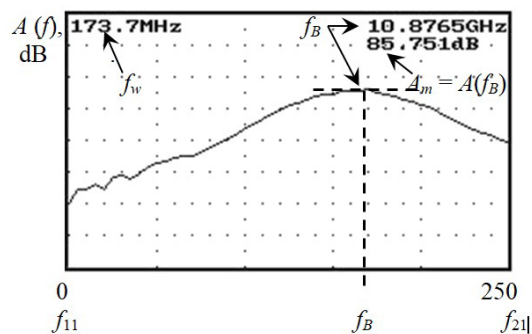


Рис. 4. Масштабирование профилей СРМБ исследуемого ОБ и шаблона

$$K_r = \sum_{i=1}^N (A_i - A_i^1)^2 \cdot k_i(A_i) / N, \quad (4)$$

где k_i — коэффициент «важности» i -го отсчёта.

«Образец» с минимальным значением K_r по формуле (4) будет считаться как шаблон, имеющий наилучшее совпадение [15].

Если данные по оси ординат (i -тое значение в массиве частот — f_i) отличаются от сетки ординат шаблона, то необходимо сделать интерполяцию по соседним значениям. Так как профиль СРМБ в области максимума имеет параболическую форму, то удобно применить интерполяцию второго порядка. Для сокращения вычислений при обработке массивов следующих шаблонов следует сохранять результаты дополнительных вычислений для исследуемого массива. (Это позволит избежать повторных вычислений, а также сделать возможные последующие интерполяции более точными.)

Так как значимость отсчётов (значений ординат) при удалении от максимального значения уменьшается, можно повысить эффективность оценок, выбрав значение k адаптивным (зависящим от величины уменьшения уровня по отношению к значению в максимуме). Например, принять в (4) $k = 0,97$ для значений A_i отличающихся от максимального на $-2... -4$ дБ, а для значений с уровнем $-4... -7$ дБ от уровня максимума — $k = 0,95$ — и т. п.

На рис. 4 приведён пример возможного «центрирования» сравниваемых профилей СРМБ и определения общего диапазона частот из бриллиантовых рефлектограмм для двух ОБ-G.652 разных производителей при нормальных условиях. По осям абсцисс отложены номера отсчётов.

$$f_{11} = 10,5 \text{ ГГц}, f_{21} = 11,0 \text{ ГГц}, f_{12} = 10,6 \text{ ГГц}, f_{22} = 11,1 \text{ ГГц}.$$

Для более точной классификации типа ОБ алгоритм оценки подобия следует усовершенствовать. При оценке степени совпадения рефлектограмм необходимо сделать единым масштаб графиков по осям абсцисс и ординат.

Перед сравнением исследуемых графиков СРМБ следует выделять совпадающую часть частотно-

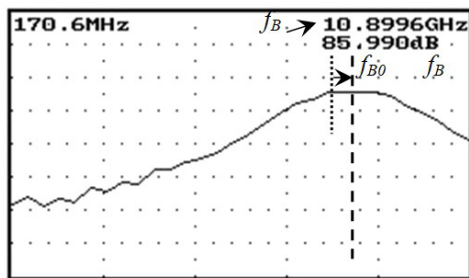


Рис. 5. Оценка изменения БЧС для нагретого OV-G.652

го диапазона (в примере, представленном на рис. 4, для анализа выделена полоса частот от 10,6 ГГц до 11,0 ГГц).

Так как натяжение и температура исследуемого ОВ могут отличаться от аналогичных характеристик «образцового» ОВ, то в этом случае возможна ошибочная классификация (будет выбран неправильный шаблон). В этом случае будет целесообразно перед сравнением массивов данных выровнять положение основных максимумов и привести оси в единый масштаб. Для этого потребуются пересчитать для шаблона масштаб и координаты по оси абсцисс. Также можно сдвинуть все точки по оси ординат на величину разности значений в максимумах, что приведёт к их одинаковым значениям.

Профиль СРМБ первого OV-G.652, рассмотренного выше, но нагретого до температуры $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлен на рис. 5. В этом случае $f_1 = 10,5\text{ ГГц}$, $f_2 = 11,1\text{ ГГц}$, $f_B = 10,9\text{ ГГц}$.

После анализа данных загруженного массива можно определить величину смещения БЧС (отличие f_B от f_{B0}) и изменение уровня сигнала обратного отражения в области максимума СРМБ [13]. Это позволяет определить изменения натяжения ОВ при воздействии различных внешних факторов [13].

Для обработки данных рефлектограмм БОИР, автоматизации вычислений и классификации факторов, вызвавших изменения БЧС и продольного натяжения, в Омском государственном техниче-

ском университете (ОмГТУ) были созданы программы [17, 18], работа которых кратко описана ниже.

Пример экрана программы, используемой для классификации разновидности ОВ (ОВ – G.655 – NZDSF), представлен на рис. 6.

После запуска программы необходимо загрузить файл выходной рефлектограммы БОИР. На рис. 6 в левом верхнем углу показана загруженная мультирефлектограмма с указанием характерных участков и БЧС. В ней приведены зависимости натяжения, ширины СРМБ, уровня сигнала и профиль СРМБ. (Может использоваться любая другая разновидность рефлектограмм БОИР, которая содержит характеристики СРМБ.) После этого запускается процесс выделения данных, соответствующих графику СРМБ. Этот график СРМБ выводится справа от изображения мультирефлектограммы (рис. 6), а после него следует график нормированного массива, который будет сравниваться с базой шаблонов.

После проведённого анализа (в данном примере — на основе формулы (3)) «образец» (шаблон), который по итоговым оценкам получил наилучшую оценку совпадения с анализируемым изображением (максимальное значение оценки по формуле (3)), подсвечивается программой зелёным цветом (на рис. 6 отмечен стрелкой, как и исходный график СРМБ). «Образцы» с меньшей (но близкой) степенью подобия подсвечиваются жёлтым цветом (приведены на рис. 6 ниже рассмотренных выше изображений) [17].

В последующих версиях программы были добавлены функции определения натяжения ОВ и дополнительные корректирующие действия [16, 18].

Пример экрана программы после завершения процесса выделения профиля СРМБ из файла рефлектограммы, классификации типа (в этом примере — ОВ "LEAF", нагретое до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$) и вычисления значений изменения БЧС (в МГц) и продольного натяжения (в %) показан на рис. 7. На первом этапе программа автоматически определяет данные о частотном диапазоне, максимальной амплитуде и т. п. Пользователь может получить доступ к гра-

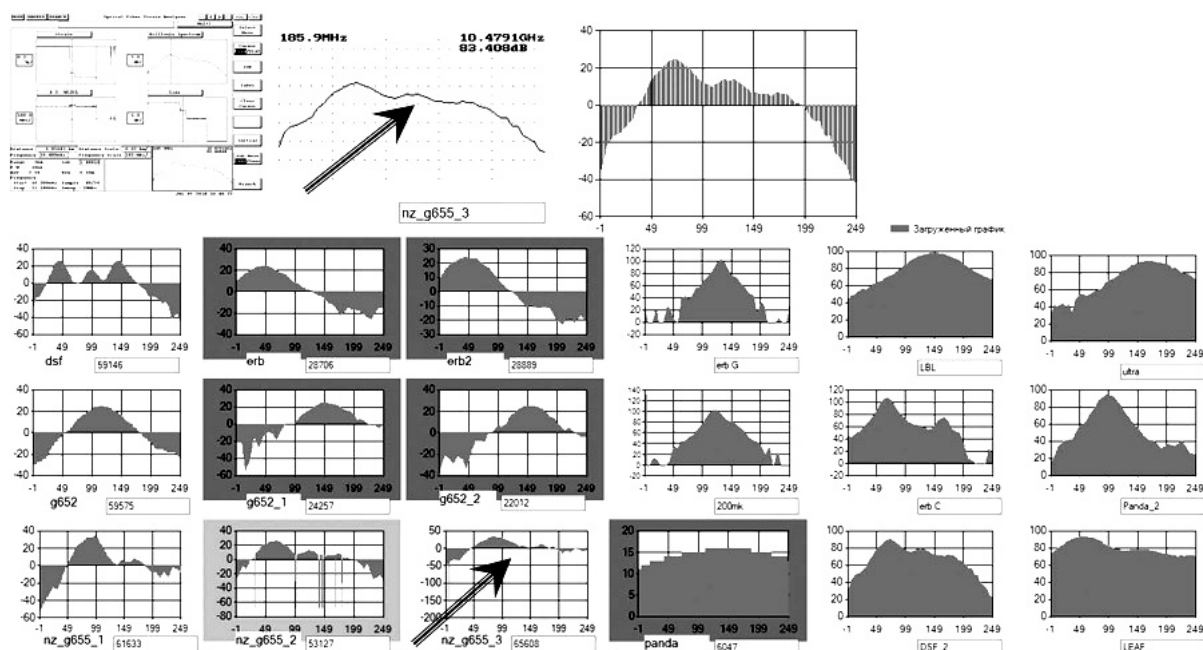


Рис. 6. Скриншот экрана программы при классификации типа ОВ

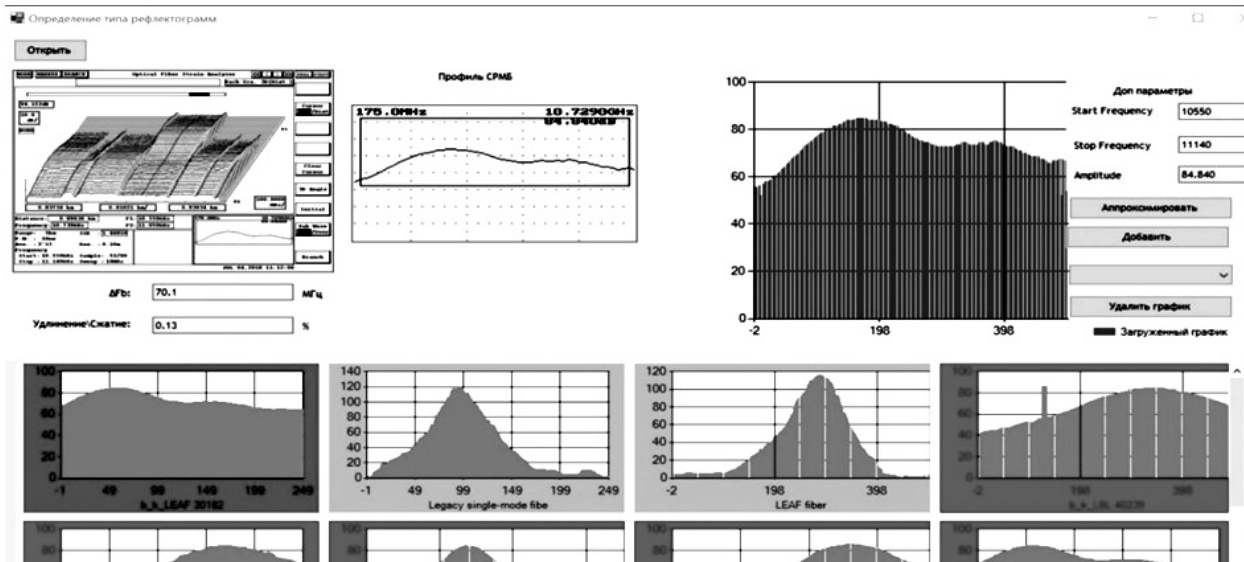


Рис. 7. Выявление разновидности ОВ, БЧС и уровня натяжения

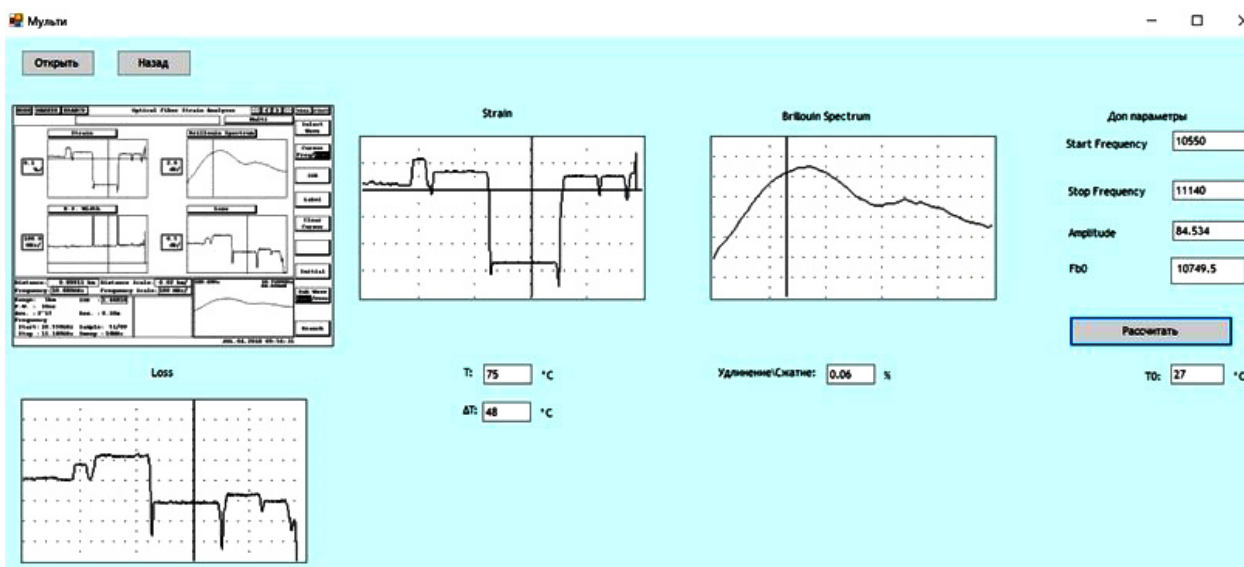


Рис. 8. Пример вычисления параметров ОВ

фическим изображениям всех «образцов» из базы рефлектограмм.

В усовершенствованной версии программы [18] после определения SRMB определяются также параметры РМБ и оценивается величина продольного натяжения вдоль ОВ.

При анализе мультирефлектограмм БОИР можно выявлять участки с изменённой температурой и проводить коррекцию значений БЧС и продольного натяжения на основе выделения и компенсации изменений, которые были обусловлены только температурными воздействиями. В результате вычисляется величина продольного натяжения ОВ, которое было вызвано продольными силовыми нагрузками.

Пример работы программы в таком режиме («Мульти») представлен на рис. 8.

Кроме определения БЧС (и его возможного изменения относительно начального значения), рассчитывается величина натяжения ОВ, а также находится температура анализируемого ОВ и её изменения (« ΔT ») относительно начальной (« T_0 »).

По рефлектограмме уровня обратного сигнала («Loss») с помощью алгоритма, подробно описан-

ного в [13, 18], можно определить изменение БЧС, которое вызвано исключительно температурными воздействиями.

На рис. 9 приведена копия экрана при расчете БЧС, температуры и натяжения, на котором в правом нижнем углу отображается график изменений БЧС из-за температурных воздействий.

После нажатия кнопки «Компенсировать» в правом нижнем углу экрана будет сделана соответствующая компенсация изменений степени продольного натяжения из-за изменений температуры [18].

Для сравнения результатов оценок подобию, полученных различными способами, была разработана специальная разновидность представленных программ, в которой все полученные оценки были сведены вместе в единые результирующие таблицы (рис. 10).

В левом нижнем углу (область «1») представлена таблица корреляции между данными с каждого шаблона из БД и исходным изображением в соответствии с выбранной формулой и режимом. Данные в таблице отсортированы в порядке убывания для оценок по первым двум способам или для третьего способа (формула (3)) — в порядке возрастания.

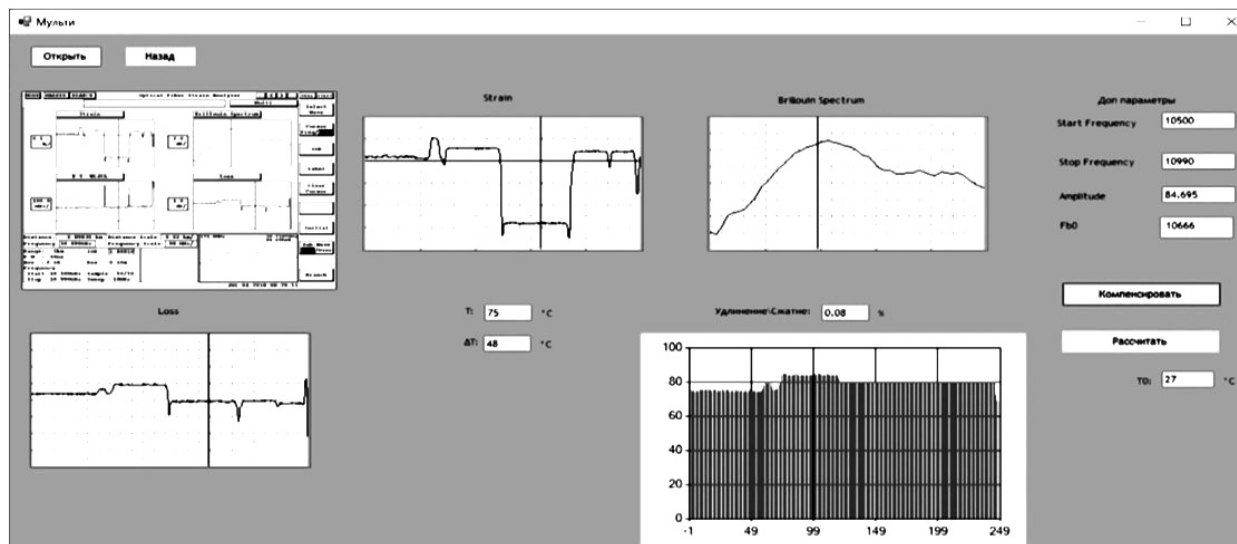


Рис. 9. Пример экрана работающей программы после компенсации изменений степени натяжения из-за повышения температуры

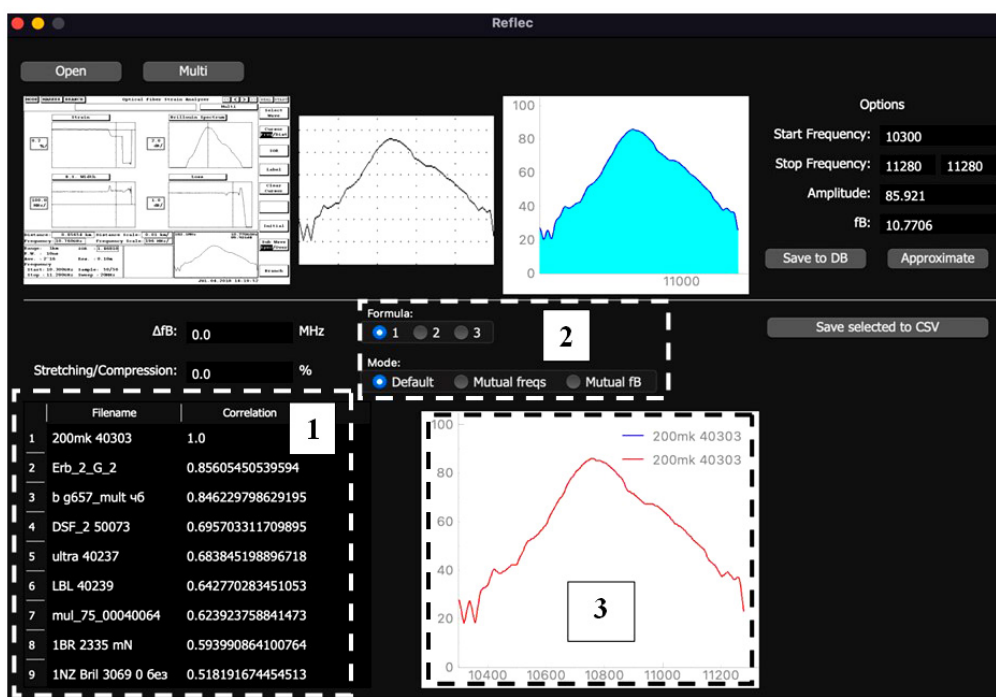


Рис. 10. Скриншот сравнения оценок данных БОИР, полученных различными вариантами

Режимы располагаются в разделе "Mode" (область «2»):

1. "Default" — не производится никаких изменений, в выбранную формулу передаются все значения координат по порядку с каждого из изображений.

2. "Mutual freqs" — выбирается общий диапазон частот с обоих изображений (а также производится линейная интерполяция). Это необходимо для того, чтобы получить значения координат шаблона из базы данных по тем же значениям частот, что и в исходном изображении. Далее эти значения координат — из исходного изображения и интерполированное с шаблона из БД передаются в выбранную формулу.

3. "Mutual fB" — производится тот же самый процесс, что и в режиме "Mutual freqs", за исключением того, что перед передачей данных в формулу производится «выравнивание» положений макси-

мумов и «отсечение» лишних координат, не имеющих соответствия.

Значение « ΔfB » вычисляется как разность модуля БЧС (fB) исходного изображения и БЧС шаблона, имеющего наилучшее значение корреляционной оценки в соответствии с выбранным режимом и формулой. Значение "Stretching/Compression" вычисляется как модуль отношения БЧС исходного изображения к БЧС шаблона, имеющего наилучшее значение корреляции, с переводом в проценты.

По нажатию на любую строку таблицы рядом на одной плоскости отображаются два графика — с исходного изображения и с выбранного шаблона (область «3»). При отображении учитывается выбранный режим в разделе "Mode". (Для "Mutual freqs" — используется общий диапазон частот, для "Mutual fB" — дополнительно выравниваются максимумы). Примеры представлены на рис. 11.

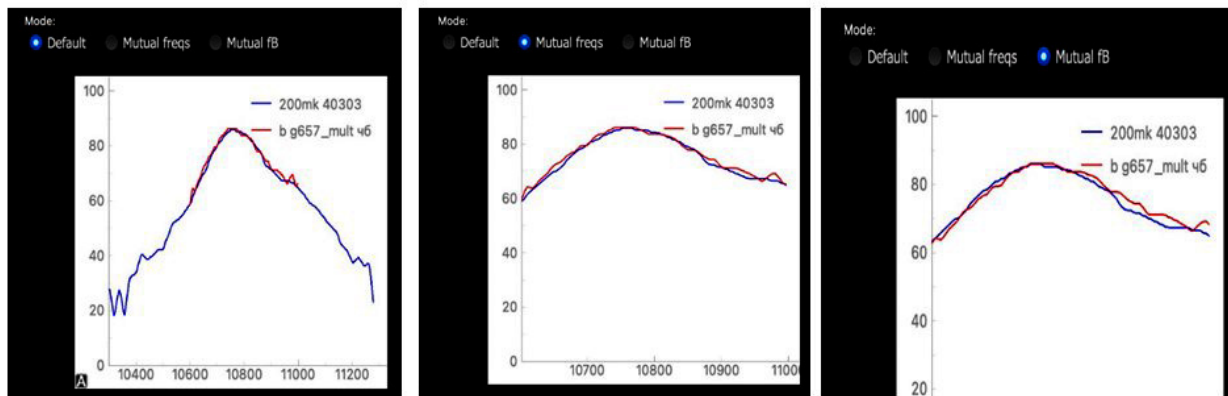


Рис. 11. Скриншот оценок подобию, полученных различными вариантами

Анализ показал, что первый (2) и третий (4) из рассмотренных алгоритмов дают схожие оценки.

Одной из проблем, которая была выявлена в результате анализа большого количества экспериментальных рефлектограмм БОИР, является классификация ОВ для разновидностей с единственным «пиком», имеющих близкие значения БЧС. Так как сдвиги СРМБ могут быть вызваны механическими и температурными воздействиями, это может вызывать ошибки классификации в таких случаях. Для повышения точности оценок степени подобию графиков СРМБ следует перед вычислениями совместить эти графики в области максимумов. При оценке степени подобию графиков СРМБ ОВ с единственным «пиком», имеющих близкие значения БЧС, меньшее количество ошибок классификации обнаружилось при оценках по второму алгоритму (3). Коррекция коэффициентов важности в (4) позволяет улучшить точность третьего алгоритма.

Выводы. Таким образом, представленные программы позволяют по рефлектограммам БОИР классифицировать ОВ, рассчитать характеристики БЧС и степени продольного натяжения, а также выявить фактор воздействия на ОВ и компенсировать влияние температурных воздействий.

Различия в частотных зависимостях РМБ позволяют выявлять тип ОВ.

Дальнейшее совершенствование программ автоматизированной обработки рефлектограмм БОИР связано с проведением дополнительных оценок, связанных с совмещением исследуемых графиков по положениям максимумов СРМБ.

Библиографический список

1. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Determination of the Mandelstam–Brillouin scatter frequency characteristic in optical fibers of various types // *Journal of Physics*. 2022. Vol. 2182. P. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012089.
2. Андреев В., Бурдин В., Нижгородов А. Сценарии прогноза срока службы оптического волокна в КЛС // *Первая мила*. 2020. № 4. С. 34–43. DOI: 10.22184/2070-8963.2020.89.4.34.43.
3. Belokrylov M. E., Claude D., Konstantinov Y. A. [et al.]. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh back-scattered radiation registered by a frequency domain optical reflectometer using two-stage erbium amplification // *Instrum Exp Tech*. 2023. Vol. 66. P. 761–768. DOI: 10.1134/S0020441223050172.
4. Шувалов В. П., Зеленцов Б. П., Квиткова И. Г. Модель надёжности волоконно-оптической линии связи при недопустимом прогнозирующем контроле // *Вестник СибГУТИ*. 2020. № 4. С. 66–77. EDN: JICJMJ.
5. Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. [et al.]. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-Art review and perspective // *Sensors* 2022. Vol. 22, № 1033. DOI: 10.3390/s22031033.
6. Barkov F. L., Konstantinov Y. A., Krivosheev A. I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry // *Fibers*. 2020. Vol. 8, № 9. P. 1–11. DOI: 10.3390/FIB8090060.
7. Krivosheev A. I., Barkov F. L., Konstantinov Y. A. [et al.]. State-of-the-Art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing // *Instruments and Experimental Techniques*. 2022. Vol. 65 (5). P. 687–710. DOI: 10.1134/S0020441222050268.
8. Bogachkov I. V. Research of the features of Mandelstam–Brillouin backscattering in optical fibers of various types // *T-comm*. 2019. Vol. 13, № 1. P. 60–65. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10216. EDN: YWFXSX.
9. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах различных видов // *Приборы и техника эксперимента*, 2023. № 5. С. 70–77. DOI: 10.31857/S0032816223050063.
10. Ruffin A. B., Li M.-J., Chen X. [et al.]. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30 (23). P. 3123–3125. DOI: 10.1364/OL.30.003123
11. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S. [et al.]. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 2004. Vol. 22 (2). P. 631–639. DOI: 10.1109/JLT.2003.822007.
12. Krivosheev A. I., Konstantinov Y. A., Barkov F. L. [et al.]. Comparative analysis of the Brillouin frequency shift determining accuracy in extremely noised spectra by various correlation methods // *Instruments and Experimental Techniques*. 2021. Vol. 64 (5). P. 715–719. DOI: 10.1134/S0020441221050067.
13. Bogachkov I. V. Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012038.
14. Bogachkov I. V. Automated determination of types and characteristics of the optical fibers state located in the laid cables // *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1546. P. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012044.
15. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. The basics of automated processing of optical fiber reflectograms for evaluating characteristics of the Mandelstam–Brillouin backscatter // *Conference: 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166114.
16. Bogachkov I. V. Principles of automated data processing of Mandelstam–Brillouin backscatter characteristics for evaluating the state of optical fibers // *T-comm*. 2020. Vol. 14, № 8. P. 47–52. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-8-47-52.

17. Программа для классификации разновидностей оптических волокон по бриллюэновским рефлектограммам: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610752 / Богачков И. В. № 2018662391; заявл. 07.11.2018.; опубл. 18.01.2019.

18. Программа для выявления типа воздействия на оптические волокна и определения их натяжения: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667360 / Богачков И. В. № 2019666447/69; заявл. 13.12.2019; опубл. 23.12.2019.

БОГАЧКОВ Игорь Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7115-6052
AuthorID (РИНЦ) 276415
ORCID: 0000-0002-7019-1784
AuthorID (SCOPUS) 3699775670
ResearcherID: A-7770-2015
Адрес для переписки: bogachkov@mail.ru

Для цитирования

Богачков И. В. Определение разновидностей оптических волокон и ранняя диагностика их физического состояния на основе анализа характеристик рассеяния Манделъштама–Бриллюэна // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 107–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-107-116.

Статья поступила в редакцию 11.12.2023 г.

© И. В. Богачков

DETERMINATION OF OPTICAL FIBER VARIETIES AND EARLY DIAGNOSIS OF THEIR PHYSICAL CONDITION BASED ON THE ANALYSIS OF MANDELSTAM — BRILLOUIN BACKSCATTER PARAMETERS

Research results into the automating the processing of measurement data obtained from the Brillouin optical reflectometer, light guides containing various types of optical fibers are presented in this paper. By analyzing the parameters of the Mandelstam — Brillouin scatter obtained from Brillouin reflectograms, we can classify optical fibers in the studied telecommunication optical cables. This makes it possible to evaluate the change of the Brillouin frequency shift and determine the longitudinal fiber tension. The initial values of the Brillouin frequency shift and the profile of the Mandelstam — Brillouin scatter spectrum are different for each fiber type. The programs for automated processing of Brillouin reflectogram data are discussed. Estimation of the level of the back-reflected signal allows you to identify the factor, that had a predominant effect on the parameters of the Mandelstam — Brillouin scatter signal in the studied sections of optical fibers, and to compensate for the influence of temperature changes in the longitudinal strain distribution graphs. After that, we can plot a graph of the distribution of longitudinal strain along the fiber, caused precisely by mechanical influences on optical fibers. Conclusions about the accuracy of the estimates obtained by various algorithms, based on the accumulated experience in working with the presented programs are drawn.

Keywords: optical fiber, fiber strain, Brillouin reflectometry, Mandelstam — Brillouin backscatter spectrum, Brillouin spectrum profile.

References

1. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Determination of the Mandelstam — Brillouin scatter frequency characteristic in optical fibers of various types // *Journal of Physics*. 2022. Vol. 2182. P. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012089. (In Engl.).
2. Andreev V., Burdin V., Nizhgorodov A. Stsenarii prognoza sroka sluzhby opticheskogo volokna v KLS [Scenarios of prediction optical fiber lifetime in cable lines] // *Pervaya milya. Last Mile*. 2020. No. 4. P. 34–43. DOI: 10.22184/2070-8963.2020.89.4.34.43. (In Russ.).
3. Belokrylov M. E., Claude D., Konstantinov Y. A. [et al.]. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh back-scattered radiation registered by a frequency domain optical reflectometer using two-stage erbium amplification // *Instrum Exp Tech*. 2023. Vol. 66. P. 761–768. DOI: 10.1134/S0020441223050172. (In Engl.).
4. Shuvalov V. P., Zelentsov B. P., Kvitkova I. G. Model' nadezhnosti volokonno-opticheskoy linii svyazi pri nedostovernom prognoziryuyushchem kontrole [Reliability model of a fiber-optic communication line with unreliable predictive control] // *Bulletin of SibGUTI. The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2020. No. 4. P. 66–77. EDN: JICCJM. (In Russ.).
5. Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. [et al.]. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-Art review and perspective // *Sensors* 2022. Vol. 22, no. 1033. DOI: 10.3390/s22031033. (In Engl.).
6. Barkov F. L., Konstantinov Y. A., Krivosheev A. I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry // *Fibers*. 2020. Vol. 8, no. 9. P. 1–11. DOI: 10.3390/FIB8090060. (In Engl.).
7. Krivosheev A. I., Barkov F. L., Konstantinov Y. A. [et al.]. State-of-the-Art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing // *Instruments and Experimental Techniques*. 2022. Vol. 65 (5). P. 687–710. DOI: 10.1134/S0020441222050268. (In Engl.).
8. Bogachkov I. V. Research of the features of Mandelstam — Brillouin backscattering in optical fibers of various types // *T-comm*. 2019. Vol. 13, no. 1. P. 60–65. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10216. EDN: YWFXSX. (In Engl.).
9. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Eksperimental'nyye issledovaniya kharakteristik rasseyaniya Mandel'shtama — Brillouina v odnomodovykh opticheskikh voloknakh razlichnykh vidov [Experimental investigations into characteristics of Mandelstam — Brillouin scattering in single-mode optical fiber of various types] // *Pribory i tekhnika eksperimenta. Instruments and Experimental Techniques*. 2023. Vol. 66, no. 5. P. 775–781. DOI: 10.1134/S0020441223050068. (In Russ.).
10. Ruffin A. B., Li M.-J., Chen X. [et al.]. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30 (23). P. 3123–3125. DOI: 10.1364/OL.30.003123. (In Engl.).
11. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S. [et al.]. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 2004. Vol. 22 (2). P. 631–639. DOI: 10.1109/JLT.2003.822007. (In Engl.).

12. Krivosheev A. I., Konstantinov Y. A., Barkov F. L. [et al.]. Comparative analysis of the Brillouin frequency shift determining accuracy in extremely noised spectra by various correlation methods // *Instruments and Experimental Techniques*. 2021. Vol. 64 (5). P. 715–719. DOI: 10.1134/S0020441221050067. (In Engl.).
13. Bogachkov I. V. Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012038. (In Engl.).
14. Bogachkov I. V. Automated determination of types and characteristics of the optical fibers state located in the laid cables // *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1546. P. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012044. (In Engl.).
15. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. The basics of automated processing of optical fiber reflectograms for evaluating characteristics of the Mandelstam — Brillouin backscatter // *Conference: 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166114. (In Engl.).
16. Bogachkov I. V. Principles of automated data processing of Mandelstam — Brillouin backscatter characteristics for evaluating the state of optical fibers // *T-comm*. 2020. Vol. 14, no. 8. P. 47–52. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-8-47-52. (In Engl.).
17. Programma dlya klassifikatsii raznovidnostey opticheskikh volokon po brilluenovskim reflektogrammam: cvidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019610752 [A program for classifying varieties of optical fibers according to Brillouin reflectograms: Certificate of the state computer program registration № 2019610752] / Bogachkov I. V. No. 2018662391; filed 07.11.2018; published 18.01.2019. (In Russ.).
18. Programma dlya vyyavleniya tipa vozdeystviya na opticheskiye volokna i opredeleniya ikh natyazheniya: cvidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019667360 [A program for identifying the type of impact on optical fibers and determining their tension: Certificate of the state computer program registration No. 2019667360] / Bogachkov I. V. No. 2019666447/69; filed 13.12.2019; published 23.12.2019. (In Russ.).

BOGACHKOV Igor Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Communications and Information Security Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7115-6052

AuthorID (RSCI): 276415

ORCID: 0000-0002-7019-1784

AuthorID (SCOPUS) 3699775670

ResearcherID: A-7770-2015

Correspondence address: bogachkov@mail.ru

For citations

Bogachkov I. V. Determination of optical fiber varieties and early diagnosis of their physical condition based on the analysis of Mandelstam — Brillouin backscatter parameters // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 107–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-107-116.

Received December 11, 2023.

© I. V. Bogachkov

ЕДИНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ. ЧАСТЬ II. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ

Единой системой отсчета геометрических характеристик детали является декартова прямоугольная система координат, которую материализуют комплекты конструкторских баз, ограничивающих деталь шести степеней свободы: три линейных и три угловых. В стандартах ISO на допуски геометрических характеристик системы координат не применяются. В связи с эти актуальны исследования в области повышения точности деталей за счет введения линейных и угловых координат элементов деталей.

В работе представлена вторая часть статьи «Единая система отсчета геометрических характеристик размерных элементов деталей», которая посвящена рассмотрению геометрических характеристик цилиндрических элементов деталей. Показано, что базами цилиндрических элементов являются оси цилиндров максимума материала, способные ограничивать четыре, две и одну степеней свободы детали в зависимости от функционального назначения элемента. Точность координирующих размеров следует задавать симметричными допусками на линейные и угловые координаты элементов.

Ключевые слова: геометрические характеристики, цилиндрические элементы деталей, системы координат детали, конструкторские базы, исполнительные элементы, информативность элементов, линейные и угловые координаты.

Введение. Геометрические характеристики являются самыми распространенными в машиностроении. Тем не менее в Международном словаре по метрологии VIM [1] не приводится определения основных терминов «геометрическая характеристика», «допуск величины», без которых невозможно узнать, с какой точностью следует измерять.

Геометрические характеристики деталей базируются на двух физических величинах — длина и угол, которые взаимосвязаны друг с другом, так же как неразделимы два движения объекта в пространстве — линейное поступательное и угловое вращательное, два вида степеней свободы элементов детали — линейные и угловые. Поэтому место угла — рядом с длиной, т.е. в основных физических величинах, а не в производных [2]. Несмотря на то, что:

— все системы автоматизированного проектирования работают в декартовой прямоугольной системе координат;

— конструирование деталей и сборочных единиц осуществляется в электронном виде с разработкой электронных 3d-моделей изделий [3] с обязательным изображением систем координат, материализуемых базами;

— в стандарте ASME [4] допускается применение систем координат при проектировании сложных изделий для простановки геометрических характеристик и нормирования их точности;

— в Российском национальном стандарте [5] установлено, что системы координат образуют комплекты баз деталей при проектировании конструкторской документации;

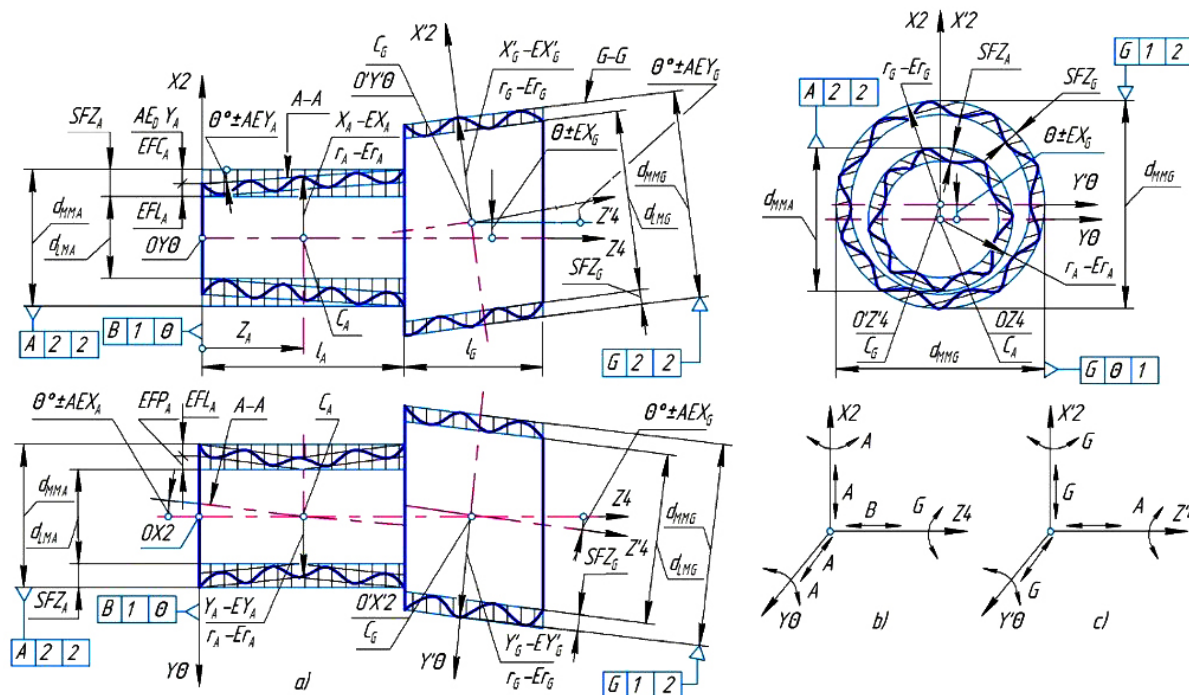
— в стандартах ISO [6–10] на геометрические характеристики изделия и новых изданиях справочников [11, 12] системы координат отсутствуют.

Тем не менее сегодня многосторонние исследования в области точности геометрических характеристик продолжаются [13–20] и не теряют своей актуальности.

Вторая часть статьи «Единая система отсчета геометрических характеристик размерных элементов деталей» [21] посвящена рассмотрению геометрических характеристик цилиндрических элементов деталей.

Геометрические характеристики цилиндрических элементов деталей. Деталь состоит из совокупности материальных элементов, каждый из которых ограничен одной или несколькими геометрическими поверхностями и предназначен для выполнения одной из функций детали.

Цилиндрические элементы ограничены одной цилиндрической поверхностью вращения заданного диаметра, являются симметричными, имеют ось симметрии, которая совпадает с осью вращения. Цилиндрические элементы образуют посадки в кинематических и неподвижных соединениях



а) -реальные адекватные $2d$ - модели элементов в трех проекциях; б) и в) - индикаторы информативности баз А4 и G4; C_A, C_G - центры средних сечений базовых размерных элементов А4 и G4; А-А, G-G - образующие цилиндрических поверхностей базовых размерных элементов А4 и G4; r_A, r_G - радиусы вращения образующих А-А, G-G в средних сечениях элементов относительно осей Z4 и Z'4; SFZ - суммарные отклонения расположения образующих А-А, G-G и формы поверхностей размерных элементов А4 и G4.

Рис. 1. Модели геометрических характеристик размерных цилиндрических элементов в функциях основной (А4) и вспомогательной (G4) конструкторских баз с информативностью $4inf$

в классах 0, 1, 2, 4 и 6 [21]. Максимальная информативность цилиндрических элементов составляет $4inf = 2t + 2r$, т.е. они могут ограничивать базирующую или присоединяемую деталь двух линейных и двух угловых степеней свободы.

Цилиндрические элементы в деталях выполняют функции основной конструкторской базы, вспомогательной конструкторской базы и исполнительного элемента с информативностью от четырех $4inf$ до нуля $0inf$ ограничений степеней свободы детали. Выполняемые функции и информативность элементов определяют состав их геометрических характеристик в декартовой прямоугольной системе координат: линейные и угловые координаты положения, отклонения формы и шероховатость поверхности, размеры диаметра.

В прямоугольной системе координат все геометрические характеристики детали и ее элементов нормируются в трех проекциях разной информативности $3inf, 2inf, 1inf$: фронтальной, горизонтальной и профильной, что соответствует плоскому $2d$ -проектированию.

Переход к пространственному $3d$ -проектированию также потребует нормирования геометрических характеристик в трех координатных плоскостях, что невозможно сделать на одном плоском $3d$ -изображении детали сложной конструкции.

Ограничение шести степеней свободы каждого элемента детали осуществляется дифференцированными координирующими размерами в пределах информативности элемента с помощью координат относительно осей обобщенной координатной системы детали в проекциях на три координатные

плоскости. При этом угловые координаты нормируются относительно осей координат с информативностью $4inf$ (две координаты) и $2inf$ (одна координата) на проекциях вокруг оси координат, которая проектируется в точку. Линейные координаты элемента — это координирующие размеры одной точки — центра базы элемента, если изменения координаты вызывает изменение положения элемента.

Рассмотрим геометрические характеристики цилиндрических элементов с информативностью $4inf$, выполняющих функции основной А4 и вспомогательной G4 баз, на $2d$ -модели детали, состоящей из этих двух элементов (рис. 1).

Цилиндрические поверхности элементов образуются прямыми А-А и G-G, номинально параллельными осям элементов А4 и G4, при их вращении вокруг осей. Образующие прямые удалены от осей вращения на размеры радиусов r_A и r_G , которые материализованы линейными координатами X_A-EX_A и $X'_G-EX'_G$, являются размерной основой диаметров элементов.

Образующие прямые — это отрезки прямых, которые в пространстве имеют информативность $4inf = 2t + 2r$.

Два линейных смещения прямых в радиальном и тангенциальном направлениях приводят к отклонениям радиусов r_A и r_G в средних сечениях элементов. Из двух угловых поворотов, один $\theta^\circ \pm AEY_A$ в радиальной плоскости OZ_4X_2 вызывает отклонения формы конусообразность поверхности, в линейном выражении $AE_D Y_A$, второй $\theta^\circ \pm AEX_A$ в тангенциальной плоскости OZ_4Y_θ приводит к отклонению формы седлообразность EFP_A . Вместе

с отклонением формы EFL_A образующей прямой А-А при ее вращении вокруг оси OZ_4 возникает суммарное отклонение формы SFZ_A цилиндричность. Аналогично формируется и цилиндричность SFZ_G вспомогательной базы G_4 .

Отклонения формы реальных цилиндрических поверхностей базовых элементов приводят к образованию двух размеров диаметра каждого элемента: диаметра максимума материала d_{MMA} и d_{MMG} и диаметра минимума материала d_{LMA} и d_{LMG} . Базами цилиндрических элементов с информативностью $4inf$ являются оси цилиндров максимума материала, как обеспечивающие требуемые посадки с сопрягаемыми элементами базирующих и присоединяемых деталей. Базовые оси цилиндрических элементов с информативностью $4inf = 2t + 2r$ материализуют ось Z_4 обобщенной системы координат $OZ_4X_2Y_0$ детали (основная конструкторская база A_4) и ось Z'_4 вспомогательной системы координат $O'Z'_4X'_2Y'_0$ (вспомогательная конструкторская база G_4), делают их первичными с максимальной информативностью $4inf$. Это позволяет нормировать относительно баз по две линейные и две угловые координаты, т.е. четыре из шести максимальных, для каждого рабочего элемента детали и для каждой вспомогательной системы координат комплекта базовых элементов.

Главной геометрической характеристикой детали является обобщенная система координат, материализованная комплектом основных конструкторских баз цилиндрического элемента A_4 и плоского элемента B_1 . Суммарная информативность этого комплекта недостаточна для образования систем координат, т.к. составляет $5inf = 3t + 2r$.

Материализована ось Z_4 осью базы A_4 , материализовано начало координат O точки пересечения оси Z_4 плоской базой B_1 , но не определено угловое направление $1r$ вторичной оси координат X_2 на профильной проекции детали. Эту задачу можно решить, если ось X_2 материализовать на профильной проекции из начала координат OZ_4 через проекцию центра C_G вспомогательной конструкторской базы G_4 . Для этого необходимо у базы G_4 занять одну линейную степень свободы $1t$, уменьшив ее информативность до $3inf = 1t + 2r$ вспомогательной базы G_3 и превратив линейную степень свободы $1t$ в ограничение угловой степени $1r$ в качестве основной конструкторской базы G_1 с информативностью $1inf = \theta t + 1r$. В итоге вспомогательная конструкторская база G_3 потеряет одну линейную координату $Y_G = \theta$ и будет иметь информативность $3inf = 1t + 2r$, а обобщенная система координат $OZ_4X_2Y_0$ станет полной с информативностью $6inf = 3t + 3r$ (см. индикатор информативности баз и осей обобщенной системы координат на рис. 1b).

Таким образом, геометрическими характеристиками цилиндрического размерного элемента A_4 в функции основной конструкторской базы с информативностью $4inf$ является:

- ось Z_4 обобщенной системы координат $OZ_4X_2Y_0$ с информативностью $4inf = 2t + 2r$;
- Z_A — координата центра C_A в среднем сечении базы;
- l_A — длина сопряжения базы ($\geq 2d_A$);
- d_{MMA} — диаметр максимума материала;
- d_{LMA} — диаметр минимума материала;
- SFZ_A — суммарное отклонение формы заданной поверхности, или цилиндричность, составляющими которой являются:

- EFK_A — конусообразность (прямая или обратная);
- EFP_A — седлообразность или бочкообразность;
- EFL_A — прямолинейность образующей профиля;
- EFK_A — круглость (с четной или нечетной огранкой);
- RZ_A — средняя высота микронеровностей шероховатости поверхности.

Геометрическими характеристиками цилиндрического элемента G_4 с информативностью $4inf = 2t + 2r$ в функциях основной конструкторской базы с информативностью $1inf = \theta t + 1r$ и вспомогательной конструкторской базы с информативностью $3inf = 1t + 2r$ являются:

- ось X_2 обобщенной системы координат $OZ_4X_2Y_0$ с информативностью $2inf = 1t + 1r$;
- вспомогательная система координат $O'Z'_4X'_2Y'_0$ с информативностью $6inf = 3t + 3r$ за счет расположения оси X'_2 в координатной плоскости Z_4X_2 обобщенной системы координат детали (см. индикатор информативности баз и осей координат на рис. 1с);

Z_G — линейная координата начала O' вспомогательной системы координат элемента в обобщенной системе координат по оси Z_4 ;

$\theta \pm EX_G$ — линейная координата начала $O'Z'_4$ вспомогательной системы координат в обобщенной системе координат по оси X_2 ;

$\theta^\circ \pm AEY_G$ — угловая координата оси Z'_4 вспомогательной системы координат относительно оси Z_4 обобщенной системы в координатной плоскости OZ_4X_2 ($\theta \pm AE_D Y_G$ — эквивалент перекоса в линейных единицах);

$\theta^\circ \pm AEX_G$ — угловая координата оси Z'_4 вспомогательной системы координат относительно оси Z_4 обобщенной системы в координатной плоскости Z_4Y_0 ($\theta \pm AE_D X_G$ — эквивалент перекоса в линейных единицах);

l_G — длина сопряжения базы;

d_{MMG} — диаметр максимума материала;

d_{LMG} — диаметр минимума материала;

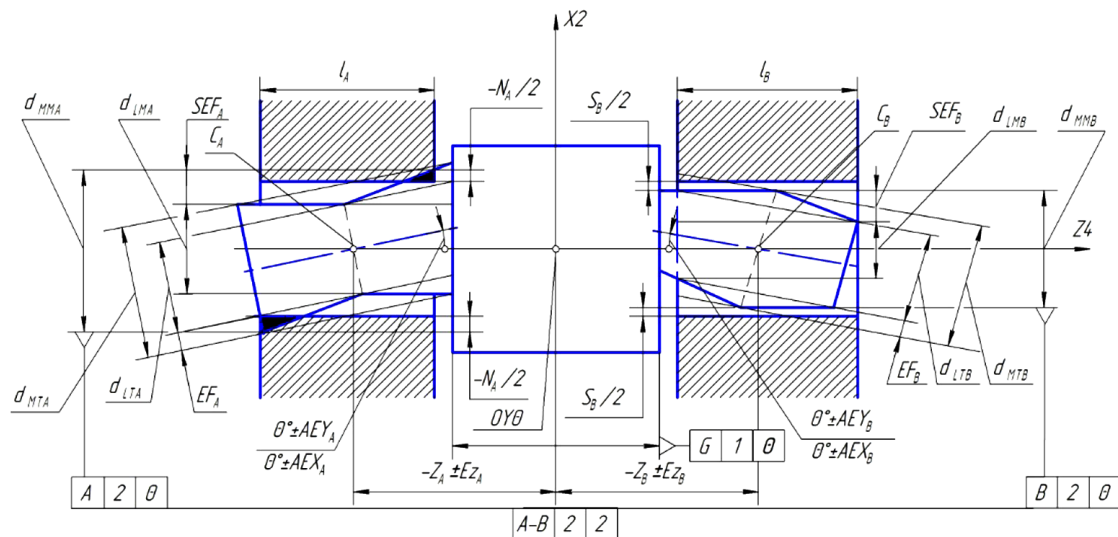
SFZ_G — суммарное отклонение формы заданной поверхности, или цилиндричность;

Rz_G — средняя высота микронеровностей шероховатости поверхности.

Следовательно, цилиндрические базовые элементы с максимальной информативностью $4inf$ в функции вспомогательных конструкторских баз имеют значительно больше геометрических характеристик за счет трех (четырех) координат положения относительно обобщенной координатной системы детали.

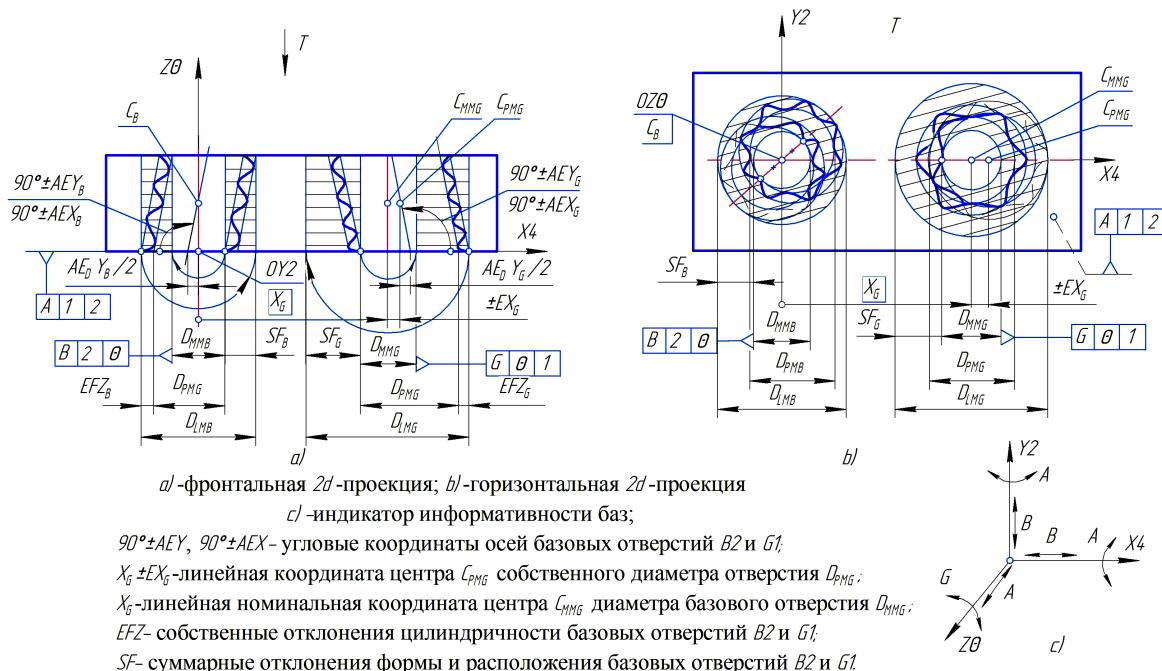
Такие же базовые элементы в функции основных конструкторских баз, координат положения не имеют: всю свою информативность они передают первичной оси Z_4 с информативностью $4inf$ при материализации обобщенной системы координат детали.

При снижении информативности основных конструкторских баз до $2inf = (2t + \theta r)$ (рис. 2), т.е. до ограничения двух линейных степеней свободы, неиспользованные угловые повороты (перекосы) осей базовых элементов относительно материализованной общей оси Z_4 входят в структуру суммарного отклонения формы заданной поверхности SEF вместе с цилиндричностью и влияют на действующие размеры максимума и минимума материала элементов.



d_{MT}, d_T – размеры диаметров максимума и минимума материала баз $A2$ и $B2$ вала по Тейлору;
 d_{MM}, d_M – действующие размеры диаметров максимума и минимума материала баз $A2$ и $B2$ вала;
 EF – отклонение формы профиля баз вала (седлообразность базы $A2$ и бочкообразность базы $B2$);
 AEY – угловые отклонения осей баз $A2$ и $B2$ относительно общей базовой оси;
 S, N – зазоры и натяги в сопряжениях;
 SEF – суммарные отклонения формы профилей баз $A2$ и $B2$ вала и угловых отклонений осей баз.

Рис. 2. Модель совместного влияния отклонений расположения и формы профиля комплекта двух цилиндрических базовых элементов вала с информативностью $2inf + 2inf$ на размеры диаметров максимума и минимума материала

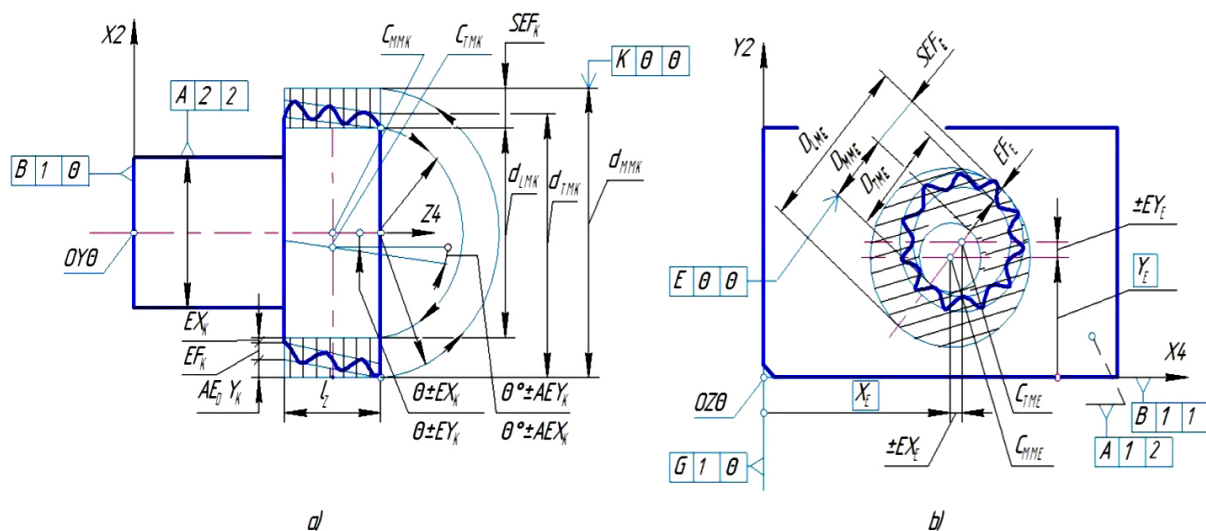


а) – фронтальная $2d$ -проекция; б) – горизонтальная $2d$ -проекция
 в) – индикатор информативности баз;
 $90^\circ \pm AEY, 90^\circ \pm AEX$ – угловые координаты осей базовых отверстий $B2$ и $G1$;
 $X_G \pm EX_G$ – линейная координата центра C_{PMG} собственного диаметра отверстия D_{PMG} ;
 X_G – линейная номинальная координата центра C_{MMG} диаметра базового отверстия D_{MMG} ;
 EFZ – собственные отклонения цилиндричности базовых отверстий $B2$ и $G1$;
 SF – суммарные отклонения формы и расположения базовых отверстий $B2$ и $G1$.

Рис. 3. Модели геометрических характеристик комплекта двух цилиндрических отверстий в функции основных конструкторских баз с информативностями $2inf$ и $1inf$

При дальнейшем снижении информативности базовых элементов в функции основных конструкторских баз до $1inf$ на модели (рис. 3) геометрических характеристик цилиндрических отверстий

в функциях основных конструкторских баз с информативностью $2inf = 2t + \theta r$ (база $B2$) и $1inf = \theta t + 1r$ (база $G1$), в структуру суммарных отклонений формы SFZ вошли не только угловые от-



а) ступенчатый вал; б) пластина с отверстием.

$OZ_4X_2Y_0$, $OX_4Y_2Z_0$ - обобщенные системы координат деталей;

$\theta \pm EX$, $\theta \pm EY$, $X \pm EX$, $Y \pm EY$ - линейные координаты центров C_{TK} и C_{TE} исполнительных элементов $K\theta$ и $E\theta$;

$\theta \pm AEY$, $\theta \pm AEX$ - угловые координаты исполнительного элемента: $K\theta$;

d_M , D_M - размеры диаметров максимума материала элементов $K\theta$ и $E\theta$ по Тейлору;

d_{TM} , D_{TM} , d_{LM} , D_{LM} - размеры действительных диаметров максимума и минимума материала элементов $K\theta$ и $E\theta$;

EF - отклонения формы цилиндрических поверхностей элементов $K\theta$ и $E\theta$ по Тейлору;

SEF - суммарные отклонения формы заданных поверхностей элементов $K\theta$ и $E\theta$; $E\theta$.

Рис. 4. Модели геометрических характеристик размерных цилиндрических элементов вала ($K\theta$) и отверстия ($E\theta$) в функции исполнительных элементов с нулевой информативностью θinf

клонения от прямых углов $9^\circ \pm AEX$, $90^\circ \pm AEY$ (баз $B2$ и $G1$), но и отклонения линейной координаты $X_C \pm EX_C$ базы $G1$.

Для осуществления собираемости детали на плоской базе $A3$ с двумя базирующими штифтами по базам $B2$ и $G1$, диаметр максимума материала базового отверстия $G1$ по Тейлору D_{TMG} должен быть дополнительно увеличен по сравнению с аналогичным диаметром базового отверстия $B2$ на размер отклонения EX_C линейной координаты X_C до номинальной оси базового отверстия $G1$. Это приведет к увеличению действующего размера диаметра минимума материала D_{LMG} .

Снижение информативности цилиндрических элементов до нуля θinf имеет место в бесконтактных соединениях, когда элементы образуют посадки с зазором, выполняя функции исполнительных элементов, например, в шестеренных насосах и в соединениях крепежными деталями. Модели геометрических характеристик наружного и внутреннего цилиндрических элементов в функции исполнительных элементов с нулевой информативностью θinf представлены на рис. 4.

Исполнительный элемент $K\theta$ вала с информативностью $\theta inf = \theta t + \theta r$ располагается в обобщенной координатной системе $OZ_4X_2Y_0$, образованной комплектом основных конструкторских баз $A4$ и $B1$, номинально соосно с осью Z_4 . Поскольку максимальная информативность цилиндрического элемента равна $4inf = 2t + 2r$, а исполнительный элемент $K\theta$ с нулевой информативностью не участвует в образовании координатной системы детали, то он будет иметь все четыре смещения относительно оси Z_4 :

$\theta \pm EX_K$, $\theta \pm EY_K$ — линейные координаты центра элемента C_{TK} в среднем сечении по осям X_2 и Y_0 ;

$\theta \pm AEX_K$, $\theta \pm AEY_K$ — угловые координаты оси элемента относительно оси Z_4 вокруг осей X_2 и Y_0 .

Эти смещения вызывают увеличение суммарного отклонения формы заданной поверхности SEF_K и приводят к увеличению действующего диаметра максимума материала d_{MK} и уменьшению действующего диаметра d_{LMK} минимума материала. По существу, эти диаметры представляют собой траектории вращения вокруг оси Z_4 самой удаленной выступающей точки (d_{MK}) и ближайшей к оси точки впадины реальной поверхности (d_{LMK}). Таким образом, посадку определяет не размер максимума материала d_{TK} по Тейлору, а размер действующего диаметра максимума материала d_{MK} .

Аналогичная картина складывается и на модели отверстия $E\theta$ с нулевой информативностью θinf в функции исполнительного элемента на призматической детали (рис. 4б).

Положение оси отверстия $E\theta$ в координатной системе $OX_4Y_2Z_0$, материализованной комплектом основных конструкторских баз $A3B2G1$ детали, нормируется двумя линейными координатами $X_E \pm EX_E$ и $Y_E \pm EY_E$ оси отверстия с диаметром максимума материала по Тейлору D_{TME} и отклонениями формы EF_E .

Под действием отклонений координат EX_E и EY_E ось реального отверстия будет смещена относительно номинального положения оси, определяемого номинальными значениями координат X_E и Y_E . В результате этого смещения действующий диаметр максимума материала отверстия D_{MME} уменьшится, а действующий диаметр минимума материала отверстия D_{LME} увеличится, совместно увеличивая и суммарное отклонение формы заданной поверхности SEF_E . Действующие размеры диаметров мак-

сумма материала отверстия и вала любой информативности определяют характер посадки. Поэтому справедливо их считать не действующими, а **действительными размерами** элементов.

Заключение. Цилиндрические элементы имеют оси, которые могут материализовать оси систем координат деталей. Элементы четвертого класса прикладной механики в функции баз материализуют ось Z_4 с информативностью $4inf = 2t + 2r$, относительно которой отсчитываются четыре координаты — две линейных ($2t$) и две угловых ($2r$). Цилиндрические элементы второго класса материализуют ось X_2 с информативностью $2inf = 1t + 1r$, которая расположена под прямым углом к оси Z_4 и от которой отсчитываются две координаты — одна линейная ($1t$) и одна угловая ($1r$).

Поскольку суммарная информативность двух осей Z_4 и X_2 достигла максимума $6inf = 3t + 3r$, то информативность третьей оси Y_0 равняется нулю — $\theta inf = \theta t + \theta r$ и от нее нельзя отсчитывать координаты элементов детали. Следовательно, комплект двух цилиндрических элементов в функциях баз с информативностью $4inf = 2t + 2r$ и $2inf = 1t + 1r$ достаточен для образования полной декартовой прямоугольной системы координат $Z_4X_2Y_0$ для соединений шестого класса прикладной механики.

Неиспользованные степени свободы оси X_2 элемента с информативностью $2inf$ должны нормироваться по расположенной нулевой линейной координатой $\theta \pm EY$ (прямые в пространстве не пересекаются) и угловой координатой $90^\circ \pm AEY$ оси X_2 относительно оси Z_4 внутри комплекта баз. Третью ось Y_0 с нулевой информативностью θinf необходимо нормировать: по расположению относительно осей Z_4 и X_2 линейными координатами $\theta \pm EZ$ и $\theta \pm EY$ и угловыми $90^\circ \pm AEZ$ и $90^\circ \pm AEX$ для ограничения степеней свободы, не использованных для материализации системы координат детали. Аналогично будут нормироваться координаты цилиндрических исполнительных элементов с нулевой информативностью.

Библиографический список

1. ISO/IEC GUIDE 99:2007. International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM). URL: <https://www.iso.org/standard/45324.html> (дата обращения: 02.03.2023).
2. ISO 80000-3. Quantities and units — Part 3: Space and time. URL: <https://www.iso.org/standard/64974.html> (дата обращения: 02.03.2023).
3. ISO 10303-203:2011. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 203: Application protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies. URL: <https://www.iso.org/standard/44305.html> (дата обращения: 02.03.2023).
4. ASME Y14.5-2009. Dimensioning and Tolerancing. Engineering Drawing and Related Documentation Practices: An international standard. USA, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2009. 215 p.
5. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. Введ. 1977—01—01. Москва: Изд-во стандартов, 1990. 36 с.
6. ISO 1101:2017. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out. URL: <https://www.iso.org/standard/66777.html> (дата обращения: 02.03.2023).
7. ISO 5459:2011. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Datums and datum systems.

URL: <https://www.iso.org/standard/40358.html> (дата обращения: 02.03.2023).

8. ISO 14638:2015. Geometrical product specifications (GPS) — Matrix model. URL: <https://www.iso.org/standard/57054.html> (дата обращения: 02.03.2023).
9. ISO 286-1:2010. Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes. Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. URL: <https://www.iso.org/standard/45975.html> (дата обращения: 02.03.2023).
10. ISO 492:2014. Rolling bearings — Radial bearings — Geometrical product specifications (GPS) and tolerance values. URL: <https://www.iso.org/standard/60356.html> (дата обращения: 02.03.2023).
11. Henzold G. Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification using ISO and ASME standards. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2021. 463 p.
12. Simmons C., Maguire D., Phelps N. Manual of Engineering Drawing: British and International Standards. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2020. 608 p.
13. Leonard P., Pairel E., Giordano M. A Simpler and More Formal Geometric Tolerancing Model // Procedia CIRP. 2013. Vol. 10 (4). P. 30–36. DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.009.
14. Serrano-Mira J., Rosado-Castellano P., Romero-Subiron F. [et al.]. Incorporation of form deviations into the matrix transformation method for tolerance analysis in assemblies // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 41. P. 547–554. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.09.042.
15. Anwer N., Scott P. J., Srinivasan V. Toward a Classification of Partitioning Operations for Standardization of Geometrical Product Specifications and Verification // Procedia CIRP. 2018. Vol. 75. P. 325–330.
16. Hidalgo D., Ruiz R. O., Delgadod A. A novel framework for relationship of manufacturing tolerance and component-level performance of journal bearings // Applied Mathematical Modelling. 2022. Vol. 105. P. 566–583.
17. Aschenbrenner A., Wartzack S. A Concept for the Consideration of Dimensional and Geometrical Deviations in the Evaluation of the Internal Clearance of Roller Bearings // Procedia CIRP. 2016. Vol. 43. P. 256–261. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.003.
18. Glukhov V. I., Pushkarev V. V., Khomchenko V. G. Geometric modeling in the problem of ball bearing accuracy // Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update. 2017. Vol. 858 (1). P. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012014.
19. Glukhov V. I., Varepo L. G., Nagornova I. V. [et al.]. Strength and geometry parameters accuracy improvement of 3D-printed polymer gears // Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update. 2019. Vol. 1260 (3). P. 032019. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032019.
20. Glukhov V. I., Varepo L. G., Shalay V. V. [et al.]. New matrix for geometrical product specifications on coordinate basis // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441 (1). P. 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012061.
21. Глухов В. И., Варепо Л. Г. Единая система отсчета геометрических характеристик размерных элементов деталей. Часть I. Теория двух размеров максимума и минимума // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 116–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-116-124. EDN: RWJCNA.

ГЛУХОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 3101-0639
ORCID: 0000-0002-4513-3291

AuthorID (SCOPUS): 56503382500
ResearcherID: Q-2030-2016

ВАРЕПО Лариса Григорьевна, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4980-6679

ORCID: 0000-0001-5366-2700

AuthorID (SCOPUS): 6507043152

ResearcherID: B-1163-2015

Адрес для переписки: larisavarepo@yandex.ru

Для цитирования

Глухов В. И., Варепо Л. Г. Единая система отсчета геометрических характеристик размерных элементов деталей. Часть II. Геометрические характеристики цилиндрических элементов деталей // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 117 – 125. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-117-125.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023 г.

© В. И. Глухов, Л. Г. Варепо



UNIFIED REFERENCE SYSTEM FOR GEOMETRIC CHARACTERISTICS DIMENSIONAL ELEMENTS OF DETAILS. PART II. GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF CYLINDRICAL ELEMENTS OF PARTS

The unified reference system for the geometric characteristics of the part is the Cartesian rectangular coordinate system, which is materialized by sets of design datums that limit the part to six degrees of freedom: three linear and three angular. ISO standards for geometric tolerances do not use coordinate systems. In this context, research in the field of increasing the accuracy of parts by introducing linear and angular coordinates of part elements is relevant.

The paper presents the second part of the article Unified Reference System for Geometric Characteristics of Dimensional Elements of Parts, which focuses on the geometric characteristics of cylindrical elements of parts. It is shown that the datums of cylindrical elements are the axes of cylinders of maximum material capable of restricting four, two and one degrees of freedom for the part depending on the functional purpose of the element. The accuracy of coordinating dimensions should be specified by symmetrical tolerances for linear and angular coordinates of elements.

Keywords: geometric characteristics, cylindrical elements of parts, workpiece coordinate systems, design bases, actuating elements, informativeness of elements, linear and angular coordinates.

References

1. ISO/IEC GUIDE 99:2007. International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM). URL: <https://www.iso.org/standard/45324.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
2. ISO 80000-3. Quantities and units — Part 3: Space and time. URL: <https://www.iso.org/standard/64974.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
3. ISO 10303-203:2011. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 203: Application protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies. URL: <https://www.iso.org/standard/44305.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
4. ASME Y14.5-2009. Dimensioning and Tolerancing. Engineering Drawing and Related Documentation Practices: An international standard. USA, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2009. 215 p. (In Engl.).
5. GOST 21495-76. Bazirovaniye i bazy v mashinostroyenii. Terminy i opredeleniya [Locating and bases in machine building industry. Terms and definitions]. Moscow, 1990. 36 p. (In Russ.).
6. ISO 1101:2017. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out. URL: <https://www.iso.org/standard/66777.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
7. ISO 5459:2011. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Datums and datum systems. URL: <https://www.iso.org/standard/40358.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
8. ISO 14638:2015. Geometrical product specifications (GPS) — Matrix model. URL: <https://www.iso.org/standard/57054.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
9. ISO 286-1:2010. Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes. Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. URL: <https://www.iso.org/standard/45975.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
10. ISO 492:2014. Rolling bearings — Radial bearings — Geometrical product specifications (GPS) and tolerance values. URL: <https://www.iso.org/standard/60356.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
11. Henzold G. Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification using ISO and ASME standards. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2021. 463 p. (In Engl.).
12. Simmons C., Maguire D., Phelps N. Manual of Engineering Drawing: British and International Standards. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2020. 608 p. (In Engl.).
13. Leonard P., Pairel E., Giordano M. A Simpler and More Formal Geometric Tolerancing Model // Procedia CIRP. 2013. Vol. 10 (4). P. 30–36. DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.009. (In Engl.).

14. Serrano-Mira J., Rosado-Castellano P., Romero-Subiryn F. [et al.]. Incorporation of form deviations into the matrix transformation method for tolerance analysis in assemblies // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 41. P. 547–554. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.09.042. (In Engl.).
15. Anwer N., Scott P. J., Srinivasan V. Toward a Classification of Partitioning Operations for Standardization of Geometrical Product Specifications and Verification // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 75. P. 325–330. (In Engl.).
16. Hidalgo D., Ruiz R. O., Delgadod A. A novel framework for relationship of manufacturing tolerance and component-level performance of journal bearings // *Applied Mathematical Modelling*. 2022. Vol. 105. P. 566–583. (In Engl.).
17. Aschenbrenner A., Wartzack S. A Concept for the Consideration of Dimensional and Geometrical Deviations in the Evaluation of the Internal Clearance of Roller Bearings // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 43. P. 256–261. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.003. (In Engl.).
18. Glukhov V. I., Pushkarev V. V., Khomchenko V. G. Geometric modeling in the problem of ball bearing accuracy // *Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update*. 2017. Vol. 858 (1). P. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012014. (In Engl.).
19. Glukhov V. I., Varepo L. G., Nagornova I. V. [et al.]. Strength and geometry parameters accuracy improvement of 3D-printed polymer gears // *Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update*. 2019. Vol. 1260 (3). P. 032019. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032019. (In Engl.).
20. Glukhov V. I., Varepo L. G., Shalay V. V. [et al.]. New matrix for geometrical product specifications on coordinate basis // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441 (1). P. 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012061. (In Engl.).
21. Glukhov V. I., Varepo L. G. Edinaya sistema otscheta geometricheskikh kharakteristik razmernykh elementov detaley. Chast' I. Teoriya dvukh razmerov maksimuma i minimuma [Unified reference system for geometric characteristics dimensional elements of details. Part I. The theory of two dimensions maximum and minimum] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 116–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-116-124. EDN: RWJCNA. (In Russ.).
-
- GLUKHOV Vladimir Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 3101-0639
ORCID: 0000-0002-4513-3291
AuthorID (SCOPUS): 56503382500
ResearcherID: Q-2030-2016
- VAREPO Larisa Grigorievna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 4980-66-79
ORCID: 0000-0001-5366-2700
AuthorID (SCOPUS):6507043152
ResearcherID: B-1163-2015
Correspondence address: larisavarepo@yandex.ru

For citations

Glukhov V. I., Varepo L. G. Unified reference system for geometric characteristics dimensional elements of details. Part II. Geometric characteristics of cylindrical elements of parts // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 117–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-117-125.

Received November 27, 2023.
© V. I. Glukhov, L. G. Varepo

Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева,
г. Санкт-Петербург

АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ И ВАРИАТИВНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ (КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ) ВИСКОЗИМЕТРОВ СТЕКЛЯННЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ ЭТАЛОННЫХ

Приведены результаты определения стабильности и вариативности основной характеристики вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных — коэффициента преобразования путем анализа совокупности данных по вискозиметрам, имеющим разные диаметры измерительного капилляра. Показано, что средние значения по выборке отличаются от средних значений по кривым симметричного нормального распределения в пределах 2–4 %, а также соответствия статистик нормальному закону распределения с помощью обратной стандартной функции и гистограмм, демонстрирующих степень соответствия выборочного распределения теоретическому.

Ключевые слова: STATISTICA, вискозиметр стеклянный капиллярный, коэффициент преобразования, выборка, гистограмма, нормальный закон распределения, средние значения.

Введение. Из всего многообразия существующих сегодня средств измерений для наиболее точных измерений вязкости применяют вискозиметры стеклянные капиллярные Уббелоды (вискозиметры с «висячим уровнем») [1–3]. Такие вискозиметры, как правило, применяют в составе национальных эталонов в виде наборов, состоящих из пар вискозиметров, разделенных на группы по размеру диаметра измерительного капилляра.

В Российской Федерации такие вискозиметры применяют в составе комплексов эталонных ЭК КВх, предназначенных для измерений, а также хранения и передачи единицы кинематической вязкости жидкостей в диапазонах значений вязкости от 0,4 до 10^5 мм²/с и в диапазоне значений температуры от минус 40 °С до 150 °С.

Принцип действия основан на измерении времени истечения определённого объёма исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра под действием собственного веса и при постоянном контроле установившегося значения температуры.

Вискозиметры состоят из трех соединенных между собой стеклянных трубок, в одной из которых расположен капилляр и измерительный резервуар, ограниченный двумя кольцевыми рисками. Вискозиметры представляют собой U-образную стеклянную трубку, изготовленную из химически стойкого лабораторного стекла (рис. 1). Вискозиме-

тры маркируют путём нанесения на сферическую поверхность измерительного резервуара его номинального значения объёма, а также меток, определяющих измерительный резервуар вискозиметра. Габаритные размеры вискозиметра: 55 × 610 мм.

Условия эксплуатации вискозиметров:

- температура окружающего воздуха, °С: 20±2;
- относительная влажность воздуха, %: 30–80;
- атмосферное давление, кПа: 84,0–106,7.

Значение коэффициента преобразования (КП) — постоянной вискозиметра зависит от величины диаметра, а точность и стабильность его являются характеристиками метрологической надёжности средства измерений. Вискозиметры являются довольно надёжными и долговечными — срок их службы достигает 25 лет, наработка до отказа — до 48000 часов (согласно описанию типа СИ), а нормированный интервал между поверками — 4 года.

Предел допускаемой относительной погрешности определения постоянных преобразования вискозиметров из состава комплексов эталонных, согласно описанию типа, не должен превышать ± 0,2 % [4].

Уравнение измерений кинематической вязкости основано на уравнении Хагена–Пуазейля, описывающего ламинарное установившееся течение ньютоновской жидкости через капилляр конечной длины под действием силы тяжести с учетом по-



Рис. 1. Общий вид вискозиметра стеклянного капиллярного эталонного

правки на потерю жидкостью кинетической энергии. Поскольку жидкость входит в капилляр из более широкого сосуда, то на некотором расстоянии от капилляра она течет сходящимися струями, скорости которых различны. Различие в скоростях движения частиц жидкости, подходящих к капилляру, обуславливает дополнительное сопротивление течению жидкости. Оно учитывается прибавлением к значению длины капилляра некоторой величины ΔL , пропорциональной радиусу, т.е. $\Delta L = n \cdot R$.

Таким образом, уравнение Пуазейля с учетом двух поправок примет вид

$$v = \frac{\pi r^4 g h}{8V(L + nr)} \tau - \frac{mV}{8V(L + nr)\tau}, \quad (1)$$

где V — объем измерительного резервуара вискозиметра, мм^3 ; τ — время истечения определенного объема исследуемой жидкости через измерительный резервуар вискозиметра, с; L — длина измерительного капилляра вискозиметра, мм; r — радиус измерительного капилляра, мм; g — ускорение свободного падения, $\text{мм}/\text{с}^2$; h — высота столба исследуемой жидкости в вискозиметре, мм; n — поправка на конечную длину измерительного капилляра (поправка Куэтта) [5]; m — безразмерный коэффициент, учитывающий поправку на потерю жидкостью кинетической энергии, зависящий от формы концов капилляра, а также от числа Рейнольдса (Re) [6, 7].

Несмотря на многочисленные исследования, к настоящему времени отсутствуют твердо установленные значения для величин m и n . Большинство экспериментаторов принимают для обрванных под прямым углом капилляров значения $m = 1,12$, $n = 1,14$. Когда же капилляр имеет на концах закругления, наиболее часто применяемые значения для $m = 0,56 - 0,60$.

Исследования Кеннона показали, что m не является константой, а зависит от числа Рейнольдса, рассчитываемого по формуле:

$$\text{Re} = \frac{d\bar{v}}{v}, \quad (2)$$

где d — диаметр капилляра, мм; \bar{v} — средняя скорость течения жидкости, которая определяется как расход Q , деленный на площадь сечения капилляра, $\text{мм}/\text{с}$.

Для случая, когда концы капилляра выполнены в виде раструба (неизбежно при пайке капилляра), Кенноном предложена следующая экспериментальная найденная зависимость между m и Re [8]

$$m = 0,037(\text{Re})^{0,5}. \quad (3)$$

Формула Пуазейля справедлива только для ламинарного потока жидкости, то есть при отсутствии скольжения на границе жидкость — стенка капилляра вискозиметра.

В документе D 446 [9] приведена следующая формула для расчета измеренного значения кинематической вязкости исследуемой жидкости

$$v = \left(\frac{10^6 \pi g D^4 H \tau}{128 V L} - \frac{E}{\tau^2} \right), \quad (4)$$

где v — кинематическая вязкость, $\text{мм}^2/\text{с}$; π — число Пи; g — нормальное ускорение свободного падения, $\text{мм}/\text{с}^2$; D — диаметр капилляра вискозиметра, мм; H — среднее расстояние между верхним и нижним менисками, мм; τ — время истечения исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра, с; V — объем исследуемой жидкости, протекающий через капилляр вискозиметра (приблизительно равный объему измерительного резервуара вискозиметра), мм^3 ; L — длина капилляра вискозиметра, мм; E — поправка на потерю жидкостью кинетической энергии, $\text{мм}^2 \cdot \text{с}$.

Для вискозиметров с постоянными, значение которых составляет $0,05 \text{ мм}^2/\text{с}^2$ и менее, влияние поправки на потерю жидкостью кинетической энергии может быть существенным, к тому же коэффициент E не является константой, но он может быть рассчитан по формуле

$$E = \frac{52,5V^{3/2}}{L(Cd)^{1/2}}, \quad (5)$$

где V — объем измерительного резервуара вискозиметра, мм^3 ; L — длина капилляра вискозиметра, мм; d — диаметр капилляра вискозиметра, мм; C — постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$.

При небольших числах Re для рассматриваемых вискозиметров, значение m приближается к нулю с уменьшением числа Re, кроме того, выражение $(L + nr)$ может быть упрощено до L , тогда уравнение (1) можно записать в виде [10]:

$$v = C\tau - \frac{B}{\tau^2}, \quad (6)$$

$$B = \frac{1,66V^{3/2}}{L\sqrt{rC}} = \frac{mV}{8\pi L}, \quad (7)$$

где C — коэффициент преобразования (далее — КП), $\text{мм}^2/\text{с}$; B — постоянная вискозиметра, учитывающая потерю жидкостью кинетической энергии, мм^2 .

Для малых значений вязкости, при которых поправка на потерю жидкостью кинетической энергии наиболее существенна — для поддиапазонов измерений до $100 \text{ мм}^2/\text{с}$ для рассматриваемых вискозиметров [11]. Несмотря на то, что величина поправки мала, ею нельзя пренебречь.

За эталонную меру для вискозиметров большинства стран принято фиксированное значение абсолютной вязкости воды при значении температуры, равном $20,000 \text{ }^\circ\text{C}$, и атмосферном давлении, установленном в [12, 13] как $1,0034 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Для обоснования необходимого уровня точности передачи размера единицы кинематической вязкости, а также обеспечения компетентности лабораторий, эксплуатирующих вискозиметры стеклянные капиллярные эталонные, необходимо оценить их метрологическую надежность, характеризующуюся в том числе и такими показателями, как стабильность и вариативность коэффициента преобразования (далее — КП).

Измеренные значения КП

КП вискозиметра (группировка по диапазонам)	Число точек данного диапазона	p — доля количества точек в данном диапазоне от общего их числа
1	2	3
капилляр 0,33 мм		
$0,0013 < x \leq 0,0015$	11	0,159
$0,0015 < x \leq 0,0017$	29	0,420
$0,0017 < x \leq 0,0020$	27	0,391
$0,0020 < x \leq 0,0022$	2	0,0289
итоговое среднее: 0,0017	общее число точек совокупности: 69	
капилляр 0,48 мм		
$0,0034 < x \leq 0,0041$	5	0,0471
$0,0041 < x \leq 0,0047$	16	0,151
$0,0047 < x \leq 0,0054$	44	0,415
$0,0054 < x \leq 0,0061$	31	0,292
$0,0061 < x \leq 0,0067$	10	0,0943
итоговое среднее: 0,0052	общее число точек совокупности: 106	
капилляр 0,65 мм		
$0,0122 < x \leq 0,0141$	7	0,0534
$0,0141 < x \leq 0,0159$	36	0,275
$0,0159 < x \leq 0,0178$	46	0,351
$0,0178 < x \leq 0,0196$	30	0,229
$0,0196 < x \leq 0,0214$	8	0,0611
$0,0214 < x \leq 0,0233$	4	0,0305
итоговое среднее: 0,0173	общее число точек совокупности: 131	
капилляр 0,97 мм		
$0,0334 < x \leq 0,0371$	2	0,0129
$0,0371 < x \leq 0,0408$	13	0,0839
$0,0408 < x \leq 0,0444$	38	0,245
$0,0444 < x \leq 0,0481$	55	0,355
$0,0481 < x \leq 0,0518$	28	0,181
$0,0518 < x \leq 0,0555$	19	0,123
итоговое среднее: 0,0463	общее число точек совокупности: 155	
капилляр 1,33 мм		
$0,141 < x \leq 0,150$	9	0,0612
$0,150 < x \leq 0,159$	22	0,150
$0,159 < x \leq 0,169$	58	0,395
$0,169 < x \leq 0,178$	31	0,211
$0,178 < x \leq 0,187$	22	0,150
$0,187 < x \leq 0,196$	5	0,034
итоговое среднее: 0,167	общее число точек совокупности: 147	
капилляр 1,88 мм		
$0,390 < x \leq 0,418$	1	0,0065
$0,418 < x \leq 0,447$	9	0,0584
$0,447 < x \leq 0,475$	63	0,409
$0,475 < x \leq 0,503$	57	0,370
$0,503 < x \leq 0,532$	18	0,117
$0,532 < x \leq 0,560$	6	0,0390
итоговое среднее: 0,479	общее число точек совокупности: 154	

1	2	3
капилляр 2,55 мм		
$1,272 < x <= 1,381$	1	0,0256
$1,381 < x <= 1,490$	7	0,179
$1,490 < x <= 1,600$	12	0,308
$1,600 < x <= 1,710$	12	0,308
$1,710 < x <= 1,816$	7	0,179
итоговое среднее: 1,60	Общее число точек совокупности: 39	
капилляр 4,15 мм		
$3,888 < x <= 4,352$	10	0,0943
$4,352 < x <= 4,817$	13	0,123
$4,817 < x <= 5,282$	36	0,340
$5,282 < x <= 5,746$	37	0,349
$5,746 < x <= 6,211$	10	0,0943
итоговое среднее: 5,13	общее число точек совокупности: 106	
капилляр 5,50 мм		
$13,866 < x <= 15,599$	7	0,25
$15,599 < x <= 17,333$	9	0,32
$17,333 < x <= 19,066$	9	0,32
$19,066 < x <= 20,8$	3	0,11
итоговое среднее: 16,95	общее число точек совокупности: 28	
капилляр 7,25 мм		
$50,189 < x <= 51,542$	4	0,211
$51,542 < x <= 52,895$	3	0,158
$52,895 < x <= 54,247$	10	0,526
$54,247 < x <= 55,60$	2	0,105
Итоговое среднее: 52,94	общее число точек совокупности: 19	

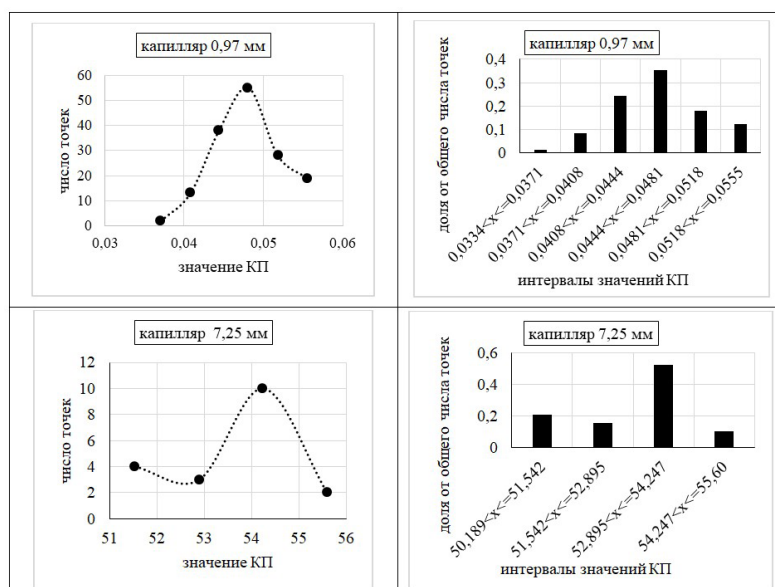


Рис. 2. Измеренные значения КП для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 7,25 мм

Таким образом, целью настоящего исследования являлось определение стабильности и вариативности основной характеристики вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных — коэффициента преобразования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) составлено упорядоченное описание совокупности данных по определению КП в процессе проверок вискозиметров разных типоразмеров (все-

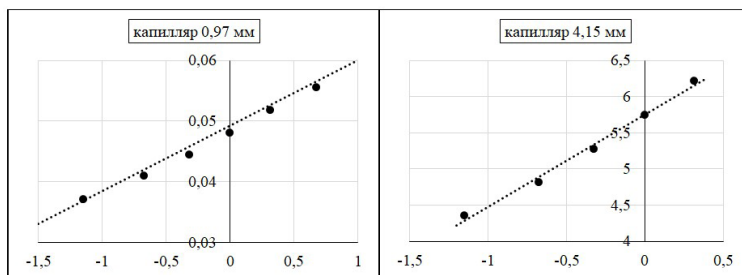


Рис. 3. Графики, показывающие соответствие нормальному закону распределения в EXCEL для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм

го проанализированы примерно 1000 результатов определения КП вискозиметров десяти типоразмеров, подвергнутых поверкам и/или калибровкам в лаборатории с 2000 по 2022 годы);

2) проведен анализ, по результатам которого установлено, что во всех (т.е. для каждого типоразмера) совокупностях измеренных значений КП наблюдается разброс, характеризующий вариативность значений КП для разных инвентарных номеров вискозиметров данного типоразмера. При этом стабильность определяемых значений КП для одного инвентарного номера высокая — отношение «КП до поверки (калибровки) / КП после поверки (калибровки)» близко к единице, за редким исключением (всего по несколько точек);

3) оценена стабильность значений КП вискозиметров одного инвентарного номера по имеющимся в общей совокупности соответствующим точкам;

4) проведен анализ совокупности данных по вискозиметрам разных размеров, включающий:

4.1) систематизацию измеренных значений КП в таблицах и графиках в EXCEL;

4.2) анализ соответствия нормальному закону распределения в EXCEL с помощью обратной стандартной функции НОРМ.СТ.ОБР.;

4.3) анализ соответствия нормальному закону распределения с помощью обратной стандартной функции НОРМ.СТ.ОБР в программе STATISTICA;

4.4) построение гистограмм проверки соответствия нормальному распределению в программе STATISTICA.

Результаты выполнения задач 1–3 подробно изложены в работе [14].

Получаемые и анализируемые значения КП вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных являются показателем их высокой метрологической надёжности за счет высокой вероятности безотказной работы, точности, стабильности и повторяемости. Результаты, полученные в данном исследовании, носят новый научный характер и получены впервые для данного типа средств измерений.

Систематизация измеренных значений КП в таблицах и графиках в EXCEL. Для систематизации измеренных значений КП массив данных, содержащий сведения о поверках и/или калибровках вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных за период с 2000 до 2022 годы был подвергнут систематизации путем группировки данных по диапазонам и оценки количества точек данного диапазона, как это показано в табл. 1. По данным табл. 1 были построены зависимости значений КП от числа точек для всех типоразмеров вискозиметров, а также гистограммы в EXCEL. На рис. 2 представлены зависимости КП от числа точек и гистограммы для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 7,25 мм.

Из приведенных выше диаграмм видно, что для более-менее достоверной оценки соответствия выборки стандартному нормальному распределению необходимо иметь представительную статистику — желательно более 100 точек.

В целом, по представленным данным можно сделать предположение о соответствии значений КП разных экземпляров вискозиметров одного диаметра нормальному закону распределения. Приводимые ниже результаты анализа по программам EXCEL и STATISTICA и уточняют, и, в основном, подтверждают это предположение.

Анализ соответствия нормальному закону распределения в EXCEL с помощью обратной стандартной функции НОРМ.СТ.ОБР. Обобщённое нормальное распределение приращения $x(t)$ значения КП за время t означает, что нормальному распределению подчиняется значение

$$y(t) = \text{sign}x|x|^F, \quad (8)$$

где $\text{sign}x$ — знак величины $x(t)$; F — показатель степени, характерный для данного вискозиметра.

Плотность обобщённого нормального распределения случайной величины $x(t)$ имеет вид:

$$\varphi_t(x) = \frac{|F|}{\sqrt{2\pi}\sigma_F(t)|x|^{1-F}} \times \exp\left\{-\frac{[\text{sign}x|x|^F - m_F(t)]^2}{2\sigma_F^2(t)}\right\}, \quad (9)$$

где m_F , σ_F — среднее значение и СКО величины $\text{sign}x|x|^F$ соответственно.

В частном случае, при $F = 1$, зависимость (9) преобразуется в плотность нормального распределения

$$\varphi_t(x) = \frac{1}{\sigma_1(t)} \exp\left\{-\frac{[x - m_1(t)]^2}{2\sigma_1^2(t)}\right\}. \quad (10)$$

В приведенных ниже графиках (рис. 2) по горизонтальной оси X отложены значения функции НОРМ.СТ.ОБР, а по вертикальной оси Y — значения КП вискозиметров (по значениям в интервалах разбиения совокупности измеренных значений — более 100 точек для капилляра одного диаметра).

На рис. 3 приведен пример полученных графиков для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм.

Расположение точек на прямой линии в этих графиках — признак соответствия совокупности данных нормальному закону распределения.

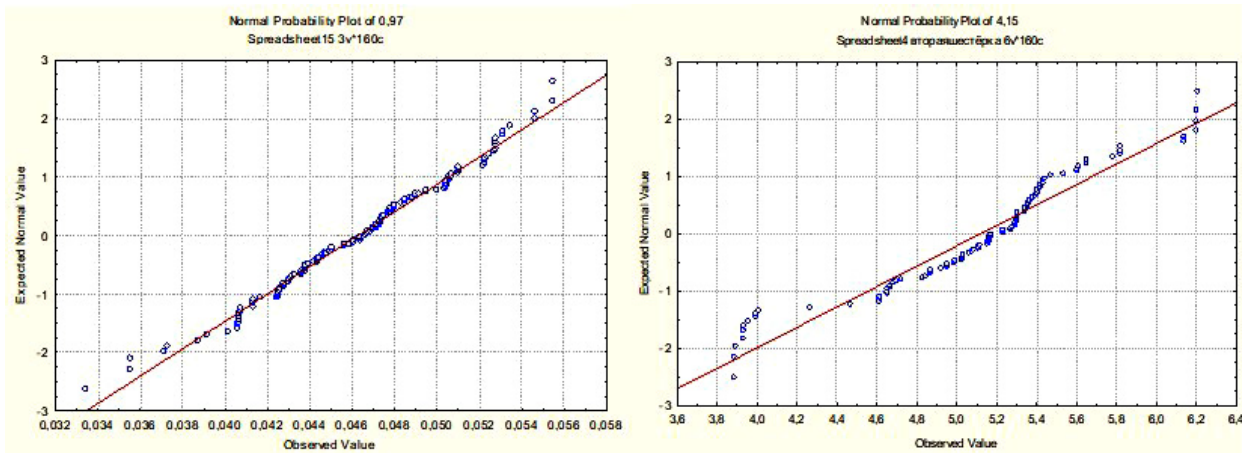


Рис. 4. Результаты анализа соответствия нормальному закону распределения набора значений КП вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм (капилляр 0,97 мм по оси X — значения КП, 155 точек, капилляр 4,15 мм по оси X — значения КП, 106 точек)

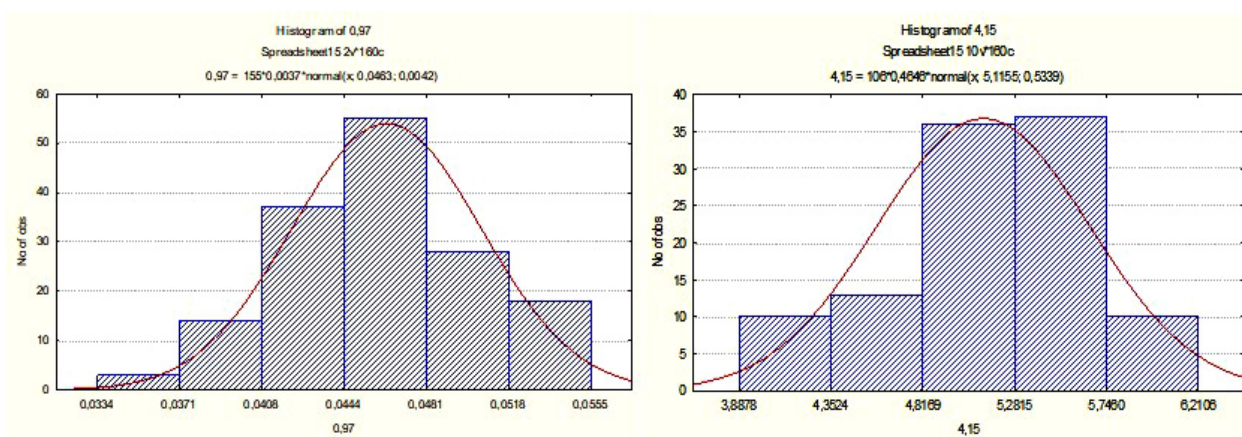


Рис. 5. Гистограммы проверки соответствия нормальному закону распределения в программе STATISTICA для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм

Анализ соответствия нормальному закону распределения с помощью обратной стандартной функции НОРМ.СТ.ОБР в программе STATISTICA. Для построения графика соответствия набора значений КП вискозиметра критерию нормальности закона распределения (обратная нормальная стандартная функция) в программе STATISTICA-7 открывалась таблица и осуществлялось последовательное применение программных модулей: Data/Statistics/Graphs/2DGraphs/NormalProbabilityPlots.

Для расчета моментов распределения (среднее и СКО) создавалась специальная таблица: Statistics/BasicStatistics/Var/Tables.

Для построения диаграммы с наложенной кривой нормального распределения открывался файл и создавалась таблица с необходимым числом переменных и числом реализаций, затем применялись модули: Statistics/DistributionFitting/VariableVar1, Distribution:Normal и далее GraphsHistogram [15].

На рис. 4 представлены результаты анализа соответствия нормальному закону распределения набора значений КП вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм.

На рис. 5 представлены гистограммы проверки соответствия нормальному закону распределения в программе STATISTICA для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм.

Заключение. Исследования, направленные на определение стабильности и вариативности ос-

новной характеристики вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных — коэффициента преобразования, проведенные по совокупности данных по вискозиметрам с разными диаметрами измерительного капилляра, показали, что средние значения по выборке отличаются от средних значений по кривым симметричного нормального распределения в пределах 2–4 %. Кроме того, проведенное сравнение статистик нормальному закону распределения с помощью обратной стандартной функции и гистограмм продемонстрировало степень соответствия выборочного распределения теоретическому для представительных выборок (число точек ≈ 100 и более).

Библиографический список

1. Gu H., Tang X., Hong R. Y. [et al.]. Ubbelohde viscometer measurement of water-based Fe_3O_4 magnetic fluid prepared by coprecipitation // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. Vol. 348. P. 88–92. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.07.033.
2. Lorefice S., Saba F. The Italian primary kinematic viscosity standard: The viscosity scale // *Measurement*. 2017. Vol. 112. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.006.
3. Fujita Y., Kurano Y., Fujii K. Evaluation of uncertainty in viscosity measurements by capillary master viscometers // *Metrologia*. 2009. Vol. 46. P. 237–248. DOI: 10.1088/0026-1394/46/3/010.

4. Неклюдова А. А., Сулаберидзе В. Ш. Научно-методические основы метрологического обеспечения современных методов измерений вязкости жидких сред: моногр. Санкт-Петербург: КОСТА, 2023. 232 с. ISBN 978-5-91258-497-8.
5. Kawata M., Kurase K., Nagashima A. [et al.]. Capillary Viscometers, Measurement of the Transport Properties of fluids / ed. by Wakeham W. A., Nagashima A., Sengers J. V. Oxford: Blackwell, 1991. 479 p.
6. Swindells J. F., Hardy R. C., Cottington R. L. Precise Measurements with Bingham viscometers and Cannon master viscometers // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1954. Vol. 52 (3). P. 105–220.
7. Kawata M. Effects of length and exit-end shape of capillary tube on instrumental constants in capillary viscometer // Bulletin of the National Research Laboratory of Metrology. 1965. Vol. 10. P. 1–7.
8. Степанов Л. П. Измерение вязкости жидкостей. Москва: [б. и.], 1966. 43 с.
9. ASTM D446-12. Стандартные спецификации и инструкции по эксплуатации стеклянных капиллярных кинематических вискозиметров. 2017. URL: <https://www.astm.org/standards/d446> (дата обращения: 09.01.2024).
10. Cannon M. R., Manning R. E., Bell J. D. Viscosity Measurement. Kinetic Energy Correction and New Viscometer // Analytical Chemistry. 1960. Vol. 32, no. 3. P. 355–358. DOI: 10.1021/AC60159A015.
11. Неклюдова А. А. Совершенствование метрологического обеспечения измерений вязкости жидких сред в интервале температуры от минус 40 °С до 150 °С: дис. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 2019. 179 с.
12. ISO/TR 3666:1998 Viscosity of water. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/28607/3c44fe1006904b7ab70511a4c3be583d/ISO-TR-3666-1998.pdf> (дата обращения: 09.01.2024).
13. ASTM D 2162-06. Standard practice for basic calibration of master viscometers and viscosity oil standards. URL: <https://catalogue.normdocs.ru/?type=card&cid=com.normdocs.astm.card.d2162-06> (дата обращения: 21.11.2023).
14. Неклюдова А. А., Сулаберидзе В. Ш. Анализ показателей метрологической надёжности вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2024. № 1 (146). С. 38–56.
15. Куприенко Н. В., Пономарева О. А., Тихонов Д. В. Статистика. Методы анализа распределений. Выборочное наблюдение. 3-е изд. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 138 с.

СУЛАБЕРИДЗЕ Владимир Шалвович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 1481-4297

ResearcherID: AAD 1295-2021

Адрес для переписки: sula_vlad@mail.ru

НЕКЛЮДОВА Анастасия Александровна, кандидат технических наук, заместитель руководителя научно-исследовательской лаборатории государственных эталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная метрология» ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7595-1830

ResearcherID: O-3887-2018

ORCID: 0009-0005-0472-6962

Адрес для переписки: A.A.Tsurko@vniim.ru

Для цитирования

Сулаберидзе В. Ш., Неклюдова А. А. Анализ стабильности и вариативности метрологической характеристики (коэффициента преобразования) вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 126–134. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-126-134.

Статья поступила в редакцию 21.11.2023 г.

© В. Ш. Сулаберидзе, А. А. Неклюдова

THE ANALYSIS OF STABILITY AND VARIABILITY OF METROLOGICAL CHARACTERISTIC (CONVERSION COEFFICIENT) OF GLASS CAPILLARY REFERENCE VISCOMETERS

The results of determining the stability and variability of the main characteristic of glass capillary reference viscometers — conversion coefficient — by analyzing a set of data on viscometers having different diameters of the measuring capillary are presented. It is shown that the mean values of the sample differ from the mean values of the symmetric normal distribution curves within [2–4] %, as well as the correspondence of statistics to the normal distribution law by means of the inverse standard function and histograms showing the degree of correspondence of the sample distribution to the theoretical one.

Keywords: STATISTICA, glass capillary viscometer, conversion factor, sample, histogram, normal distribution law, mean values.

References

1. Gu H., Tang X., Hong R. Y. [et al.]. Ubbelohde viscometer measurement of water-based Fe_3O_4 magnetic fluid prepared by coprecipitation // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. Vol. 348. P. 88–92. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.07.033. (In Engl.).
2. Lorefice S., Saba F. The Italian primary kinematic viscosity standard: The viscosity scale // *Measurement*. 2017. Vol. 112. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.006. (In Engl.).
3. Fujita Y., Kurano Y., Fujii K. Evaluation of uncertainty in viscosity measurements by capillary master viscometers // *Metrologia*. 2009. Vol. 46. 237–248. DOI: 10.1088/0026-1394/46/3/010. (In Engl.).
4. Neklyudova A. A., Sulaberidze V. Sh. Nauchno-metodicheskiye osnovy metrologicheskogo obespecheniya sovremennykh metodov izmereniy vyazkosti zhidkikh sred [Scientific and methodological bases of metrological support of modern methods of viscosity measurements of liquid media]. Saint Petersburg, 2023. 232 p. ISBN 978-5-91258-497-8. (In Russ.).
5. Kawata M., Kurase K., Nagashima A. [et al.]. Capillary Viscometers, Measurement of the Transport Properties of fluids / Ed. by Wakeham W. A., Nagashima A., Sengers J. V. Oxford: Blackwell, 1991. 479 p. (In Engl.).
6. Swindells J. F., Hardy R. C., Cottington R. L. Precise Measurements with Bingham viscometers and Cannon master viscometers // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1954. Vol. 52 (3). P. 105–220. (In Engl.).
7. Kawata M. Effects of length and exit-end shape of capillary tube on instrumental constants in capillary viscometer // *Bulletin of the National Research Laboratory of Metrology*. 1965. Vol. 10. P. 1–7. (In Engl.).
8. Stepanov L. P. *Izmereniye vyazkosti zhidkostey* [Measuring the viscosity of liquids]. Moscow, 1966. 43 p. (In Russ.).
9. ASTM D446-12. Standartnyye spetsifikatsii i instruktsii po ekspluatatsii steklyannykh kapillyarnykh kinemacheskikh viskozimetrov [Standard Specification and Operating Instructions for Glass Capillary Kinematic Viscometers]. 2017. URL: <https://www.astm.org/standards/d446> (accessed: 09.01.2024). (In Russ.).
10. Cannon M. R., Manning R. E., Bell J. D. Viscosity Measurement. Kinetic Energy Correction and New Viscometer // *Analytical Chemistry*. 1960. Vol. 32, no. 3. P. 355–358. (In Engl.).
11. Neklyudova A. A. Sovershenstvovaniye metrologicheskogo obespecheniya izmereniy vyazkosti zhidkikh sred v intervale temperature ot minus 40 °C do 150 °C [Improvement of metrological support of viscosity measurements of liquid media in the temperature range from minus 40 °C to 150 °C to 150 °C]. Saint Petersburg, 2019. 179 p. (In Russ.).
12. ISO/TR 3666:1998 Viscosity of water. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/28607/3c44fe1006904b7ab70511a4c3be583d/ISO-TR-3666-1998.pdf> (accessed: 09.01.2024). (In Engl.).
13. ASTM D 2162-06. Standard practice for basic calibration of master viscometers and viscosity oil standards. URL: <https://catalogue.normdocs.ru/?type=card&cid=com.normdocs.astm.card.d2162-06> (accessed: 21.11.2023). (In Engl.).
14. Neklyudova A. A., Sulaberidze V. Sh. Analiz pokazateley metrologicheskoy nadezhnosti viskozimetrov steklyannykh kapillyarnykh etalonnnykh [Metrological dependability indicators analysis of the glass capillary reference viscometers] // *Vestnik MG TU im. N. E. Bauman. Seriya «Priborostroyeniye»*. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2024. No. 1 (146). P. 38–56. (In Russ.).
15. Kupriyenko N. V., Ponomareva O. A., Tikhonov D. V. *Statistika. Metody analiza raspredeleniy. Vyborochnoye*

nablyudeniye. [Statistics. Methods of analyzing distributions. Sample observation]. 3rd ed. Saint Petersburg, 2009. 138 p. (In Russ.).

SULABERIDZE Vladimir Shalvovich, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Research Laboratory of State Standards in the Field of Density and Viscosity Measurements of Liquids, The D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg.

SPIN-code: 1481-4297

ResearcherID: AAD 1295-2021

Correspondence address: sula_vlad@mail.ru

NEKLYUDOVA Anastasiya Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Research Laboratory of State Standards in the Field of Measurements of Density and Viscosity of Liquids,

Associate Professor of Theoretical and Applied Metrology Department, VNIIM, Saint Petersburg.

SPIN-code: 7595-1830

ResearcherID: O-3887-2018

ORCID: 0009-0005-0472-6962

Correspondence address: A.A.Tsurko@vniim.ru

For citations

Sulaberidze V. Sh., Neklyudova A. A. The analysis of stability and variability of metrological characteristic (conversion coefficient) of glass capillary reference viscometers // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 126–134. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-126-134.

Received November 21, 2023.

© V. Sh. Sulaberidze, A. A. Neklyudova

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ В МИНИАТЮРНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСАХ С ЦЕЛЬЮ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

В эпоху развития интеллектуальных информационных технологий, систем обработки и передачи сигналов, навигационных систем и ракетостроения к источникам опорных колебаний предъявляются все более жесточенные требования. Большое значение приобретают малые габаритные размеры, малое время выхода на частоту после подачи электропитания, рабочий температурный диапазон и относительный уход частоты в интервале рабочих температур. Частота на выходе генератора во многом зависит от влияния климатических, механических и специальных факторов. Наиболее дестабилизирующим фактором является изменение температуры окружающей среды. Исходя из этого, обеспечение температурной стабильности частоты в широком диапазоне является актуальной задачей.

Для стабилизации частоты генераторов в радиотехнике, как правило, применяются кварцевые резонаторы. Кварц относится к группе пьезоэлектриков — анизотропных диэлектриков, в которых наблюдаются прямой и обратный пьезоэффекты. Использование кварцевых резонаторов в электрогенераторах позволяет гарантировать нам высокую стабильность частоты без усложнения схемы [1].

На предприятии АО «ЛИТ-ФОНОН» была создана технологическая цепочка, позволяющая произвести кварцевый резонатор в миниатюрном металлокерамическом корпусе с применением только российских комплектующих. Созданные кварцевые резонаторы в дальнейшем планируется применять в составе термокомпенсированных генераторов. Однако на первом этапе необходимо было провести анализ характеристик созданных изделий, а также возможность поддерживать стабильность частоты $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ в широком интервале температур от -60 °C до $+85$ °C [2].

Проведенное исследование позволило выявить ряд недостатков, препятствующих получению стабильности частоты термокомпенсированных генераторов $\pm 1 \cdot 10^{-7}$. В частности, уходы частоты кварцевых резонаторов в миниатюрных металлокерамических корпусах со временем эксплуатации при максимальной рабочей температуре $+85$ °C превышают значения $\pm 1 \cdot 10^{-7}$, т.е. требуется дополнительная подстройка генераторов в процессе эксплуатации. Кроме того, некоторые российские комплектующие не оптимально подошли к созданному на базе АО «ЛИТ-ФОНОН» технологическому процессу, что в будущем для создания кварцевых резонаторов может существенно повлиять на выход годных. Стоит также отметить, что измерительная установка имеет погрешность измерения $\pm 5 \cdot 10^{-7}$. Такой разброс не позволил оценить стабильность частоты кварцевых резонаторов с необходимой точностью.

Ключевые слова: кварц, генератор, резонатор, термокомпенсация, металлокерамический корпус, кристаллический элемент, угол среза, стабильность частоты.

Важнейшим элементом, отвечающим за стабильность поддержания частоты в интервале рабочих температур, является кварцевый резонатор. В процессе разработки резонатора было принято решение использовать только российские комплекту-

ющие. Для изготовления пьезоэлемента резонатора был применен кварц фирмы АО «Южноуральский завод «Кристалл», г. Челябинск. Кристаллы выращивают в специальных анклавах, качество кварца соответствует требованиям стандарта МЭК

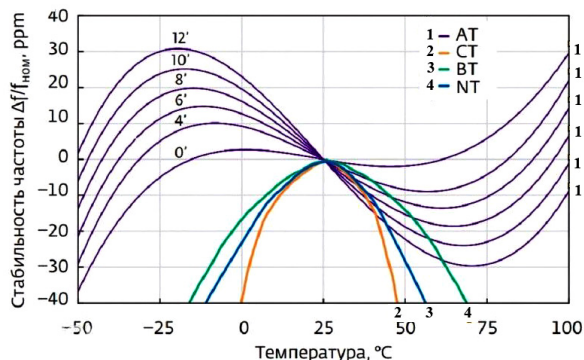


Рис. 1. Стабильность частоты AT, BT, CT и NT срезов кварца

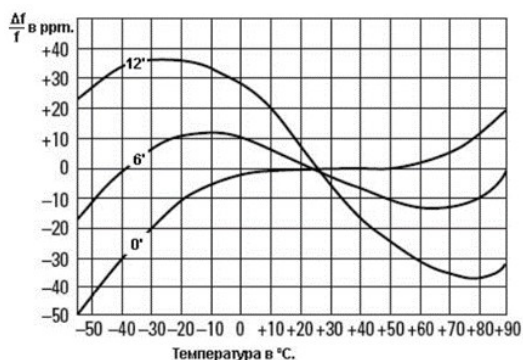


Рис. 2. Зависимость отклонения частоты от температуры окружающей среды для пьезоэлементов с AT-срезом (с разными углами)

(IEC) 60758 (2016). Так как одним из основных параметров кварцевых резонаторов в современных реалиях являются габариты, решено было использовать в работе металлокерамический корпус для поверхностного монтажа DLCC 8/4-3. В 2018 году на российском предприятии АО «Завод полупроводниковых приборов» (г. Йошкар-Ола) при поддержке Министерства промышленности и торговли была запущена единственная в Российской Федерации технологическая линия по изготовлению металлокерамических корпусов для поверхностного монтажа.

При создании термокомпенсированного кварцевого генератора важную роль играет стабилизация частоты в широком интервале рабочих температур. В процессе разработки генератора планировалось достичь высокой стабильности $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ в широком интервале рабочих температур от минус 60 °C до + 85 °C. Для создания высокочастотных колебаний в диапазоне от нескольких единиц до десятков МГц самое массовое распространение нашел кристалл со структурой AT-среза. У пластин такого типа проявляется кубическая зависимость частоты от температуры с точкой перегиба графика в интервале от 25 °C до 30 °C. Данная температурная характеристика AT-среза способна показать стабильные результаты для кварцевых генераторов и резонаторов в широком интервале температур, в отличие от BT, NT и CT срезов, которые имеют уже параболическую зависимость на температурно-частотном графике (рис. 1). Параболическая зависимость не позволит эксплуатировать кварцевые резонаторы в широком интервале рабочих температур и вызовет нестабильную работу пьезоэлектрического колебательного контура [3].

За счет своей твердости и упругости кварцевые пластинки имеют резонансные свойства: чем меньше толщина пластины, тем сильнее они проявляются. Эффект напрямую зависит от расположения кристаллографических осей относительно самой пластины. Формы кристаллических срезов, в последующем основополагающего элемента кварцевого резонатора, могут быть как круглыми и линзообразными, так и квадратными и прямоугольными.

Одноповоротный AT-срез позволяет кварцевой пластине работать за счет толщинно-сдвиговых колебаний в частотном диапазоне ультракоротких волн, в частности от 400 кГц до 40 МГц (по 1-й гармонике). За счет этого AT-срез приобрел широкое применение в радиоэлектронике. Несомненным положительным показателем является работа данного среза в большом температурно-частотном интервале от -60 °C до + 85 °C (рис. 2), сохраняя стабильность частоты. Более 90 % генераторов на базе кварцевого пьезоэлектрика выполнено в мире с применением AT-среза [4]. Стоит выделить его основные признаки:

- высокочастотные механические колебания пластины происходят на несущей частоте, но также и на нечетных обертонах;
- при перпендикулярном расположении пластины относительно оси Y в кристаллической структуре кварца ее угол составляет 35 °15' от заданной вертикальной оси Z с допустимым пределом расхождения, составляющим порядка 15'.

Зависимость изменения частотной характеристики от температуры окружающей среды выражена в виде полинома третьей степени, значение коэффициента которого основано на изменении действительного угла среза от его исходного положения 35 °15'. Значение точки при переходе нулевого значения относительного изменения частоты $\frac{\Delta f}{f}$ начинается при температурном значении в районе точки 25 °C.

Для изготовления пьезоэлектрических приборов с высокой частотой выходного сигнала важнейшим параметром, от которого зависит частотная характеристика элемента, является толщина изготовленной кристаллической пластины.

В настоящее время применение высокоточной технологии обработки кристаллических элементов в промышленных масштабах производится на искусственно выращенных кристаллах кварца, имеющих уже сформированную подходящую кристаллическую структуру [5].

Классический способ изготовления плоских кристаллических элементов включает в себя поэтапный процесс операции резки кварца на крупные заготовки пьезоэлектрических элементов, из которых затем получают кварцевые ориентированные секции требуемых размеров. Затем кварцевые ориентированные секции на специальном станке с помощью тонких натянутых металлических струн нарезаются на особо тонкие пластины (минимальная толщина 200 мкм), что позволяет получить необходимую толщину заготовок пластины для создания резонаторов высокой частоты. Важное значение уделяется механической шлифовке материала для достижения требуемых размеров. С применением химического травления появляется возможность довести более простые кристаллические элементы до сверхмалой толщины, которую крайне сложно реализовать способом механической обработки.

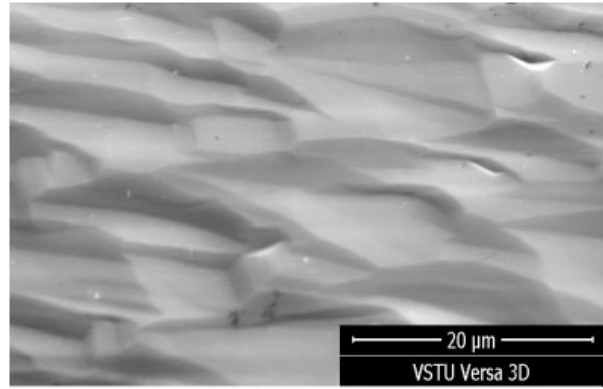
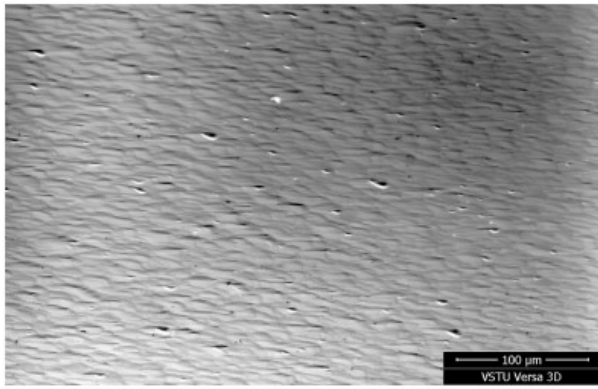


Рис. 3. Фотографии поверхности кварца после полирования с применением абразивной суспензии на основе оксида церия

Для получения сверхтонких материалов зачастую используют химико-динамическое травление в полирующих химическо-абразивных растворах, с помощью чего достигается устранение недостатков на поверхности элемента, таких как микроцарапины, изгибы и неровности.

В результате того, что кристаллические элементы в силу своей высокой твердости также обладают и хрупкостью, а сам технологический процесс резки, полирования и доведения материала до сверхтонкого состояния является технически сложным и трудоемким, конечное количество кварцевых пластин составляет порядка 50 %. Операция травления широко распространена на производственных предприятиях, однако процесс обработки материала, как правило, завершается шлифовкой кварцевой пластины. В таком случае готовый продукт имеет гораздо меньшие экономические затраты и больший выход готовой продукции, частотные характеристики которой по-прежнему остаются на высоком уровне добротности выходного сигнала.

После нарезки кристалла кварца на бруски, а затем и на тонкие заготовки, отшлифованные с применением первоначальной грубой пасты для устранения поверхностных недостатков, проводят ряд испытаний на калибровочном оборудовании. С помощью рентгеновского дифрактометра определяют точные частотные характеристики кварцевой пластины. Измерив несущую частоту кварцевой пластины, заготовки распределяются на группы, показатели которых находятся в одном интервале, а затем повторно дорабатываются на высокоточном шлифовальном оборудовании с применением микропорошков более высокого класса шероховатости. Характеристики будущего резонатора во многом зависят от геометрии кварцевой пластины. Показатели кварцевых пластин можно улучшить путем шлифования фасок на гранях прямоугольной заготовки.

Операции по шлифованию срезов для обеспечения заданной толщины пластины производят на двухсторонних доводочно-полировальных станках с применением абразивных суспензий на основе оксида церия, а также электрокорунда и синтетического алмаза. Партия пластин устанавливается в концентрически расположенные гнезда — кассеты, данная установка помещается между нижним и верхним полировальным диском, а затем автоматически добавляется полировальная суспензия. На производственном оборудовании предприятия АО «ЛИТ-ФОНОН» активно применяется первоначальное шлифование микропорошковой суспен-

зией M10, зернистость которой составляет от 7,2 до 10 мкм, а затем доводка поверхности с применением зернистости M7 и M5, класс точности последней достигает 2,2–3,0 мкм с шероховатостью обработанной поверхности до 0,1 мкм [6].

Понижение шероховатости поверхности пластин, на которые в последующем будут нанесены электроды, способствует повышению добротности будущего сигнала. Добротность в колебательном контуре определяется отношением реактивной энергии к сумме энергетических потерь за период механических колебаний, что является основополагающим фактором при определении коэффициента полезного действия системы. Именно благодаря устранению шероховатости на поверхности кварца и достигается высокий показатель добротности системы. По завершению калибровки пластины кварца повторно проходят через рентгенометр для установления конечных частотных характеристик.

На рис. 3 представлены электронные снимки поверхности кварцевой пластины после абразивной обработки [7].

По завершению калибровки и проверки на рентгеновском дифрактометре пластины кварца загружаются в специальную камеру для напыления электрода. На отполированные стороны пластин накладывается трафарет, который формирует итоговую форму и размер электрода на кварце. Следующим этапом идет напыление тонкого слоя серебра (Ag) и слоя хрома (Cr) толщиной 0,1 мкм. Доказано, что от толщины пленки хрома зависят различные свойства покрытия. Так, например, при толщине больше 1 мкм хром обеспечивает адгезию Ag на поверхности кварца и способен замедлять тепловое рассеивание атомов этих материалов на поверхности электрода при слое менее 0,1 мкм и практически не влияет на электропроводимость основного слоя серебра.

Реакции на поверхности электрода способствуют образованию новых твердых растворов $Cr + Ag$, которые способны обеспечить устойчивость металла к тепловому рассеиванию, тем самым сохраняя стабильность в непрерывной работе на десятки лет.

Нужно отметить, что при изготовлении кварцевых пьезоэлементов были применены только российские комплектующие и материалы.

В результате исследования тонких кварцевых пластин было установлено, что можно добиться необходимой стабильности частоты пьезоэлемента без нанесения слоя хрома.

Выбор металлокерамического корпуса был сделан в пользу DLCC 8/4-3 производства АО «Завод

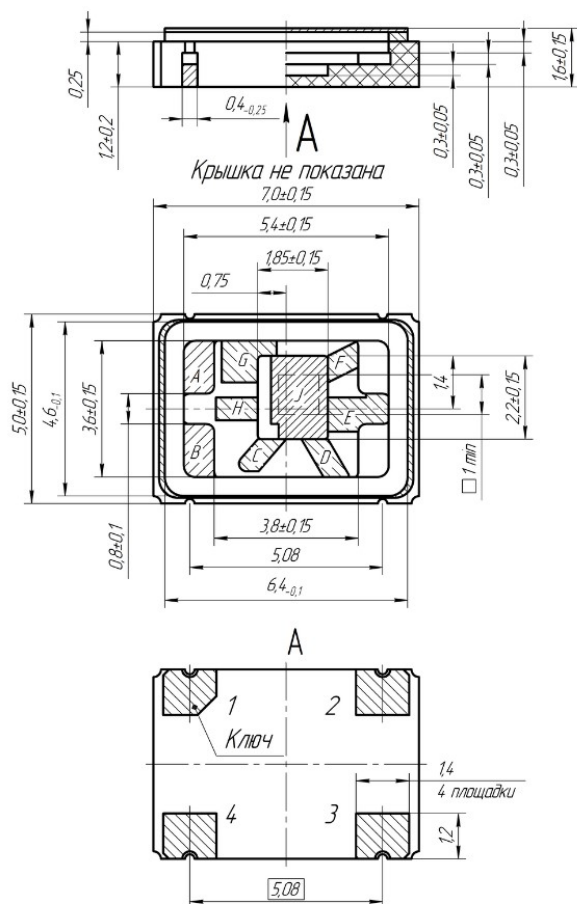


Рис. 4. Внешний вид корпуса DLCC 8/4-3

полупроводниковых приборов» (г. Йошкар-Ола) (рис. 4), поскольку технология изготовления полупроводникового кристаллического пьезоэлемента в похожем корпусе корейской фирмы Куосега была ранее отработана на производстве АО «ЛИТ-ФОНОН».

На производственном участке была произведена проверка пригодности металлокерамического корпуса DLCC 8/4-3, состоящего из основания и крышки, для изготовления кварцевых резонаторов. Металлокерамические корпуса соответствовали требованиям конструкторской документации завода-изготовителя.

Для отработки технологических процессов была запущена партия резонаторов в количестве 30 штук по конструкторско-технологической документации резонаторов РК486 на частоту 25 МГц. В процессе отработки техпроцессов выявлены следующие недостатки корпусов DLCC 8/4-3:

- отсутствие прямоугольной формы основания;
- отсутствие плоскостности и прямолинейности наружных боковых поверхностей, разброс по допускам габаритных размеров металлокерамических корпусов в одной партии, превышающий требования технологического оборудования;
- радиус скругления контура крышек ($r = 0,3$ мм), приводящий к нарушениям требований конструкторской документации на резонатор РК486 (аналог изготавливаемого резонатора);
- отсутствие повторяемости топологии и контуров контактных площадок;
- неравномерность структуры золотого покрытия контактных площадок.

В процессе производства резонаторов использовалось технологическое оборудование:

- FINEPLACER femto (монтаж кристаллов);
- Ion milling system for ceramic SMD oscillator GE-PMS 400 (плазменная настройка резонаторов);
- Parallel seam sealer NS-1380B (герметизация генераторов);
- МиниМаркет 2 (лазерная маркировка).

На операции герметизации блоков резонаторов роликовой сваркой выход годных составил 0 %. Внешний вид не соответствовал требованиям конструкторской документации ШКЖГ.433514.002 для резонаторов РК486. Однако резонаторы оказались герметичны. Электрические параметры соответствовали требованиям технических условий РК486, было принято решение продолжить исследование установленной партии. Из 30 штук резонаторов, запущенных в производство до предъявительских испытаний дошли 14 штук. Таким образом, выход годных резонаторов составил 46,6 %, если не учитывать внешний вид изделий.

Для стабилизации частоты резонаторов было принято решение провести термотренировку при температуре + 85 °С в течение 1000 часов.

Термотренировка — один из важных этапов изготовления кварцевых резонаторов. Термотренировка — это выдержка резонатора при высокой температуре на протяжении определенного времени. Данная технологическая операция предназначена для создания искусственного условия старения кварцевых резонаторов.

Процесс старения кварцевого резонатора — это комплекс разных физических процессов, которые с течением времени приводят к изменению резонансной частоты изделия. Поскольку большинство процессов стремятся вернуться в состояние термодинамического равновесия, то после их завершения резонатор переходит в стабильное состояние, а уходы частоты становятся незначительными, допустимыми для большинства приборов. Процесс старения считается сложным и многоэтапным, поэтому режим термотренировки подбирался экспериментально, отталкиваясь от условий эксплуатации определенного типа кварцевого резонатора.

Чаще всего термотренировка занимает больше времени, чем сам процесс изготовления резонатора. Большинство процессов, описывающих старение кварцевого резонатора, не могут позволить оценить поведение каждого изделия и сделать расчет наиболее подходящих режимов [7].

Кварцевые резонаторы подвергаются термотренировке на конечном этапе производства в специальной температурной камере. Одним из основных источников дестабилизации частоты является процесс старения. Это процесс изменения частоты кварцевого резонатора во времени при стабильных условиях работы вследствие необратимых изменений свойств кристаллов, крепежных элементов и связанных с ними устройств. При воздействии процесса старения в кварцевых резонаторах можно наблюдать несколько характерных особенностей:

- большее количество процессов старения описывается экспоненциальным законом уходов частоты резонаторов во времени. Плавный ход кривой старения нарушается несистематичностью, её величина и характер зависят от типа резонатора;
- скорость старения увеличивается с повышением температуры и уменьшается с понижением температуры;
- относительный уход частоты при старении и его характер зависят от свойств инертного газа в корпусе, где находится кварцевый пьезоэлемент.

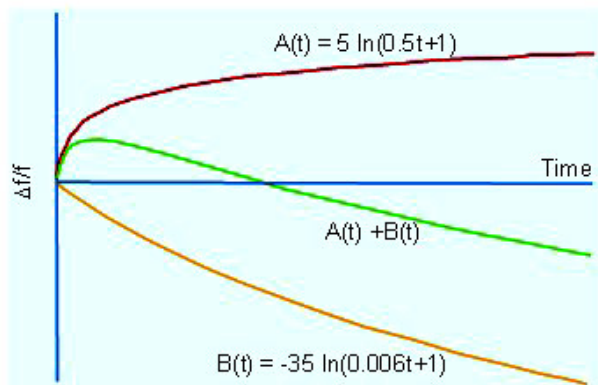


Рис. 5. Типичные изменения частоты со временем

Стоит отметить, что скорость изменения частоты во времени при постоянной температуре окружающей среды неодинакова. Наибольшая скорость изменения частоты наблюдается в течение первых нескольких недель, затем она резко уменьшается [8]. Большинство исследователей и разработчиков кварцевых резонаторов, занимающихся прогнозом надежности, считают, что долговременное изменение частоты во времени носит экспоненциальный характер. На первом этапе изменение частоты носит криволинейный характер, на втором этапе наблюдается линейный участок с небольшими изменениями частоты. Дж. Р. Виг считает, что существует три основных типа изменения частоты со временем, представленных на рис. 5 [9].

Для изучения процессов старения изготовленные на производстве АО «ЛИТ-ФОНОН» кварцевые резонаторы РК486 в количестве 14 штук установили на термотренировку при максимальной рабочей температуре + 85 °С, для того чтобы определить время стабилизации частоты и выйти практически на линейный участок зависимости $\Delta f/f(t)$. Замеры частоты проводились при следующих временных значениях: 0, 125, 250, 500, 750, 1000 часов.

Надо отметить, что замеры частоты резонаторов производились на стенде температурного контроля «Динар». Установка позволяет провести замеры частот резонаторов в интервале от 1 Гц до 100 МГц. Тем не менее точность замера уменьшается с увеличением частоты резонаторов. Для того чтобы избежать ошибки в расчетах отклонения частоты от нормы, нужно было определить погрешность замеров.

Для резонаторов в герметизированном корпусе применима размерность относительной частоты, которая выражается в относительных единицах. Чтобы уменьшить вероятность случайной ошибки, замеры резонаторов проводились в одних и тех же колодцах (гнездах) установки «Динар».

Замеры проводились с температурой + 25 °С, при низкой влажности воздуха и нормальном давлении. Первые замеры проводились для того, чтобы определить частоту каждого резонатора данной партии. После того как были проведены замеры, резонаторы извлекались из установки «Динар», и в течение 4-х часов оставались при неизменных условиях. Далее с теми же условиями проводились повторные замеры частот. В итоге были получены относительные уходы частот: их распределение изображено на рис. 6. С повторными замерами уход частоты меняется, но их интервал не становится больше. Размер уходов частоты резонаторов

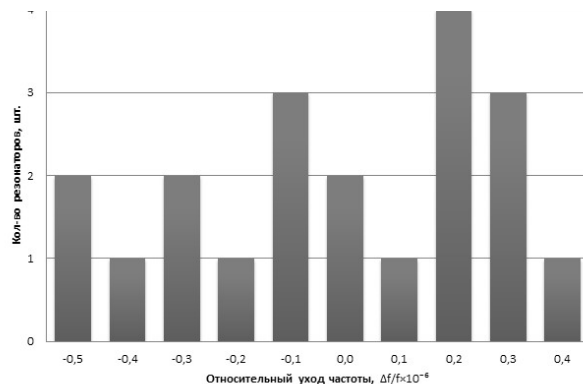


Рис. 6. Диаграмма распределения резонаторов по частотам

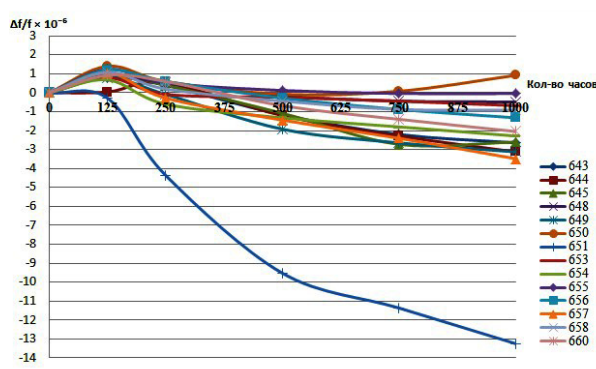


Рис. 7. График зависимости относительного ухода частоты от времени

находится в промежутке от $-0,5 \cdot 10^{-6}$ до $+0,4 \cdot 10^{-6}$. Из проведенного опыта можно сделать вывод, что погрешность измерения частоты установки «Динар» не превышает $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$. Полученный результат означает, что абсолютная ошибка замеров частоты резонаторов с номинальной частотой 25 МГц на установке «Динар» не превышает 12,5 Гц.

Результаты измерений параметров кварцевых резонаторов в процессе испытаний за 1000 часов приведены на рис. 7. По результатам испытаний можно сделать вывод, что стабилизация резонаторов наступает в точке 250 часов. Резонатор № 651 имеет существенное отличие в поведении от остальной партии изделий и не пригоден для термокомпенсации. Разброс по частоте остальных резонаторов за 1000 часов колеблется в диапазоне от $-4 \cdot 10^{-6}$ до $+1 \cdot 10^{-6}$. Т.е. если применять данный тип резонаторов в составе термокомпенсированных генераторов однократного программирования с помощью полинома 3-го или 5-го порядка будет достаточным, чтобы получить стабильность частоты $\pm 1 \cdot 10^{-7}$. Однако потребуются подстройка частоты в процессе эксплуатации подачей напряжения на вход коррекции.

Для того чтобы определить разбросы по частоте в партии испытываемых резонаторов в части вариации коэффициентов полиномов, было проведено пятикратное измерение температурно-частотной характеристики (далее по тексту — ТЧХ) каждого изделия в диапазоне от -60 °С до $+85$ °С. В камере термостата устанавливалось нижнее температурное значение -60 °С с выдержкой 15 минут. Повышая температуру в камере термостата через каждый 1 °С, производились измерения частоты. Максимальное относительное изменение частоты резона-

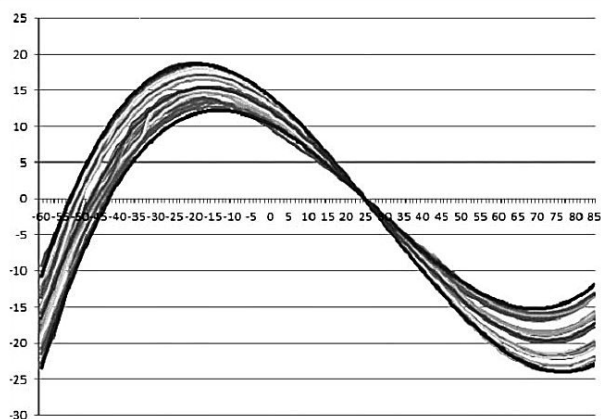


Рис. 8. Полученные результаты измерения ТЧХ кварцевых резонаторов РК486

Таблица 1

Среднее, максимальное и минимальное значение относительного ухода частоты резонаторов от изменения температуры

Т °С	сред.	макс.	мин.
-60	-16,51	-9,35	-22,88
-50	-3,17	2,67	-8,21
-40	6,56	11,17	2,47
-30	12,81	17,21	8,73
-20	15,23	18,77	11,74
-10	14,85	17,5	12,64
0	12,18	14,16	9,73
10	8,06	9,27	6,2
20	2,83	3,21	2,12
25	0	0	0
30	-2,9	-3,37	-2,3
40	-8,62	-9,95	-6,72
50	-13,77	-16,17	-11,28
60	-17,61	-20,9	-14,33
70	-19,5	-23,57	-15,46
80	-18,79	-23,49	-13,84
85	-17,29	-22,52	-11,94

торов в интервале температур определяют по формулам:

$$\frac{\Delta f_1}{f_p} = \frac{f_{\max} - f_p}{f_p},$$

$$\frac{\Delta f_2}{f_p} = \frac{f_{\min} - f_p}{f_p},$$

где f_{\max} , f_{\min} — наибольшее и наименьшее значения частоты резонатора в интервале температур;

f_p — измеренное значение рабочей частоты резонатора при температуре $25 \pm 0,5$ °С [10].

Полученные результаты измерения ТЧХ приведены на рис. 8. Получены средние, максимальные и минимальные значения разбросов по углу среза для резонаторов АТ-среза, подходящих для термокомпенсации. Результаты измерения относительно-

го ухода частоты от изменения температуры приведены в табл. 1.

Выводы

1. Металлокерамические корпуса фирмы АО «Завод полупроводниковых приборов» (г. Йошкар-Ола) не оптимально подходят для существующего технологического процесса на предприятии АО «ЛИТ-ФОНОН». Разброс по допускам габаритных размеров корпусов в одной партии превышает требования технологического оборотования.

2. Выход годных резонаторов составил 46,6 %, если не брать в расчет требования, установленные к внешнему виду, т.е. достаточно низкий.

3. Погрешность измерения стенда температурного контроля «Динар» не превышает $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$. Такая высокая погрешность не позволяет оценить стабильность частоты $\pm 1 \cdot 10^{-7}$, необходимо приобретение более точной прецизионной установки для измерения ТЧХ в заданном диапазоне, если в дальнейшем применять изделия в составе термокомпенсированных генераторов.

4. Разброс по частоте изготовленных резонаторов в процессе термотренировки за 1000 часов при температуре $+85$ °С изменяется в диапазоне от $-4 \cdot 10^{-6}$ до $+1 \cdot 10^{-6}$. Т.е. для данного типа резонаторов однократное программирование с помощью полинома 3-го или 5-го порядка будет недостаточным, чтобы получить стабильность частоты $\pm 1 \cdot 10^{-7}$, потребуется коррекция частоты в процессе эксплуатации.

5. Оптимальные значения ТЧХ резонаторов для применения в термокомпенсированных кварцевых генераторах должны находиться в зоне между темно-серыми кривыми линиями (рис. 8), которые характеризуют коридор возможного технологического разброса по углу среза. На этапе изготовления кварцевых резонаторов надо стремиться достичь значения ТЧХ близкие к средней частоте (центральная серая линия на рис. 8).

Библиографический список

- Косых А. В. Источники высокостабильных колебаний на основе кварцевых генераторов с цифровой термокомпенсацией: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2006. 508 с. EDN: SUJLKL.
- Бойчук М. И. Цифровой термокомпенсированный кварцевый генератор в керамическом корпусе для поверхностного монтажа: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019. 164 с.
- Косых А. В., Рой А. А., Мурашко Д. Н. Моделирование реального температурного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру // Омский научный вестник. 2001. № 14. С. 139–143.
- Бойчук М. И. Влияние креплений на температурно-частотную характеристику резонаторов // Компоненты и технологии. 2011. № 9 (122). С. 188–190. EDN: NYBLYL.
- Бойчук М. И., Грузиненко В. Б. Требование к качеству пьезоэлектрических монокристаллов кварца в производстве высокочастотных и микроминиатюрных резонаторов ВЧ- и СВЧ-диапазона // Компоненты и технологии. 2011. № 3 (116). С. 146–147. EDN: NCWVMT.
- Пат. 27122426 Российская Федерация, МПК H03H 3/02. Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов / Бойчук М. И., Власов К. В., Черпухина Г. Н. и [и др.]. № 2019104435; заявл. 18.02.2019; опубл. 28.01.2020. Бюл. № 4. 8 с.
- Бойчук М. И., Глазунова Ю. А., Пашков С. С. [и др.]. Исследование долговременной стабильности кварцевых резонаторов // Компоненты и технологии. 2022. № 2 (247). С. 14–18. EDN: CDZQFD.

8. Бойчук М. И., Кривоногов В. Е., Микаева С. А. [и др.]. Исследование надежных характеристик кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах // Russian Technological Journal. 2022. № 10 (2). 43–50. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50. EDN: AJBNFO.

9. Vig J. R. Quartz Crystal Resonators and Oscillators. New Jersey: Development & Engineering Center Fort Monmouth, 2004. 305 p. URL: https://docs.amnuts.ru/eevblog.docs/eBooks/quartz_crystal_resonators_and_oscillators___for_frequency_control_and_timing_applications.pdf (дата обращения: 15.09.2023).

10. Хоменко И. В., Косых А. В. Кварцевые резонаторы и генераторы. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. 159 с. ISBN 978-5-8149-2583-1.

БОЙЧУК Максим Иванович, кандидат технических наук, начальник службы контроля качества продукции — главный контролер, руководитель испытательной лаборатории АО «ЛИТ-ФОНОН»,

г. Москва; старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Современные системы радиосвязи» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 5576-1384

AuthorID (РИНЦ): 873302

ORCID: 0000-0001-8217-4546

Адрес для переписки: boychukmi@gmail.com

Для цитирования

Бойчук М. И. Исследование кварцевых резонаторов в миниатюрных металлокерамических корпусах с целью дальнейшего применения в термокомпенсированных генераторах // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 135–143. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-135-143.

Статья поступила в редакцию 19.10.2023 г.

© М. И. Бойчук

STUDY FOR QUARTZ RESONATORS IN MINIATURE METAL-CERAMIC PACKAGE FOR FURTHER USE IN TEMPERATURE-COMPENSATED OSCILLATORS

With the advent of new technologies, the requirements for the sources of reference vibrations are becoming more stringent. They must be compact, quickly reach frequency, operate in a wide temperature range and have a small relative frequency drift in the operating temperature range.

Changes in ambient temperature are the most destabilizing factor for the oscillator output frequency. Ensuring frequency stability over a wide temperature range is a pressing task.

Thermal compensation allows increasing frequency stability over a wide range of operating temperatures. This is achieved by compensating for the effect of the destabilizing factor on the generator so that the frequency drift tends to zero as the temperature changes. Temperature-compensated quartz oscillators are highly stable and have a short readiness time. However, to create generators with a frequency stability of $\pm 0,1$ ppm, imported components are required, which makes their production difficult in modern conditions.

A technological chain is created at the JSC «LIT-PHONON», which allows producing a quartz resonator using only Russian components. The goal is to use these resonators in temperature-compensated oscillators with frequency stability of $\pm 0,1$ ppm. However, the analysis showed that the resonators have problems with frequency drift over time during operation at a maximum operating temperature of $+ 85$ °C. Additional adjustment of generators during operation is required. It is also revealed that some Russian components are not ideally suited to the developed technological process, which may negatively affect the yield of suitable products. The measuring setup also has an error of $\pm 0,5$ ppm, which does not allow an accurate assessment of the frequency stability of the resonators.

Keywords: quartz, oscillator, resonator, temperature-compensation, metal-ceramic package, crystal element, cut-off angle, frequency stability.

References

1. Kosykh A. V. Istochniki vysokostabil'nykh kolebaniy na osnove kvartsevykh generatorov s tsifrovoy termokompensatsiyey [Sources of highly stable oscillations based on quartz oscillators with digital temperature compensation]. Omsk, 2006. 508 p. EDN: SUJLKL. (In Russ.).
2. Boychuk M. I. Tsifrovoy termokompensirovanny kvartsevy generator v keramicheskom korpuse dlya poverkhnostnogo montazha [Digital temperature compensated crystal oscillator in ceramic surface mount housing]. Moscow, 2019. 164 p. (In Russ.).
3. Kosykh A. V., Roy A. A., Murashko D. N. Modelirovaniye real'nogo temperaturnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu [Modeling of real temperature impact on radio electronic equipment] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2001. No. 14. P. 139–143. (In Russ.).
4. Boychuk M. I. Vliyaniye krepleniy na temperaturno-chastotnuyu kharakteristiku rezonatorov [The effect of fasteners on the temperature-frequency response of resonators] // Komponenty i tekhnologii. *Components and Technologies*. 2011. No. 9 (122). P. 188–190. EDN: NYBLYL. (In Russ.).
5. Boychuk M. I., Gruzinenko V. B. Trebovaniye k kachestvu pyezoelektricheskikh monokristallov kvartsa v proizvodstve

6. Patent 27122426 Russian Federation, IPC H03H 3/02. Sposob izgotovleniya tonkikh kristallicheskikh plastin i tonkikh kristallicheskikh elementov [Method of making thin crystalline plates and thin crystalline elements] / Boychuk M. I., Vlasov K. V., Cherpukhina G. N. [et al.]. No. 2019104435. (In Russ.).
7. Boychuk M. I., Glazunova Yu. A., Pashkov S. S. [et al.]. Issledovaniye dolgovermennoy stabil'nosti kvartsevykh rezonatorov [Study of long-term stability of quartz resonators] // Komponenty i tekhnologii. *Components and Technologies*. 2022. No. 2 (247). P. 14–18. EDN: CDZQFD. (In Russ.).
8. Boychuk M. I., Krivonogov V. E., Mikayeva S. A. [et al.]. Issledovaniye nadezhnostnykh kharakteristik kvartsevykh rezonatorov v miniatyurnykh keramicheskikh korpusakh [Study of the reliability of quartz resonators in miniature ceramic packages] // Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal. *Russian Technological Journal*. 2022. No. 10 (2). P. 43–50 DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-2-43-50. EDN: AJBNFO. (In Russ.).

9. Vig J. R. Quartz Crystal Resonators and Oscillators. New Jersey: Development & Engineering Center Fort Monmouth, 2004. 305 p. URL: https://docs.amnnuts.ru/eevblog.docs/eBooks/quartz_crystal_resonators_and_oscillators_for_frequency_control_and_timing_applications.pdf (accessed: 15.09.2023). (In Engl.).

10. Khomenko I. V., Kosykh A. V. Kvaritsevyye rezonatory i generatory [Quartz resonators and oscillators]. Omsk, 2018. 159 p. ISBN 978-5-8149-2583-1. (In Russ.).

BOYCHUK Maxim Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Product Quality Control Service, Chief Inspector, Head of the Testing Laboratory of JSC «LIT-PHONON», Moscow; Senior Researcher at

the Scientific Research Laboratory «Modern Radio Communication Systems», Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 5576-1384

AuthorID (RSCI): 873302

ORCID: 0000-0001-8217-4546

Correspondence address: boychukmi@gmail.com

For citations

Boychuk M. I. Study for quartz resonators in miniature metal-ceramic package for further use in temperature-compensated oscillators // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 135–143. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-135-143.

Received October 19, 2023.

© **M. I. Boychuk**

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ МГНОВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

В статье предложен новый способ измерения частоты на основе однобитного аналого-цифрового преобразователя. В отличие от известного способа измерения частоты с использованием линии задержки, разработанная структурная схема измерителя, реализующая предложенный способ, позволяет избавиться от линий задержки для измерения частоты в широком диапазоне частот и резко сократить массогабаритные параметры всего измерителя при интегральной реализации. В отличие от других известных цифровых измерителей, данные о которых имеются в печатных источниках, предложенный способ позволяет повысить точность измерения частоты в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: мгновенное измерение частоты, однобитное аналого-цифровое преобразование, линия задержки, фазовращатель, микросхема мгновенного измерения частоты.

Актуальность. История появления устройств для мгновенного измерения частоты (МИЧ) уходит в далекий 1958 год [1, 2]. Предложенная идея измерения частоты была реализована в структуре измерителя на основе линии задержки. В классическом методе измерения частоты на основе линии задержки сигнал с частотой f разветвляется на два канала — прямой и с линией задержки. Если величина задержки равна τ , то разность фаз между двумя сигналами будет равна $d\theta = 2\pi f\tau$. Таким образом, если разность фаз между этими двумя сигналами сравнивается с помощью фазового компаратора, результат будет пропорционален частоте сигнала. Такому способу измерения частоты посвящены многие работы [2–16]. Классические структурные решения для измерения частоты обладают рядом недостатков — при их реализации в узкой полосе частот измерители могут быть относительно компактны и просты, при этом на низких частотах размеры линии задержки имеют значительные размеры [15, 17, 18]. Также устройствам на линии задержки свойственны неопределенности в определении фазы, что решается внесением в структуру измерителя дополнительных линий задержки [6, 9, 14], что приводит к увеличению массогабаритных параметров. А современная тенденция в формировании требований к устройству как раз противоположная и заключается в стремлении реализовать весь измеритель частоты в интегральном виде на одном кристалле. Один из способов увеличения диапазона рабочих частот реализуется в DIFM-структурах (сокращение «DIFM» означает «Digital Instantaneous Frequency Measurement Receivers» («цифровой приемник для

мгновенного измерения частоты»)). Такие структуры представляют собой несколько параллельно соединенных узкополосных измерителей, каждый из которых содержит фазовый дискриминатор, линию задержки различной длины и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Обязательным элементом DIFM-структуры является разветвитель на несколько каналов, который вносит значительные потери в тракте при большом количестве узкополосных измерителей [19–21]. Линии задержки в структуре DIFM обычно имеют геометрическое соотношение длин, а оцифрованные значения фаз сигналов на выходе линий задержек обрабатываются для обеспечения высокой точности и устойчивости к системным ошибкам. Самая длинная линия задержки определяет точность частоты, ограниченную характеристиками измерения фазы первым фазовым дискриминатором, тогда как более короткие линии постепенно разрешают неопределенности измерения фазы более длинной линии. Цифровые устройства МИЧ типа DIFM являются направлением, с помощью которого расширяют полосу рабочих частот. Такие структурные решения (DIFM) также отличаются громоздкостью, поскольку не исключают необходимость применять линии задержки [16]. Хотя DIFM широко распространены, поскольку идея параллельного соединения узкополосных каналов позволяет перекрыть большой диапазон частот, выполнить унификацию подканалов при обеспечении высокой точности измерения частоты, современная тенденция в технике МИЧ заключается в отказе от традиционных структур с целью минимизации аналоговых пассивных ком-



Рис. 1. Структурная схема цифрового измерителя частоты

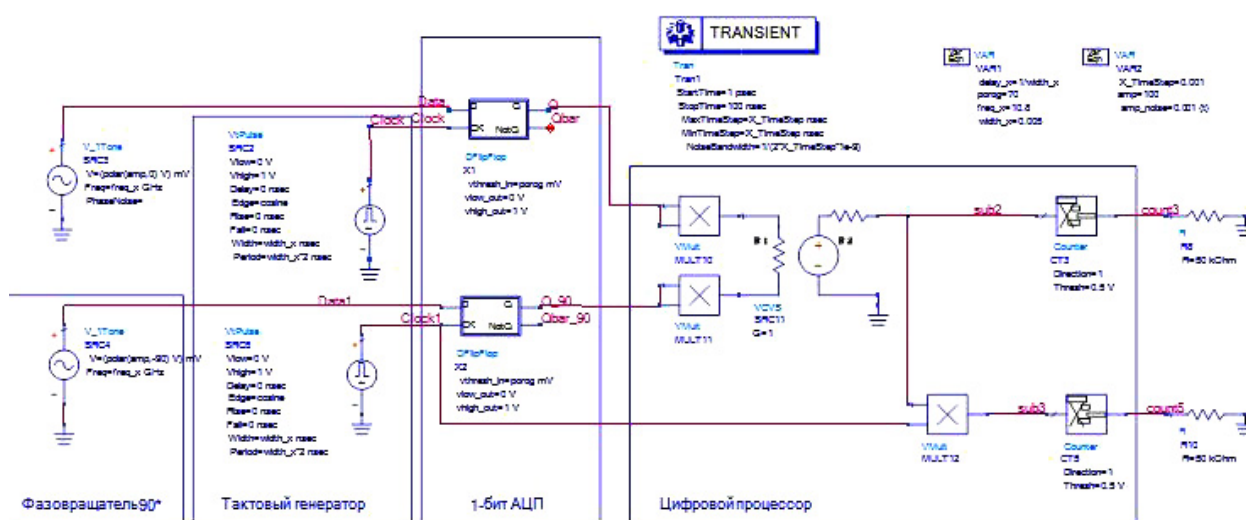


Рис. 2. Модель цифрового измерителя частоты в САПР ADS Keysight

понентов, таких как фазовращатели, линии задержки, многоканальные СВЧ разветвители. Современная структура МИЧ приемника — это структура на основе однобитного АЦП [2, 11]. Анализ литературных источников показал, что в релевантных статьях описываются общие идеи по реализации таких измерителей, анализ и исследование факторов принципиально ограничивающих параметры отсутствуют. Частично проблематика по обработке сигналов в цифровой структуре с АЦП описана в [22–26], а возможности применения однобитных АЦП в [27–39]. Поэтому считаем актуальным решение задач: разработка структуры цифрового измерителя; формирование алгоритма всей процедуры измерения; исследование структуры цифрового измерителя на идеализированных компонентах на предмет потенциально ограничивающих факторов.

Методология. Цель статьи — предложить новый способ измерения частоты с минимальным набором аналоговых компонентов, таких как линии задержки и фазовращатели для минимизации массогабаритных параметров. Структурная схема измерителя представлена на рис. 1. Структура состоит из однобитного АЦП, который в простейшем случае представляет собой тактируемый D -триггер, СВЧ источника тактовых импульсов, фазовращателя входного сигнала на 90° и цифрового процессора, который на основе выполнения обработки двух потоков данных формирует данные о значении частоты входного сигнала.

Исследование структуры цифрового измерителя частоты. Модель на идеализированных компо-

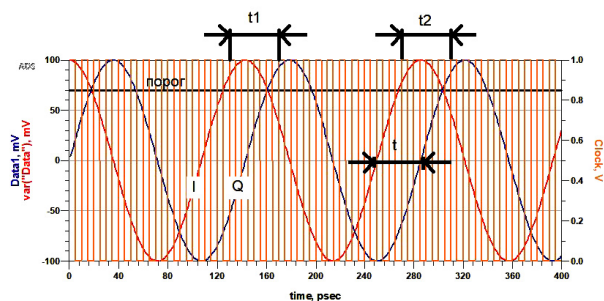


Рис. 3. К определению частоты входного сигнала

нентах цифрового измерителя частоты, реализованная в САПР (ADS Keysight (2021)), приведена на рис. 2. Модель содержит два источника гармонических сигналов, один из которых сдвинут на 90° относительно другого — два источника с фазовым сдвигом реализуют фазовращатель ВЧ сигнала в структурной схеме на рис. 1. Гармонические сигналы поступают на два тактируемых D -триггера с логическими выходами 0 В и 1 В, порог срабатывания триггера (переменная `porog` на рис. 2) задается в списке переменных VAR1 и меняется при исследовании. Источники тактовых импульсов `VtPulse` идентичные, период следования импульсов `width_x*2` задается через переменную `width_x` в списке VAR1. На выходах триггеров формируются тактированные квадратурные сигналы, сдвинутые по фазе на 90° . Компоненты `VMult` выполняют функцию перемножения сигналов, перемножители `VMult` в позициях

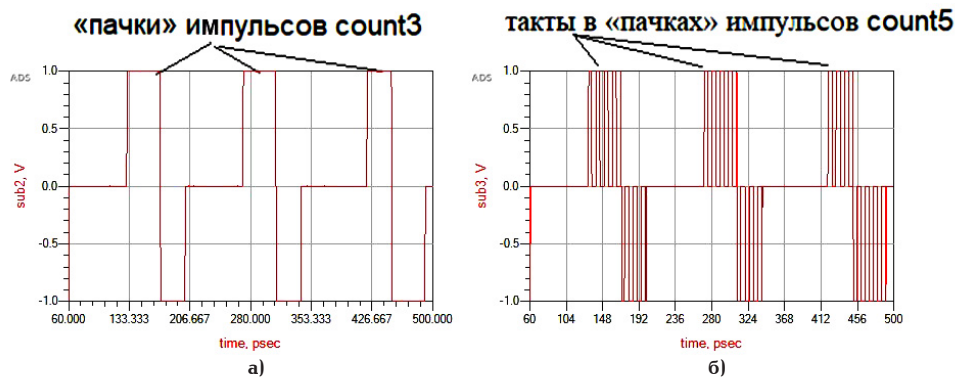


Рис. 4. Осциллограммы сигналов sub2, sub3 на рис. 2

MULT10 и MULT11 являются буферными повторителями для корректной работы источника напряжения управляемого напряжением VCVS. В модели (рис. 2) MULT10, MULT11 и VCVS реализуют функцию разности цифровых квадратур (сигналы Q и Q_{-90} на рис. 2). Компоненты Counter выполняют подсчет импульсов — регистрируется количество фронтов импульсов с порогом 0,5 В. Основная задача измерителя заключается в определении времени между первым импульсом в канале I и первым импульсом в канале Q в соответствии с рис. 3. Так как сдвиг по фазе между сигналами I и Q составляет 90° , то определив количество тактовых импульсов, которые заполняют этот промежуток времени (t_1 или t_2), и, умножив на четыре, можно определить период (и, соответственно, частоту) входного сигнала. Количество тактовых импульсов, которые заполняют интервалы t_1 , t_2 и последующие интервалы для входного гармонического сигнала (в идеализированной модели без учета множественных факторов, связанных с не идеальностями отдельных реальных узлов схемы) определяется соотношением значения измеряемой частоты и длительности тактовых импульсов, порога срабатывания. Наиболее неопределенная ситуация с измерением частоты (рис. 2) может возникнуть, когда значение измеряемой частоты **близко** к частоте следования тактовых импульсов и порог срабатывания D -триггера **близок** к амплитудному значению входного гармонического сигнала. В предложенной модели для минимизации влияния указанных эффектов за **большое** время наблюдения (в работе время наблюдения 20 нс) выполняется подсчет: общего количества тактовых импульсов; числа интервалов или «пачек» импульсов t_1 , t_2 , ..., N ; общего числа тактовых импульсов, которые заполняют интервалы t_1 , t_2 , ..., N . Осциллограммы «пачек» импульсов и их заполнение показано на рис. 4 — сигнал sub2 является результатом вычитания квадратур $sub2 = Q - Q_{-90}$ (рис. 2), сигнал sub3 является результатом наполнения сигнала разности sub2 тактовыми импульсами. Далее в цифровом процессоре (рис. 2) выполняется определение среднего значения числа тактовых импульсов $\langle K_{имп} \rangle$ на интервал t как отношение числа тактов в «пачках» count5 (рис. 4б) к числу «пачек» count3 (рис. 4а), перемножение значения $\langle K_{имп} \rangle$ на длительность одного такта (в модели на рис. 2 это значение width_x·2) и определение частоты входного сигнала определяется как $f = 1/(\langle K_{имп} \rangle \cdot width_x \cdot 2 \cdot 4)$. В цифровом процессоре также выполняется коррекция значения частоты входного сигнала.



Рис. 5. Отклонение частоты измерителя без цифровой коррекции при разных тактовых частотах и уровнях ограничения в широком диапазоне частот

На рис. 5 показано отклонение частоты измерителя без цифровой коррекции при разных тактовых частотах в широком диапазоне частот от 0,76 ГГц до 18 ГГц при величине амплитуды входного сигнала 100 мВ:

- freq_50G_10m_model — порог ограничения 10 мВ, тактовая частота 50 ГГц;
- freq_50G_70m_model — порог ограничения 70 мВ, тактовая частота 50 ГГц;
- freq_100G_10m_model — порог ограничения 10 мВ, тактовая частота 100 ГГц;
- freq_100G_70m_model — порог ограничения 70 мВ, тактовая частота 100 ГГц.

В соответствии с графиком на рис. 5 отклонение частоты в нижней части диапазона наименьшее (при частоте входного сигнала 0,76 ГГц отклонение составляет минус 25 МГц для зависимости freq_50G_70m_model и минус 6 МГц для зависимости freq_50G_10m_model) и увеличивается значительно на верхней частоте 18 ГГц. При этом при тактовой частоте 50 ГГц система «насыщается» и теряет способность определять значение частоты входного сигнала свыше примерно 12 ГГц.

На рис. 6–7 показаны зависимости значений частоты измерителя без цифровой коррекции от порога D -триггера при частоте входного сигнала 2,4 ГГц и 10,8 ГГц при разных тактовых частотах (50 и 100 ГГц):

- fs50G_f2_4G — тактовая частота $fs = 50$ ГГц на частоте $f = 2,4$ ГГц;
- fs100G_f2_4G — тактовая частота $fs = 100$ ГГц на частоте $f = 2,4$ ГГц;
- fs50G_f10_8G — тактовая частота $fs = 50$ ГГц на частоте $f = 10,8$ ГГц;

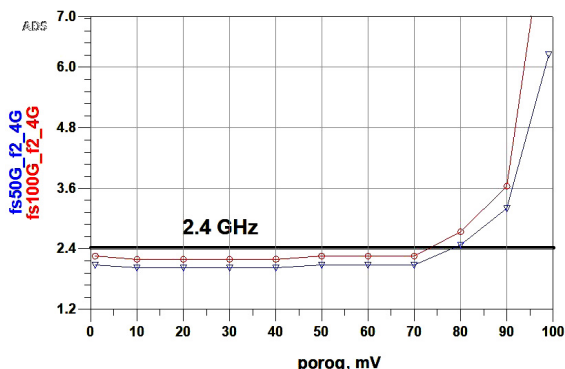


Рис. 6. Зависимость значения частоты измерителя без цифровой коррекции от порога D-триггера при частоте 2,4 ГГц

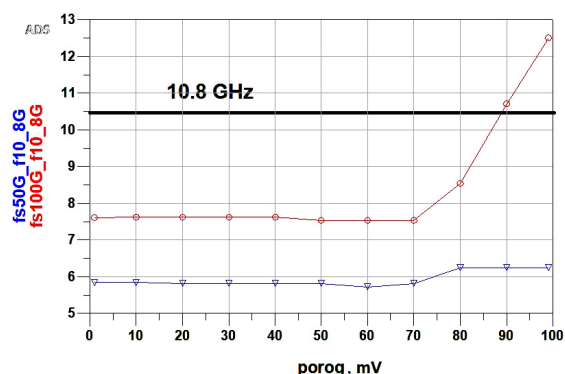


Рис. 7. Зависимость значения частоты измерителя без цифровой коррекции от порога D-триггера при частоте 10,8 ГГц

— $fs100G_f10_8G$ — тактовая частота $fs = 100$ ГГц на частоте $f = 10,8$ ГГц.

Данные зависимостей на рис. 6–7 позволяют сделать важный вывод о том, что предложенная модель измерения частоты практически не чувствительна к порогу ограничения, то есть динамический диапазон входного сигнала может быть расширен по сравнению с известными измерителями частоты на основе линии задержки, которые требуют на входе наличие усилителя-ограничителя.

Повышение точности измерения частоты в предложенной модели реализуется за счет цифровой коррекции. На рис. 8 показана зависимость среднего количества накопленных тактовых импульсов

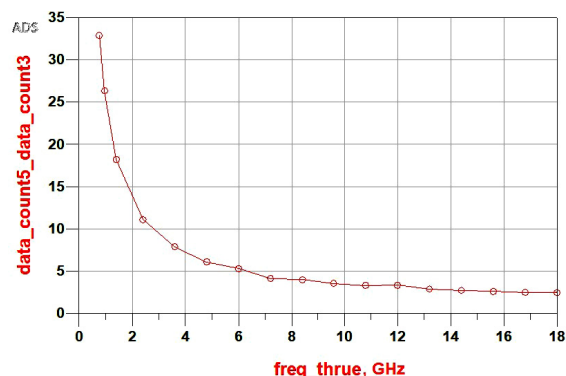
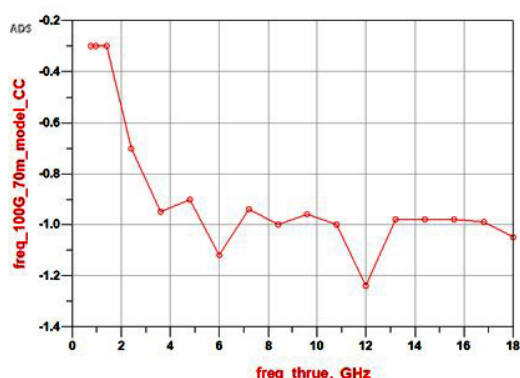


Рис. 8. Среднее количество накопленных тактовых импульсов $\langle K_{умп} \rangle$ за время наблюдения 20 мс в широком диапазоне частот на один интервал времени t (рис. 3)

$\langle K_{умп} \rangle$ за время наблюдения 20 мс в широком диапазоне частот на один интервал времени t (рис. 3) для тактовой частоты 100 ГГц и пороге ограничения 70 мВ. Если скорректировать значение $\langle K_{умп} \rangle$, можно значительно повысить точность измерения частоты. График зависимости и корректирующие коэффициенты показаны на рис. 9.

На рис. 10 показана зависимость значения частоты при тактовой частоте 100 ГГц и пороге ограничения 70 мВ без коррекции (кривая «а», рис. 10), с двухдиапазонной коррекцией в нижней части диапазона с коэффициентом минус 0,3 и в верхней со средним значением минус 0,868 (кривая «б», рис. 10) и многочастотной коррекцией для каждой частотной точки в соответствии с рис. 9 (кривая «в», рис. 10). На рис. 11 показано, что отклонение частоты при применении цифровой коррекции составляет плюс 20 минус 70 МГц и может быть еще уменьшено за счет уточнения коэффициентов коррекции.

Заключение. Предложенная структура цифрового измерителя частоты позволяет выполнить мгновенное измерение частоты в сверхшироком диапазоне частот с минимальным количеством тактовых импульсов, как линии задержки и фазовращатели, которые, при практической интегральной реализации в сантиметровом диапазоне длин волн, могут занимать на кристалле значительную площадь. Исследование модели измерителя в САПР показало, что предложенная структура на базе одноканального АЦП линейна с точки зрения уровня ВЧ сигнала, который необходимо обеспечить на входе и, благодаря этому свойству, не требует



freq_thruе	freq_100G_70m_model_CC
0.760	-0.300
0.960	-0.300
1.400	-0.300
2.400	-0.700
3.600	-0.950
4.800	-0.900
6.000	-1.120
7.200	-0.940
8.400	-1.000
9.600	-0.960
10.800	-1.000
12.000	-1.240
13.200	-0.980
14.400	-0.980
15.600	-0.980
16.800	-0.990
18.000	-1.050

Рис. 9. Значения коэффициентов частотной коррекции

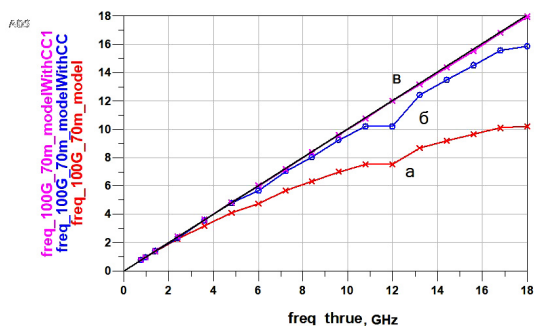


Рис. 10. Значение частоты при высокой тактовой частоте без коррекции (кривая «а»), с двухдиапазонной коррекцией (кривая «б») и мультиспектральной коррекцией (кривая «в») при пороге ограничения 70 мВ

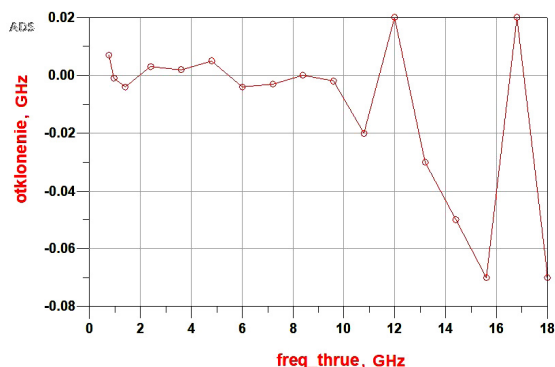


Рис. 11. Отклонение частоты при тактовой частоте 100 ГГц, мультиспектральной коррекцией и пороге ограничения 70 мВ

на входе сложного и многокаскадного усилителя-ограничителя как в измерителе на основе линии задержки. Принципиальным ограничением по рабочему диапазону частот сверху является значение частоты тактового генератора. Так, исследование модели предложенной структуры измерителя показало, что при использовании тактового генератора 100 ГГц и цифровой коррекции диапазон рабочих частот сверху может быть не менее 18 ГГц. При этом точность измерения частоты во многом определяется точностью и количеством корректирующих коэффициентов. Необходимо отметить, что реализация СВЧ генераторов с частотами десятки ГГц находится на переднем крае научно-технологических достижений. Разработка и изготовление таких сверхвысокочастотных генераторов выполняется с использованием современных технологий, например, БиКМОП (BiCMOS) на основе кремний-германиевых (SiGe) структур. Можно считать, что предложенная методика позволяет измерять частоту реального входного сигнала с высокой точностью, а также позволяет проводить оптимизацию времени и точности измерения по критериям удовлетворения требованиям технического задания на уровне программного обеспечения.

Библиографический список

1. Bendat J. S. Principle and Applications of Random Noise Theory. New York: Wiley, 1958. 431 p.
2. East P. W. Fifty years of instantaneous frequency measurement // IET Radar, Sonar & Navigation. 2012. No. 6. P. 112–122. DOI:10.1049/iet-rsn.2011.0177.

3. Collins J. H., Grant P. M. A review of current and future components for electronic warfare receivers // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1981. Vol. 28, no. 3. P. 117–125. DOI: 10.1109/T-SU.1981.31234.
4. Blerkom R. Van, Freeman D. G., Crutchfield R. C. Frequency Measurement Techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1968. Vol. 17, no. 2. P. 133–145. DOI: 10.1109/TIM.1968.4313684.
5. Василенко В. Э., Дикарев Б. Д., Зикий А. Н. [и др.]. Экспериментальное исследование приёмника мгновенного измерения частоты // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 3 (80). С. 168–171. EDN: KNOFGV.
6. Kvachev M. A., Puzyrev P. I., Semenov K. V. Research of Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306185.
7. Егоров Н., Кочемасов В. Мгновенное измерение частоты: методы и средства // Электроника: наука, технология, бизнес. 2017. № 5 (00165). С. 136–141. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141. EDN: YTXAT.
8. Mazim N. J. N. B., Ain M. F., Hassan S. I. S. ADS simulation of 2 to 5 GHz IFM correlator // 2005 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics. Johor, Malaysia, 2005. P. 203–206. DOI: 10.1109/APACE.2005.1607807.
9. Gruchala H., Czyzewski M. The instantaneous frequency measurement receiver in the complex electromagnetic environment // 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (IEEE Cat. No. 04EX824). Warsaw, Poland, 2004. Vol. 1. P. 155–158. DOI: 10.1109/MIKON.2004.1356885.
10. Lam D., Buckley B. W., Lonappan C. K. [et al.]. Ultra-wideband instantaneous frequency estimation // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2015. Vol. 18, no. 2. P. 26–30. DOI: 10.1109/MIM.2015.7066680.
11. Pandolfi C., Fitini E., Gabrielli G. [et al.]. Comparison of analog IFM and digital frequency measurement receivers for electronic warfare // The 7th European Radar Conference. Paris, France, 2010. P. 232–235.
12. Thornton M. J. Ultra-broadband frequency discriminator designs for IFM receivers // IEE Colloquium on Multi-Octave Active and Passive Components and Antennas. London, UK, 1989. P. 13/1–13/4.
13. Goavec A., Vauché R., Gaubert J. [et al.]. Instantaneous frequency measurement for IR-UWB signal in CMOS 130 nm // 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Monte Carlo, Monaco, 2016. P. 157–160. DOI: 10.1109/ICECS.2016.7841156.
14. Rahimpour H., Masoumi N. Design and Implementation of a High-Sensitivity and Compact-Size IFM Receiver // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68, no. 7. P. 2602–2609. DOI: 10.1109/TIM.2018.2866312.
15. Wu Ruey-Beei, Chao Fang-Lin. Flat spiral delay line design with minimum crosstalk penalty // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B. 1996. Vol. 19, no. 2. P. 397–402. DOI: 10.1109/96.496044.
16. Rahimpour H., Masoumi N. High-Resolution Frequency Discriminator for Instantaneous Frequency Measurement Subsystem // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018. Vol. 67, no. 10. P. 2373–2381. DOI: 10.1109/TIM.2018.2816804.
17. Rahimpour H., Masoumi N., Keshani S. [et al.]. A High Frequency Resolution Successive-Band Shifted Filters Architecture for a 15-bit IFM Receiver // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, no. 5. P. 2028–2035. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2904259.
18. Rahimpour H., Masoumi N. A 6-bit Instantaneous Frequency Discriminator Based on Band-Stop Resonators // 2018 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Mashhad, Iran, 2018. P. 255–259. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472583.
19. Fields T. W., Sharpin D. L., Tsui J. B. Digital channelized IFM receiver // 1994 IEEE MTT-S International Microwave

- Symposium Digest (Cat. No. 94CH3389-4). San Diego, CA, USA, 1994. P. 87–90. DOI: 10.1109/NTC.1994.316686.
20. Yingjiao R., Wenfang L. Research on Digital Instantaneous Frequency Measurement Based on Passive Positioning System // 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China, 2018. P. 1008–1012. DOI: 10.1109/CompComm.2018.8780982.
21. Su Yu, Jiang Defu. Digital Instantaneous Frequency Measurement of a Real Sinusoid Based on Three Sub-Nyquist Sampling Channels // Mathematical Problems in Engineering. 2020. Vol. 2020. P. 1–11. DOI: 10.1155/2020/5089761.
22. Keshani S., Masoumi N. Improved Frequency Accuracy of IFM Using Minimum Mean Squared Error Algorithm // Electrical Engineering (ICEE). Mashhad, Iran, 2018. P. 260–264. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472591.
23. Keshani S., Masoumi N., Rahimpour H. [et al.]. Digital Processing for Accurate Frequency Extraction in IFM Receivers // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69, no. 9. P. 6092–6100. DOI: 10.1109/TIM.2020.2969063.
24. Hirai A., Tsutsumi K., Tsuru M. [et al.]. A 0.1-to-10 GHz Digital Frequency Discriminator IC with Time to Digital Converter and Adaptive Control of Frequency Division Ratio for Instantaneous Frequency Measurement // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Boston, MA, USA, 2019. P. 1287–1290. DOI: 10.1109/MWSYM.2019.8700846.
25. Wang C., Li Y., Li K. A High-precision FFT Frequency Offset Estimation Algorithm based on Interpolation and Binary Search // 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu, China, 2019. P. 437–442. DOI: 10.1109/ITNEC.2019.8729465.
26. Kanai H., Chubachi N., Suzuki H. A method to evaluate accuracy of FFT-based periodicity analysis for short length signal in low SNR // [Proceedings] ICASSP-92: 1992 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. San Francisco, CA, USA, 1992. Vol. 5. P. 45–48. DOI: 10.1109/ICASSP.1992.226662.
27. Lee Soon-Woo, Kang Jimyung, Kim Yong-Hwa [et al.]. Simple threshold estimation for a 1-bit ADC in a low complex IR-UWB receiver // 2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Hannover, Germany, 2008. P. 215–217. DOI: 10.1109/ICUWB.2008.4653389.
28. Norouzi Y., Shahbazi H., Mirzaei S. Performance Analysis of Mono-bit Digital Instantaneous Frequency Measurement (Difm) Device // Mathematical Problems in Engineering. 2017. P. 11. DOI: 10.22060/ej.2017.12155.5050.
29. Mahlooji S., Mohammadi K. Very High Resolution Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 2009 International Conference on Signal Processing Systems. Singapore, 2009. P. 177–181. DOI: 10.1109/ICSPS.2009.43.
30. Helton J., Chen C.-I. H., Lin D. M. [et al.]. FPGA-Based 1.2 GHz Bandwidth Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 9th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED 2008). San Jose, CA, USA, 2008. P. 568–571. DOI: 10.1109/ISQED.2008.4479798.
31. Krone S., Fettweis G. Capacity of communications channels with 1-bit quantization and oversampling at the receiver // 2012 35th IEEE Sarnoff Symposium. Newark, NJ, USA, 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/SARNOF.2012.6222713.
32. Landau L. T. N., Dörpinghaus M., Lamare R. C. [et al.]. Achievable rate with 1-bit quantization and oversampling at the receiver using continuous phase modulation // 2017 IEEE 17th International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB). Salamanca, Spain, 2017. Vol. 17, Issue 10. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICUWB.2017.8250995.
33. Stein M. S. Performance analysis for time-of-arrival estimation with oversampled low-complexity 1-bit a/d conversion // 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). New Orleans, LA, USA, 2017. P. 4491–4495. DOI: 10.1109/ICASSP.2017.7953006.
34. Mezghani A., Nossek J. A. Analysis of Rayleigh-fading channels with 1-bit quantized output // 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, ON, Canada, 2008. P. 260–264. DOI: 10.1109/ISIT.2008.4594988.
35. Takuto Ohtaguro, Masato Saito, Takaya Yamazato. Experimental Study on Noise Aided 4PAM Receiver with 1bit ADC // The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE). Japan, Poster Presentation, 2021. URL: <https://ken.ieice.org/ken/paper/20211028BCgX/eng/> (дата обращения: 15.09.2023).
36. Abdelhameed D., Umebayashi K., Atzeni I. [et al.]. Enhanced Signal Detection and Constellation Design for Massive SIMO Communications With 1-Bit ADCs // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 11749–11765. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3242210.
37. Mohammadkarimi M., Ardakani M. Optimal Channel Equalizer for mmWave Massive MIMO Using 1-bit ADCs in Frequency-Selective Channels // IEEE Communications Letters. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 882–885. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2966477.
38. Abdelhameed D., Umebayashi K., Al-Tahmeesshi A. [et al.]. Enhanced Signal Detection for Massive SIMO Communications with 1-Bit ADCs // 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Lucca, Italy, 2021. P. 66–70. DOI: 10.1109/SPAWC51858.2021.9593128.
39. Lin D. M., Liou L. L., Benson S. [et al.]. Mono-bit digital chirp receiver using mono-bit IFM (instantaneous frequency measurement) receiver as a core // Proceedings of the 2011 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON). Dayton, OH, USA, 2011. P. 348–351. DOI: 10.1109/NAECON.2011.6183130.

ЛЯШУК Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1635-6235

AuthorID (РИНЦ): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016

Адрес для переписки: pribor78@mail.ru

ПУЗЫРЁВ Павел Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3588-9740

AuthorID (SCOPUS): 54391518700

ORCID: 0000-0003-0694-9973

ResearcherID: E-8041-2014

Адрес для переписки: p.socrat@rambler.ru

ЗАВЬЯЛОВ Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6758-0406

AuthorID (SCOPUS): 57221599219

ORCID: 0000-0001-5114-2074

ResearcherID: E-8661-2014

Адрес для переписки: zavyalov62@mail.ru

Для цитирования

Ляшук А. Н., Пузырёв П. И., Завьялов С. А. Разработка и исследование структуры цифрового измерителя частоты для системы мгновенного измерения частоты // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 144–152. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-144-152.

Статья поступила в редакцию 17.11.2023 г.

© А. Н. Ляшук, П. И. Пузырёв, С. А. Завьялов

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE STRUCTURE OF A DIGITAL FREQUENCY METER FOR AN INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASUREMENT SYSTEM

The article proposes a new method for measuring frequency based on a one-bit ADC. In contrast to the known method of measuring frequency using a delay line, the developed structure of a meter that implements the proposed method makes it possible to get rid of delay lines for measuring frequency in a wide frequency range and to sharply reduce the weight and size parameters of the entire meter with an integrated implementation. Unlike other known digital meters, described in sources, the proposed method makes it possible to increase the accuracy of frequency measurements in a wide frequency range.

Keywords: instantaneous frequency measurement, one-bit ADC, delay line, phase shifter, IFM IC.

References

1. Bendat J. S. Principle and Applications of Random Noise Theory. New York: Wiley, 1958. 431 p. (In Engl.).
2. East P. W. Fifty years of instantaneous frequency measurement // IET Radar, Sonar & Navigation. No. 6. P. 112–122. DOI:10.1049/iet-rsn.2011.0177. (In Engl.).
3. Collins J. H., Grant P. M. A review of current and future components for electronic warfare receivers // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1981. Vol. 28, no. 3. P. 117–125. DOI: 10.1109/T-SU.1981.31234. (In Engl.).
4. Blerkom R. Van, Freeman D. G., Crutchfield R. C. Frequency Measurement Techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1968. Vol. 17, no. 2. P. 133–145. DOI: 10.1109/TIM.1968.4313684. (In Engl.).
5. Vasilenko V. E., Dikarev B. D., Zikiy A. N. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye priyemnika mgnovennogo izmereniya chastoty [Experimental investigation of the receiver of the momentary frequency measuring] // Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2008. No. 3 (80). P. 168–171. EDN: KNOFGV. (In Russ.).
6. Kvachev M. A., Puzyrev P. I., Semenov K. V. Research of Instantaneous Frequency Measurement Receiver // 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306185. (In Engl.).
7. Egorov N., Kochemasov V. Mgnovennoye izmereniye chastoty: metody i sredstva [Instantaneous frequency measurement: methods and devices] // Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2017. No. 5 (00165). P. 136–141. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141. EDN: YTXAT. (In Russ.).
8. Mazim N. J. N. B., Ain M. F., Hassan S. I. S. ADS simulation of 2 to 5 GHz IFM correlator // 2005 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics. Johor, Malaysia, 2005. P. 203–206. DOI: 10.1109/APACE.2005.1607807. (In Engl.).
9. Gruchala H., Czyzewski M. The instantaneous frequency measurement receiver in the complex electromagnetic environment // 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (IEEE Cat. No. 04EX824). Warsaw, Poland, 2004. Vol. 1. P. 155–158. DOI: 10.1109/MIKON.2004.1356885. (In Engl.).
10. Lam D., Buckley B. W., Lonappan C. K. [et al.]. Ultra-wideband instantaneous frequency estimation // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2015. Vol. 18, no. 2. P. 26–30. DOI: 10.1109/MIM.2015.7066680. (In Engl.).
11. Pandolfi C., Fitini E., Gabrielli G. [et al.]. Comparison of analog IFM and digital frequency measurement receivers for electronic warfare // The 7th European Radar Conference. Paris, France, 2010. P. 232–235. (In Engl.).
12. Thornton M. J. Ultra-broadband frequency discriminator designs for IFM receivers // IEE Colloquium on Multi-Octave Active and Passive Components and Antennas. London, UK, 1989. P. 13/1–13/4. (In Engl.).
13. Goavec A., Vauché R., Gaubert J. [et al.]. Instantaneous frequency measurement for IR-UWB signal in CMOS 130 nm // 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Monte Carlo, Monaco, 2016. P. 157–160. DOI: 10.1109/ICECS.2016.7841156. (In Engl.).
14. Rahimpour H., Masoumi N. Design and Implementation of a High-Sensitivity and Compact-Size IFM Receiver // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68, no. 7. P. 2602–2609. DOI: 10.1109/TIM.2018.2866312. (In Engl.).
15. Wu Ruey-Beei, Chao Fang-Lin. Flat spiral delay line design with minimum crosstalk penalty // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B. 1996. Vol. 19, no. 2. P. 397–402. DOI: 10.1109/96.496044. (In Engl.).

16. Rahimpour H., Masoumi N. High-Resolution Frequency Discriminator for Instantaneous Frequency Measurement Subsystem // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018. Vol. 67, no. 10. P. 2373–2381. DOI: 10.1109/TIM.2018.2816804. (In Engl.).
17. Rahimpour H., Masoumi N., Keshani S. [et al.]. A High Frequency Resolution Successive-Band Shifted Filters Architecture for a 15-bit IFM Receiver // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2019. Vol. 67, no. 5. P. 2028–2035. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2904259. (In Engl.).
18. Rahimpour H., Masoumi N. A 6-bit Instantaneous Frequency Discriminator Based on Band-Stop Resonators // *2018 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Mashhad, Iran, 2018. P. 255–259. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472583. (In Engl.).
19. Fields T. W., Sharpin D. L., Tsui J. B. Digital channelized IFM receiver // *1994 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (Cat. No. 94CH3389-4). San Diego, CA, USA, 1994. P. 87–90. DOI: 10.1109/NTC.1994.316686. (In Engl.).
20. Yingjiao R., Wenfang L. Research on Digital Instantaneous Frequency Measurement Based on Passive Positioning System // *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. Chengdu, China, 2018. P. 1008–1012. DOI: 10.1109/CompComm.2018.8780982. (In Engl.).
21. Su Yu, Jiang Defu. Digital Instantaneous Frequency Measurement of a Real Sinusoid Based on Three Sub-Nyquist Sampling Channels // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–11. DOI: 10.1155/2020/5089761. (In Engl.).
22. Keshani S., Masoumi N. Improved Frequency Accuracy of IFM Using Minimum Mean Squared Error Algorithm // *Electrical Engineering (ICEE)*. Mashhad, Iran, 2018. P. 260–264. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472591. (In Engl.).
23. Keshani S., Masoumi N., Rahimpour H. [et al.]. Digital Processing for Accurate Frequency Extraction in IFM Receivers // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, no. 9. P. 6092–6100. DOI: 10.1109/TIM.2020.2969063. (In Engl.).
24. Hirai A., Tsutsumi K., Tsuru M. [et al.]. A 0.1-to-10 GHz Digital Frequency Discriminator IC with Time to Digital Converter and Adaptive Control of Frequency Division Ratio for Instantaneous Frequency Measurement // *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. Boston, MA, USA, 2019. P. 1287–1290. DOI: 10.1109/MWSYM.2019.8700846. (In Engl.).
25. Wang C., Li Y., Li K. An High-precision FFT Frequency Offset Estimation Algorithm based on Interpolation and Binary Search // *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. Chengdu, China, 2019. P. 437–442. DOI: 10.1109/ITNEC.2019.8729465. (In Engl.).
26. Kanai H., Chubachi N., Suzuki H. A method to evaluate accuracy of FFT-based periodicity analysis for short length signal in low SNR // [Proceedings] *ICASSP-92: 1992 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. San Francisco, CA, USA, 1992. Vol. 5. P. 45–48. DOI: 10.1109/ICASSP.1992.226662. (In Engl.).
27. Lee Soon-Woo, Kang Jimyung, Kim Yong-Hwa [et al.]. Simple threshold estimation for a 1-bit ADC in a low complex IR-UWB receiver // *2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*. Hannover, Germany, 2008. P. 215–217. DOI: 10.1109/ICUWB.2008.4653389. (In Engl.).
28. Norouzi Y., Shahbazi H., Mirzaei S. Performance Analysis Of Mono-bit Digital Instantaneous Frequency Measurement (Difm) Device // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. P. 11. DOI: 10.22060/ej.2017.12155.5050. (In Engl.).
29. Mahlooji S., Mohammadi K. Very High Resolution Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver // *2009 International Conference on Signal Processing Systems*. Singapore, 2009. P. 177–181. DOI: 10.1109/ICSPS.2009.43. (In Engl.).
30. Helton J., Chen C. -I. H., Lin D. M. [et al.]. FPGA-Based 1. 2 GHz Bandwidth Digital Instantaneous Frequency Measurement Receiver // *9th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED 2008)*. San Jose, CA, USA, 2008. P. 568–571. DOI: 10.1109/ISQED.2008.4479798. (In Engl.).
31. Krone S., Fettweis G. Capacity of communications channels with 1-bit quantization and oversampling at the receiver // *2012 35th IEEE Sarnoff Symposium*. Newark, NJ, USA, 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/SARNOF.2012.6222713. (In Engl.).
32. Landau L. T. N., Dörpinghaus M., Lamare R. C. [et al.]. Achievable rate with 1-bit quantization and oversampling at the receiver using continuous phase modulation // *2017 IEEE 17th International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*. Salamanca, Spain, 2017. Vol. 17, Issue 10. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICUWB.2017.8250995. (In Engl.).
33. Stein M. S. Performance analysis for time-of-arrival estimation with oversampled low-complexity 1-bit a/d conversion // *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. New Orleans, LA, USA, 2017. P. 4491–4495. DOI: 10.1109/ICASSP.2017.7953006. (In Engl.).
34. Mezghani A., Nossek J. A. Analysis of Rayleigh-fading channels with 1-bit quantized output // *2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, ON, Canada, 2008*. P. 260–264. DOI: 10.1109/ISIT.2008.4594988. (In Engl.).
35. Takuto Ohtaguro, Masato Saito, Takaya Yamazato. Experimental Study on Noise Aided 4PAM Receiver with 1bit ADC // *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)*. Japan, Poster Presentation, 2021. URL: <https://ken.ieice.org/ken/paper/20211028BCgX/eng/> (accessed: 15.09.2023). (In Engl.).
36. Abdelhameed D., Umebayashi K., Atzeni I. [et al.]. Enhanced Signal Detection and Constellation Design for Massive SIMO Communications With 1-Bit ADCs // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 11749–11765. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3242210. (In Engl.).
37. Mohammadkarimi M., Ardakani M. Optimal Channel Equalizer for mmWave Massive MIMO Using 1-bit ADCs in Frequency-Selective Channels // *IEEE Communications Letters*. 2020. Vol. 24, no. 4. P. 882–885. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2966477. (In Engl.).
38. Abdelhameed D., Umebayashi K., Al-Tahmeesschi A. [et al.]. Enhanced Signal Detection for Massive SIMO Communications with 1-Bit ADCs // *2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. Lucca, Italy, 2021. P. 66–70. DOI: 10.1109/SPAWC51858.2021.9593128. (In Engl.).
39. Lin D. M., Liou L. L., Benson S. [et al.]. Mono-bit digital chirp receiver using mono-bit IFM (instantaneous frequency measurement) receiver as a core // *Proceedings of the 2011 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*. Dayton, OH, USA, 2011. P. 348–351. DOI: 10.1109/NAECON.2011.6183130. (In Engl.).

LYASHUK Aleksey Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
 SPIN-code: 1635-6235
 AuthorID (RSCI): 742615
 ORCID: 0000-0002-6394-9390
 ResearcherID: R-2812-2016
 Correspondence address: pribor78@mail.ru
PUZYREV Pavel Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.
 SPIN-code: 3588-9740
 AuthorID (SCOPUS): 54391518700
 ORCID: 0000-0003-0694-9973

ResearcherID: E-8041-2014

Адрес для переписки: p.socrat@rambler.ru

ZAVYALOV Sergey Anatolievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 6758-0406

AuthorID (SCOPUS): 57221599219

ORCID: 0000-0001-5114-2074

ResearcherID: E-8661-2014

Адрес для переписки: zavyalov62@mail.ru

For citations

Lyashuk A. N., Puzyrev P. I., Zavyalov S. A. Development and research of the structure of a digital frequency meter for an instantaneous frequency measurement system // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 144 – 152. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-144-152.

Received November 17, 2023.

© A. N. Lyashuk, P. I. Puzyrev,

S. A. Zavyalov

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ БИНАРНОГО КОМПОЗИТА С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Действующие методики статистической обработки результатов определений характеристик основаны на гипотезе о нормальном характере их распределения. Результаты статистической обработки 153 лабораторных определений модуля деформации бинарного композита «песок-гранулы вспененного полистирола» эту гипотезу не подтвердили. Для решения возникшей проблемы было решено использовать искусственную нейронную сеть. Таким образом, в качестве объекта исследований был выбран модуль деформации бинарного композита. Применение искусственной нейронной сети для определения модуля деформации бинарного композита было выбрано в качестве предмета исследования. Цель выполненных исследований — определение модуля деформации бинарного композита с помощью искусственной нейронной сети. Основные задачи исследования — определение модуля деформации бинарного композита с различным процентным содержанием гранул вспененного полистирола, разработка искусственной нейронной сети и регрессионного уравнения для определения модуля деформации бинарного композита и последующий сравнительный анализ результатов их использования. Результаты лабораторных испытаний образцов бинарного композита позволили обучить заранее разработанную искусственную нейронную сеть. По результатам тестирования обученной искусственной нейронной сетью было установлено, что при доверительной вероятности $P = 95\%$ абсолютное значение относительной погрешности определения модуля деформации бинарного композита составило $|\delta| = 11,8\%$, а значение коэффициента детерминации — $R^2 = 0,5641$. В то же время, при использовании регрессионного уравнения — $|\delta| = 133,1\%$ и $R^2 = 0,0857$. Выполненные исследования подтвердили возможность и преимущество использования искусственной нейронной сети для определения модуля деформации бинарного композита.

Ключевые слова: относительная погрешность определения характеристики, коэффициент детерминации, регрессионное уравнение, искусственная нейронная сеть, песок, гранулы вспененного полистирола.

Введение. Результаты ранее выполненных лабораторных исследований подтвердили возможность использования бинарного композита (БК) «песчаный грунт — гранулы вспененного полистирола (ГВП)» в качестве грунта основания резервуаров для уменьшения потерь тепла при хранении нефти в условиях Крайнего Севера [1, 2]. В то же время очевидно, что добавки ГВП в грунт будут влиять на деформационные свойства БК, что важно для обеспечения устойчивости объектов технологической инфраструктуры нефтегазовой отрасли в процессе их строительства и последующей эксплуатации. Необходимо отметить и тот факт, что в соответствии с действующими нормативными документами основания зданий и сооружений «следует проверять по деформациям во всех случаях» [3, с. 14]. Таким образом, изучение влияния добавок ГВП на модуль деформации E , относящийся к основным характеристикам механических свойств грунтов, определяющих их деформации [4], представляет собой актуальную задачу.

В настоящее время существуют различные методики полевых [5–7] и лабораторных [8–10] определений модуля деформации E грунта, а также последующей статистической обработки полученных в ходе исследований результатов [11]. Порядок и объём таких исследований определяется в соответствии с планом эксперимента [12, 13] и требованиями действующих нормативных документов [3, с. 13]. Так, например, в соответствии с требованиями [3, с. 24] при определении значения механических характеристик грунта необходимо провести не менее шести измерений. В то же время корректная, с учётом необходимости определения закона распределения результатов частных определений характеристик, статистическая обработка данных при прямых многократных измерениях в соответствии с методикой [14] требует как минимум 15 допущенных после исключения грубых погрешностей результатов измерений. С учётом длительности определений, измеряемой, как правило, часами, сама процедура определения требуемых расчётных

Уровни и интервалы варьирования факторов влияния

Факторы влияния	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень	Интервал варьирования
d_s , мм	0,080	0,409	0,245	0,165
w , д.е.	0,03	0,15	0,09	0,06
$\varphi_{ГВП}$ (Участок I), д.е.	0,00	0,10	0,05	0,05
$\varphi_{ГВП}$ (Участок II), д.е.	0,10	0,40	0,25	0,15

характеристик механических свойств является продолжительной по времени и затратной по привлекаемым ресурсам.

Решение проблемы сокращения временных и материальных затрат при определении характеристик механических свойств грунта видится в использовании современных достижений в области информационных технологий. Современный уровень развития вычислительной техники, не только аппаратное, но и программное обеспечение, открывает новые возможности в использовании современных достижений в IT-технологии в прикладных отраслях человеческой деятельности. Одно из таких направлений — это определение характеристик свойств материалов с привлечением современных методов и приёмов. Так, например, в своей работе [15] авторы сообщают о достижении 6 % расхождения между данными экспериментальных исследований и данными механического и термического моделирования образцов с помощью программного обеспечения ABAQUS. Особый интерес представляет исследование [16], в котором авторы для определения характеристик прочностных свойств грунта использовали искусственную нейронную сеть (ИНС). I. V. Ofrikhter и др. сообщают об уменьшении с 50,43 % до 15,33 % величины средней абсолютной ошибки определения удельного сцепления глинистого грунта и его угла внутреннего трения с помощью ИНС по сравнению с регрессионным уравнением (РУ), полученным в соответствии с действующими методиками планирования эксперимента [12, 13]. К аналогичному заключению о преимуществах использования ИНС в сравнении с традиционными методами, использующими РУ, пришли D. Angshuman и др., исследуя модуль сдвига и избыточное давление поровой воды в четвертичном аллювиальном песке средней плотности [17].

Постановка задачи исследования. Объектом исследований была выбрана деформационная характеристика — модуль деформации E БК (песчаного грунта с добавками ГВП). Применение ИНС для определения модуля деформации E БК было выбрано в качестве предмета исследования. Цель выполненных исследований — определение модуля деформации E БК с помощью ИНС. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- 1) проведены лабораторные исследования по определению модуля деформации E БК с различным процентным содержанием ГВП;
- 2) разработаны ИНС и РУ для определения модуля деформации E БК;
- 3) выполнен сравнительный анализ использования ИНС и РУ для определения модуля деформации E БК.

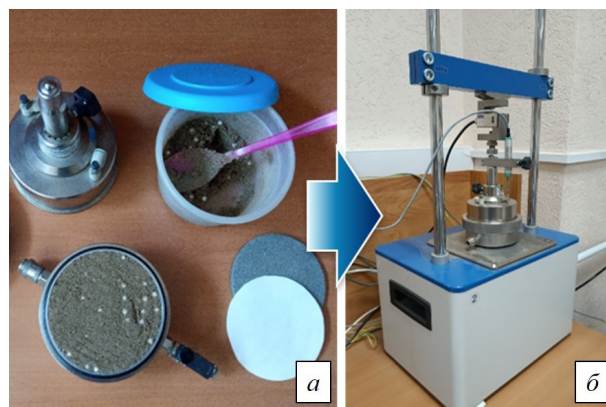


Рис. 1. Автоматизированный испытательный комплекс «АСИС»: а) одометр с образцом бинарного композита; б) нагружающее устройство (компрессионный прибор)

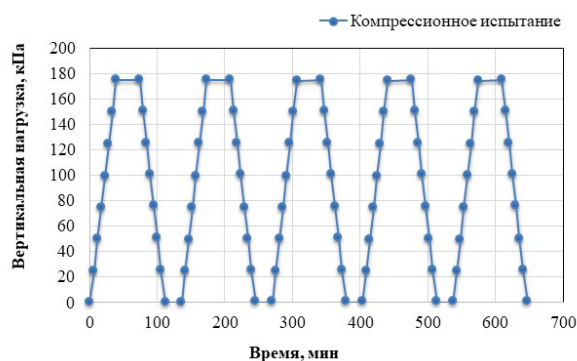


Рис. 2. Программа циклических компрессионных испытаний образцов БК

Лабораторные исследования. В соответствии с поставленными задачами на начальном этапе исследований в лабораторных условиях были выполнены работы по определению модуля деформации E БК с содержанием ГВП от 0 % до 40 %. В соответствии с используемой на практике методикой [12, 13] был разработан план проведения исследований по определению модуля деформации E БК. В соответствии с планом эксперимента модуль деформации E (МПа) БК является зависимым, искомым параметром. В качестве независимых факторов влияния были выбраны: эквивалентный диаметр частиц грунта d_s (мм), влажность БК w (д.е.), объёмная доля ГВП в БК $\varphi_{ГВП}$ (д.е.), начальная плотность БК ρ_n (г/см³). В табл. 1 представлены уровни и интервалы варьирования только для трёх независимых факторов (d_s , w , $\varphi_{ГВП}$), поскольку для начальной плотности БК ρ_n определение уровней и интервала варьиро-

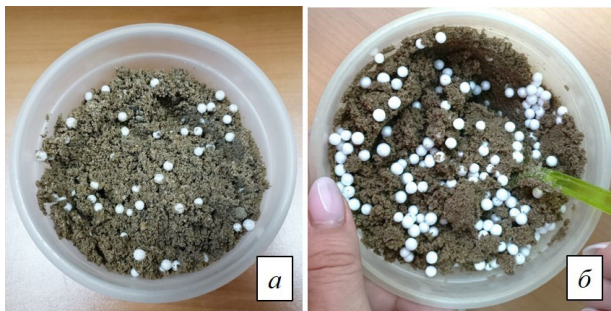


Рис. 3. Изготовление образцов бинарного композита с составом:
 а) $d_s = 0,409$ мм; $w = 0,03$; $\varphi_{ГВП} = 0,1$
 б) $d_s = 0,08$ мм; $w = 0,03$; $\varphi_{ГВП} = 0,4$

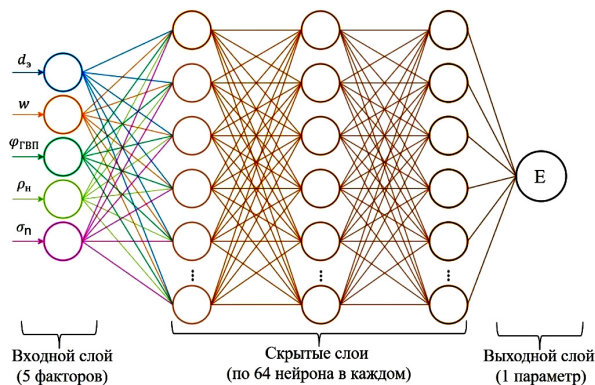


Рис. 4. Структура разработанной ИНС

вания на практике не представлялось возможным. Причём использование двух диапазонов (участок I и участок II) для фактора $\varphi_{ГВП}$ было обусловлено результатами ранее выполненных исследований [18].

Компрессионные испытания образцов БК проводились на автоматизированном испытательном комплексе «АСИС» (рис. 1) в соответствии с действующей методикой [9].

На рис. 2 представлена программа циклических испытаний, включающая пять этапов компрессионных нагружений образцов БК до величины 180 кПа.

Выбор максимальной величины вертикального нагружения обусловлен фактическим давлением на грунт основания вертикального стального резервуара ёмкостью 50000 м³ для хранения нефти и нефтепродуктов при проведении его гидравлических испытаний.

На рис. 3 представлены образцы БК с различным содержанием ГВП диаметром 2–4 мм. В качестве основы БК был использован песок средней крупности.

В ходе компрессионных испытаний для каждого независимого фактора и его уровней было исследовано не менее 12 образцов образца БК с различным содержанием ГВП. Всего в исследованиях было использовано 153 образца БК.

Искусственная нейронная сеть. Для работы с результатами лабораторных исследований с помощью алгоритмического языка Python была разработана ИНС [19]. На рис. 4 представлена структура разработанной ИНС, состоящая из пяти слоёв: одного входного, одного выходного и трёх скрытых, включающих 64 нейрона каждый. При этом входной слой содержит 5 нейронов по числу учитываемых факторов: эквивалентный диаметр частиц



Рис. 5. Алгоритм обучения и практического использования ИНС

грунта d_s , влажность БК w , объёмная доля ГВП в БК $\varphi_{ГВП}$, начальная плотность БК ρ_n , вертикальная нагрузка σ_n . Выходной слой содержит один нейрон — модуль деформации E БК.

Непосредственно сам алгоритм обучения и практического использования обученной ИНС представлен на рис. 5. Поскольку процесс обучения ИНС носит стохастический характер, в ходе апробации ИНС была выполнена серия из 100 последовательных обучений и последующих тестирований с различными наборами обучающих исходных данных.

Для оценки качества обученной ИНС были использованы: абсолютная величина среднего значения относительной погрешности $|\delta|$ (далее — погрешность) и коэффициент детерминации R^2 определения модуля деформации E БК с помощью обученной ИНС.

Результаты исследований. На рис. 6 представлена гистограмма распределения значений модуля деформации E БК. В соответствии с действующими методиками при статистической обработке результатов прямых многократных определений модуля деформации E БК принимается гипотеза о принадлежности результатов измерений нормальному распределению [14]. Для проверки гипотезы о нормальном характере распределения вероятностей полученных данных были использованы: критерий согласия Пирсона (кси-квадрат) [20], Колмогорова — Смирнова [21] и критерий Андерсона — Дарлинга [22].

При выборе тестов учитывались следующие факторы: размер выборки (в исследовании — $n = 18360$), уровень значимости при принятии нулевой гипотезы ($\alpha = 0,05$), а также вероятность возникновения мультимодальности или «хвостов»

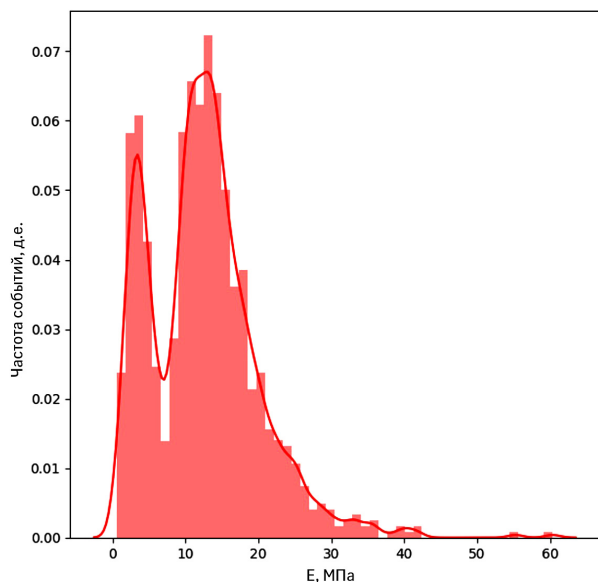
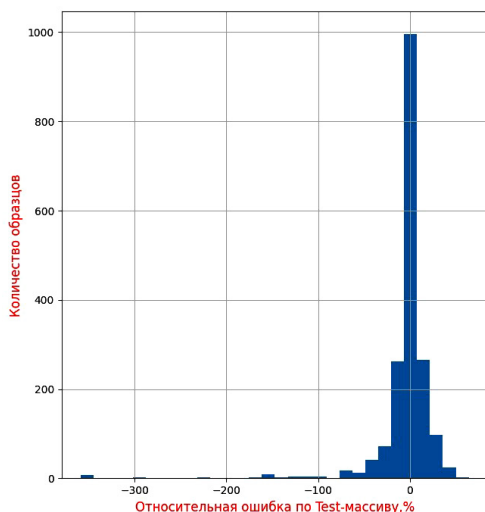


Рис. 6. Гистограмма распределения значений модуля деформации E БК

в приведенной выборке. По результатам проверки гипотеза о нормальном характере распределения полученных данных всеми тестами была отвергнута.

Таким образом, опровержение гипотезы ставит под сомнение корректность дальнейшего использования действующих методик статистической обработки результатов лабораторных испытаний. Поскольку нормативными документами не предусмотрены иные варианты статистической обработки данных, вопрос о разработке РУ для описания влияния независимых параметров на целевой параметр остаётся открытым.

Для решения выявленной проблемы было предложено использовать ИНС. В соответствии с алгоритмом (рис. 5) для определения модуля деформации требуется предварительно обученная ИНС. Поскольку результаты обучения ИНС носят стохастический характер, возникает необходимость статистической оценки данного вероятностного процесса. Для этого процесс обучения ИНС и последующего её тестирования был выполнен многократно. На рис. 7 представлен пример тестирования



обученной ИНС. Величина относительной погрешности δ по Test-массиву определяется уравнением вида

$$\delta = \frac{E_{\text{ИНС}} - E_{\text{Test}}}{E_{\text{Test}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $E_{\text{ИНС}}$ — модуль деформации E БК, определённый с помощью ИНС, МПа; E_{Test} — модуль деформации E БК из Test-массива, определённый по результатам компрессионных испытаний в лабораторных условиях, МПа.

На рис. 8 представлены результаты оценки многократного обучения ИНС и последующего её тестирования. Как видно из представленных данных, минимальное значение погрешности определения модуля деформации E БК равно $|\delta|_{\min} = 14,0\%$. В свою очередь, максимальное значение погрешности определения модуля деформации E БК равно $|\delta|_{\max} = 49,5\%$. При этом минимальная величина коэффициента детерминации определения модуля деформации E БК равна $R^2_{\min} = 0,4887$, а его максимальное значение равно $R^2_{\max} = 0,9083$. При доверительной вероятности $P = 95\%$ погрешность равна $|\delta| = 11,8\%$, а значение коэффициента детерминации обученной ИНС — $R^2 = 0,5641$, что характеризует модель как удовлетворительную [23].

В свою очередь, при доверительной вероятности $P = 99\%$ погрешность составила $|\delta| = 50,5\%$, а коэффициент детерминации — $R^2 = 0,4694$.

В табл. 2 представлены характеристики генеральной совокупности выборки данных погрешности $|\delta|$ и коэффициента детерминации R^2 обученной ИНС. При этом было установлено, что распределение непосредственно самой погрешности определения модуля деформации E БК носит нормальный характер.

Поскольку в ходе исследования была установлена несостоятельность методик статистической обработки результатов лабораторных испытаний действующих нормативных документов, в качестве зависимости модуля деформации E от объёмной доли ГВП в БК $\phi_{\text{ГВП}}$ для участков I и II [18] были предложены эмпирические уравнения. Для участка I предложено уравнение вида

$$E = 18,974 + 1,907 \cdot X_1 - 2,474 \cdot X_2, \quad (2)$$

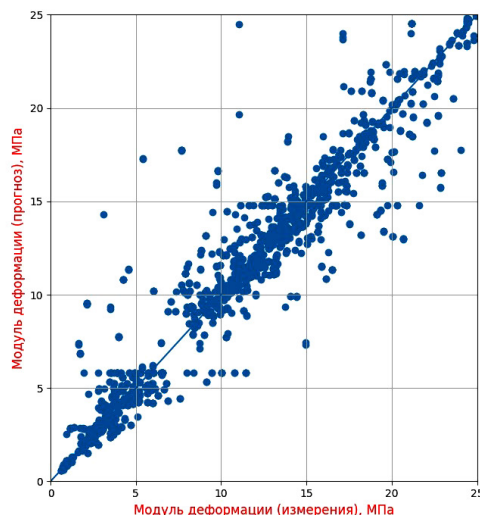


Рис. 7. Пример тестирования обученной ИНС

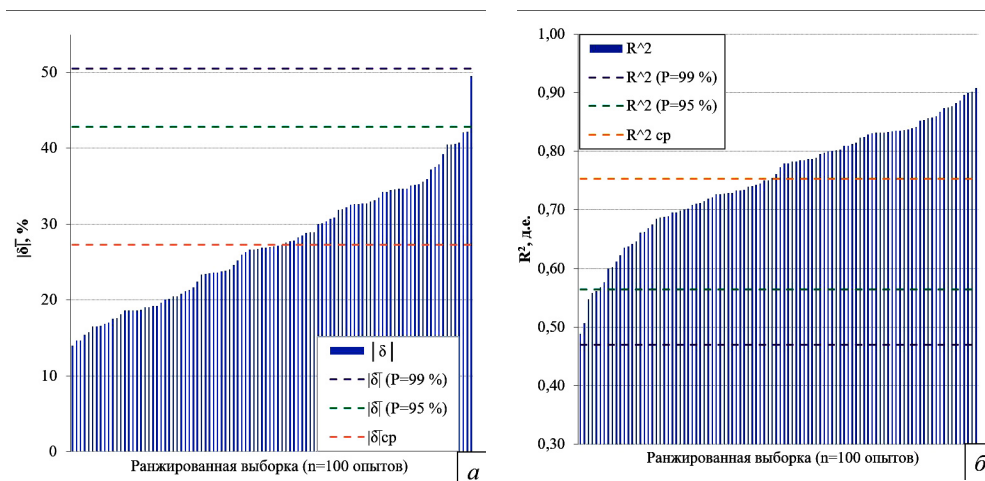


Рис. 8. Результаты тестирования обученной ИНС:
а) абсолютное значение относительной погрешности;
б) коэффициент детерминации

Таблица 2

Характеристики генеральной совокупности выборки данных обученной ИНС

Название показателя	Значение	
Объем выборки, шт.	100	
Критерий качества модели (метрика)	абсолютное значение относительной погрешности $ \bar{\delta} $, %	коэффициент детерминации R^2 , д.е.
<i>Показатели среднего положения (центральной тенденции)</i>		
Среднеарифметическое значение	27,3	0,7535
Мода M_o	19,2	0,7271
Медиана M_e	27,0	0,7673
<i>Показатели разнообразия признака (разброса, изменчивости)</i>		
Среднее квадратическое отклонение σ	7,8	0,0947
Дисперсия σ^2	59,6	0,0089
Коэффициент вариации C_v	0,2845	0,1257
<i>Показатели формы распределения</i>		
Коэффициент асимметрии A_s	0,2800	-0,6376
Коэффициент эксцесса E_x	-0,5889	-0,0559

где E — модуль деформации БК, МПа; X_1 — эквивалентный диаметр частиц песчаного грунта, мм; X_2 — объемная доля ГВП в БК, д.е.

В свою очередь, для участка II предложено уравнение вида

$$E = 13,963 - 5,198 \cdot X_2. \quad (3)$$

На рис. 9 представлены примеры тестирования обученной ИНС и регрессионных уравнений на одинаковых массивах данных.

На рис. 10 представлены результаты оценки определения модуля деформации E БК с помощью РУ (2) и (3).

Как видно из представленных на рис. 10 данных, минимальное значение погрешности определения модуля деформации E БК равно $|\bar{\delta}|_{\min} = 113,4\%$. В свою очередь, максимальное значение погрешности определения модуля деформации E БК равно $|\bar{\delta}|_{\max} = 135,8\%$. При этом минимальная величина коэффициента детерминации определения модуля деформации E БК равна $R^2_{\min} = 0,0817$, а его мак-

симальное значение равно $R^2_{\max} = 0,1829$. При доверительной вероятности $P = 95\%$ погрешность равна $|\bar{\delta}| = 133,1\%$, а значение коэффициента детерминации РУ — $R^2 = 0,0857$, что характеризует модель как неудовлетворительную. В свою очередь, при доверительной вероятности $P = 99\%$ погрешность равнялась $|\bar{\delta}| = 137,8\%$, а коэффициент детерминации РУ — $R^2 = 0,0643$. Очевидно, что неудовлетворительные величины статистических критериев точности, полученные при тестировании РУ, свидетельствуют о её неприемлемой достоверности.

В табл. 3 представлены характеристики генеральной совокупности выборки данных погрешности $|\bar{\delta}|$ и коэффициента детерминации R^2 определения с помощью РУ (2) и (3).

Как видно из данных, представленных в табл. 2 и 3, выборки результатов тестирования обученной ИНС и РУ являются достаточно однородными, поскольку коэффициенты вариации C_v как для погрешности $|\bar{\delta}|$, так и для коэффициента детерминации R^2 не превышают 0,33 [24]. Кроме того, было установлено, что при доверительной вероятности

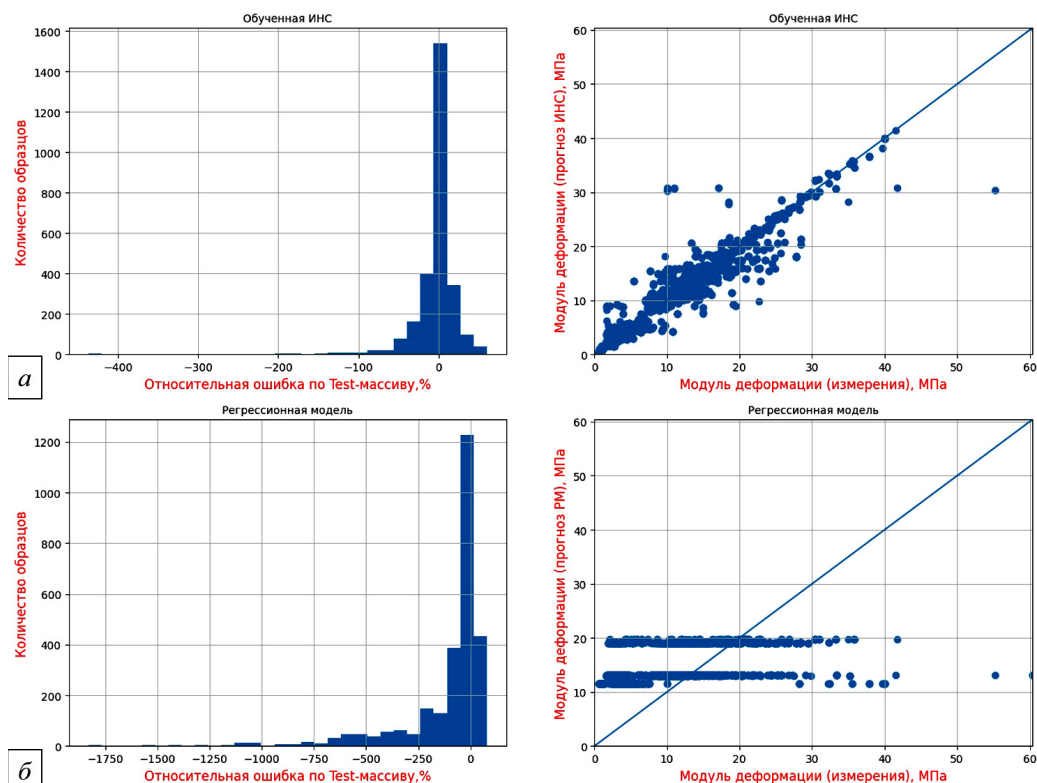


Рис. 9. Примеры тестирования: а) обученная ИНС; б) регрессионные уравнения

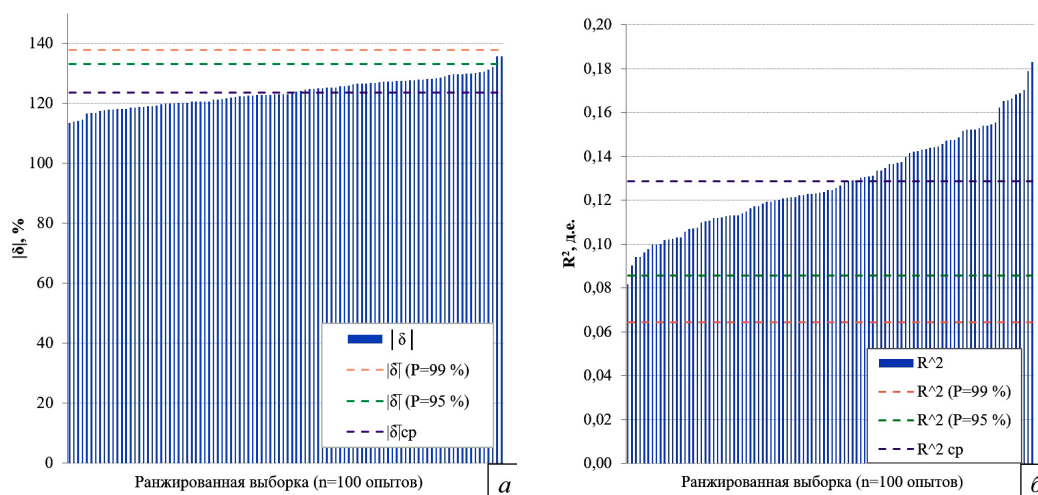


Рис. 10. Результаты тестирования регрессионного уравнения (РУ): а) абсолютное значение относительной погрешности; б) коэффициент детерминации

$P = 95\%$ погрешность $|\bar{\delta}|$ определения с помощью обученной ИНС в 11 раз меньше аналогичного параметра РУ, а значение коэффициента детерминации R^2 обученной ИНС в 6,6 раза больше, чем для разработанного РУ. В свою очередь, при доверительной вероятности $P = 99\%$ погрешность $|\bar{\delta}|$ определения с помощью обученной ИНС в 2,7 раза меньше, а значение коэффициента детерминации R^2 обученной ИНС в 7,3 раза больше, чем аналогичные параметры РУ.

Обсуждение результатов исследований. Действующие методики статистической обработки результатов измерений основаны на гипотезе об их нормальном распределении. По результатам статистической обработки лабораторных определений модуля деформации E 153-х образцов БК с различным процентным содержанием ГВП была опро-

вергнута гипотеза об их (результатов определений E) принадлежности нормальному распределению. Следствием отклонения гипотезы стала невозможность использования методик действующих нормативных документов для корректной разработки РУ. Разработанная и обученная ИНС позволила успешно разрешить проблему определения модуля деформации E БК по характеристикам его физических свойств: эквивалентному диаметру частиц грунта d_z , влажности w , объёмной доли ГВП в БК $\varphi_{ГВП}$ и начальной плотности БК ρ_n . Сравнительный анализ результатов тестирования обученной ИНС и РУ подтвердил корректность принятого решения. Тем не менее очевидно, что достигнутая удовлетворительная точность определения модуля деформации БК требует дальнейших исследований, направленных на её повышение.

Характеристики генеральной совокупности выборки данных регрессионного уравнения

Название показателя	Значение	
Объем выборки, шт.	100	
Критерий качества модели (метрика)	абсолютное значение относительной погрешности $ \bar{\delta} $, %	коэффициент детерминации R^2 , д.е.
<i>Показатели среднего положения (центральной тенденции)</i>		
Среднеарифметическое значение	123,7	0,1285
Мода M_o	120,0	0,1119
Медиана M_e	123,0	0,1246
<i>Показатели разнообразия признака (разброса, изменчивости)</i>		
Среднее квадратическое отклонение σ	4,8	0,0214
Дисперсия σ^2	22,1	$4,58 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент вариации C_v	0,0282	0,1667
<i>Показатели формы распределения</i>		
Коэффициент асимметрии A_s	0,0841	0,3294
Коэффициент эксцесса E_x	-0,4109	-0,4072

Заключение. Проведённые исследования подтвердили возможность определения модуля деформации E образцов БК с помощью ИНС. При этом использование обученной ИНС для определения модуля деформации E образцов БК позволяет не только исключить необходимость проверки гипотезы о принадлежности результатов измерений нормальному распределению, но и повысить точность определения исследуемой характеристики.

Библиографический список

- Gruzin A. V., Grinevich E. S., Klimanov D. N. The study of deformation properties of a sand soil – expanded polystyrene granules mixture under cyclic loading conditions // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441 (1). P. 012062-1 – 012062-12. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012062.
- Gruzin A. V., Tokarev V. V., Shalai V. V., Logunova Yu. V. The Artificial Additives Effect to Soil Deformation Characteristics of Oil and Oil Products Storage Tanks Foundation // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 158 – 168. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.311.
- СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*). Введ. 2017–07–01. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
- Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010: моногр. 2-е изд., доп. и испр. Москва: Прондо, 2014. 812 с. ISBN 972-5-905463-45-7.
- ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. Введ. 2013–07–01. Москва: Стандартинформ, 2013. 45 с.
- ГОСТ Р 58270-2018. Грунты. Метод испытаний расклинивающим dilatометром. Введ. 2018–11–02. Москва: Стандартинформ, 2018. 10 с.
- ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. Введ. 2013–11–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 23 с.
- ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. Введ. 2021–06–01. Москва: Стандартинформ, 2020. 27 с.
- ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. Введ. 2021–06–01. Москва: Стандартинформ, 2020. 19 с.
- ГОСТ Р 59958-2021. Грунты. Метод определения пределов прочности и модуля деформации при испытании сосредоточенной нагрузкой. Введ. 2022–01–01. Москва: Стандартинформ, 2020. 19 с.
- ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Введ. 2013–07–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 16 с.
- Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / пер. с англ. Т. И. Голиковой. Москва: Мир, 1967. 406 с.
- Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1976. 279 с.
- ГОСТ 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Введ. 2011–12–13. Москва: Стандартинформ, 2019. 18 с.
- Chung S.-Y., Elrahman M. A., Stephan D. Effects of expanded polystyrene (EPS) sizes and arrangements on the properties of lightweight concrete // Materials and Structures. 2018. Vol. 51 (3). P. 1 – 11. DOI: 10.1617/s11527-018-1182-3.
- Ofrikhter I. V., Ponomaryov A. B., Zakharov A. V. [et al.]. Estimation of soil properties by an artificial neural network // Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 110 (2), no. 11011. P. 1–7. DOI: 10.34910/MCE.110.11.
- Angshuman D., Chakraborty P. Simple models for predicting cyclic behaviour of sand in quaternary alluvium // Arabian Journal of Geosciences. 2022. Vol. 15. P. 1–19. DOI: 10.1007/s12517-022-09639-6.
- Пат. 2676778 Российская Федерация, МПК Е 02 D 27/35 (2006.01). Фундамент резервуара с улучшенными теплоизоляционными свойствами / Грузин А. В., Шалай В. В., Крупников В. И. № 2018107360; заявл. 27.02.2018; опубл. 11.01.2019, Бюл. № 2.
- Chollet F. Deep Learning with Python. New York: Manning Shelter Island, 2018. 384 p.
- Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва: Физматлит, 2006. 816 с. ISBN 5-9221-0707-0.
- Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. 3-е изд., стер. Москва: Наука, 1969. 511 с.
- Anderson T. W. Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria based on stochastic processes // Annals of

Mathematical Statistics. 1952. Vol. 23. P. 193–212. DOI: 10.1214/AOMS/1177729437.

23. Метрики качества линейных регрессионных моделей // Аналитическая платформа (Loginom). URL: <https://loginom.ru/blog/classification-quality> (дата обращения: 22.11.2023).

24. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справ. Москва: Машиностроение, 1985. 232 с.

КЛИМАНОВА Екатерина Сергеевна, инженер, ассистент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартиза-

ция и метрология» Омского государственного технического университета, г. Омск.

Адрес для переписки: klim_grin_katyusha8@mail.ru

Для цитирования

Климанова Е. С. Определение модуля деформации бинарного композита с помощью искусственной нейронной сети // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 153–162. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-153-162.

Статья поступила в редакцию 15.12.2023 г.

© Е. С. Климанова

DETERMINATION OF THE DEFORMATION MODULUS OF BINARY COMPOSITE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Using of existing methods of determining the characteristics of soils which are part of current regulatory documents and which are based on the hypothesis of normal character of distribution require considerable time and material costs. According to the results of conducted laboratory researches the hypothesis wasn't confirmed. In the paper it proposes to use trained artificial neural network for determination of the deformation modulus of binary composite «sand — granules of expanded polystyrene». Thus, it has been proven efficiency proposing method using trained artificial neural network in compare classical regression equation for determination of the deformation modulus of the binary composite. With a confidence probability of $P = 95\%$ the absolute value of the relative error is equal to 11,8 % the proposing learning artificial neural network in 11 times less than the absolute value of the relative error of classical regression equation. Also with a confidence probability of $P = 95\%$ the coefficient of determination is equal to 0,5641 and in 6,6 times less than it of regression equation. Further research will be directed to the selection of the values of the parameters of the artificial neural network program for increase the accuracy of determining the deformation modulus of the binary composite.

Keywords: relative error in determining the characteristic, coefficient of determination, regression equation, artificial neural network, sand, granules of expanded polystyrene.

References

1. Gruzin A. V., Grinevich E. S., Klimanov D. N. The study of deformation properties of a sand soil — expanded polystyrene granules mixture under cyclic loading conditions // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441 (1). P. 012062-1–012062-12. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012062. (In Engl.).
2. Gruzin A. V., Tokarev V. V., Shalai V. V., Logunova Yu. V. The Artificial Additives Effect to Soil Deformation Characteristics of Oil and Oil Products Storage Tanks Foundation // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 158–168. DOI:10.1016/j.proeng.2015.07.311. (In Engl.).
3. SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy (Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83*) [Foundations of buildings and structures (Updated edition of Building Codes and Regulations 2.02.01-83*)]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).
4. Boldyrev G. G. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov s kommentariyami k GOST 12248-2010 [Methods for determining the mechanical properties of soils with comments on GOST 12248-2010]. 2th ed. Moscow, 2014. 812 p. ISBN 972-5-905463-45-7. (In Russ.).
5. GOST 20276-2012. Grunty. Metody polevogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruyemosti [Soils. Field methods for determining the strength and strain characteristics]. Moscow, 2013. 45 p. (In Russ.).
6. GOST R 58270-2018. Grunty. Metod ispytaniy rasklinivayushchim dilatometrom. vved. vpervye [Soils. Method of wedging dilatometer test]. Moscow, 2018. 10 p. (In Russ.).
7. GOST 19912-2012. Grunty. Metody polevykh ispytaniy staticheskim i dinamicheskim zondirovaniyem [Soils. Field test methods: cone penetration test and dynamic probing]. Moscow, 2019. 23 p. (In Russ.).
8. GOST 12248.3-2020. Grunty. Opredeleniye kharakteristik prochnosti i deformiruyemosti metodom trekhosnogo szhatiya [Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing]. Moscow, 2020. 27 p. (In Russ.).
9. GOST 12248.4-2020. Grunty. Opredeleniye kharakteristik deformiruyemosti metodom kompressionnogo szhatiya [Soils. Determination of deformation parameters by compression testing]. Moscow, 2020. 19 p. (In Russ.).
10. GOST R 59958-2021. Grunty. Metod opredeleniya predelov prochnosti i modulya deformatsii pri ispytanii sosredotochennoy nagruzkoy [Soils. Test method for determination of the strength and deformation modulus experiencing a point load]. Moscow, 2020. 19 p. (In Russ.).
11. GOST 20522-2012. Grunty. Metody statisticheskoy obrabotki rezul'tatov ispytaniy [Soils. Methods of statistical treatment of test results]. Moscow, 2019. 16 p. (In Russ.).
12. Hiks Ch. Osnovnyye printsipy planirovaniya eksperimenta [Fundamental concepts in the design of experiments] / trans. from Engl. T. I. Golikovoy. Moscow, 1967. 406 p. (In Russ.).
13. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. 2th ed. Moscow, 1976. 279 p. (In Russ.).
14. GOST 8.736-2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Izmereniya pryamyye mnogokratnyye. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy. Osnovnyye polozheniya [State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main principles]. Moscow, 2019. 18 p. (In Russ.).

15. Chung S.-Y., Elrahman M. A., Stephan D. Effects of expanded polystyrene (EPS) sizes and arrangements on the properties of lightweight concrete // *Materials and Structures*. 2018. Vol. 51 (3). P. 1–11. DOI: 10.1617/s11527-018-1182-3. (In Engl.).
16. Ofrikhter I. V., Ponomaryov A. B., Zakharov A. V. [et al.]. Estimation of soil properties by an artificial neural network» // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. Vol. 110 (2), no. 11011. P 1–7. DOI: 10.34910/MCE.110.11. (In Engl.).
17. Angshuman D., Chakraborty P. Simple models for predicting cyclic behaviour of sand in quaternary alluvium // *Arabian Journal of Geosciences*. 2022. Vol. 15. P. 1–19. DOI: 10.1007/s12517-022-09639-6. (In Engl.).
18. Patent 2676778 Russian Federation, IPC E02D 27/35 (2006.01). Fundament rezervuara s uluchshennymi teploizolyatsionnymi svoystvami [The foundation of the tank with improved thermal insulation properties] // Gruzin A. V., Shalay V. V., Krupnikov V. I. No. 2018107360. (In Russ.).
19. Chollet F. *Deep Learning with Python*. New York: Manning Shelter Island, 2018. 384 p. (In Engl.).
20. Kobzar A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]*. Moscow, 2006. 816 p. ISBN 5-9221-0707-0. (In Russ.).
21. Smirnov N. V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy [Course on Probability Theory and Mathematical Statistics for Technical Applications]*. 3rd ed. by ster. Moscow, 1969. 511 p. (In Russ.).
22. Anderson T. W. Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria based on stochastic processes // *Annals of Mathematical Statistics*. 1952. Vol. 23. P. 193–212. DOI: 10.1214/AOMS/1177729437. (In Engl.).
23. Metriki kachestva lineynykh regressionnykh modeley [Quality metrics for linear regression models] // *Analiticheskaya platforma (Loginom). Loginom Analytical Platform*. URL: <https://loginom.ru/blog/classification-quality> (accessed: 22.11.2023). (In Russ.).
24. Stepnov M. N. *Statisticheskiye metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy [Statistical methods for processing mechanical test results]*. Moscow, 1985. 232 p. (In Russ.).

KLIMANOVA Ekaterina Sergeevna, Engineer, Assistant of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

Correspondence address: klim_grin_katyusha8@mail.ru

For citations

Klimanova E. S. Determination of the deformation modulus of binary composite using artificial neural network // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 153–162. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-153-162.

Received December 15, 2023.

© E. S. Klimanova

¹ ООО «Газпром межрегионгаз»,
г. Санкт-Петербург

² ООО Центр метрологии «СТП»,
г. Казань

³ Казанский
национальный исследовательский
технологический университет,
г. Казань

⁴ Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А. Н. Туполева,
г. Казань

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СЖИМАЕМОСТИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

В работе представлены результаты экспериментального исследования, направленного на оценку применимости методик расчета коэффициента сжимаемости природного газа AGA8-DC 92 (ГОСТ 30319.2-96), AGA8 Report Detail (ГОСТ 30319.3-2015), GERG-2004, GERG-2008, NX19, GERG-91, ISO 20765-1 (ГОСТ Р 8.662-2009), а также модифицированного уравнения ГСССД МР 118-05 (Умеренно сжатые газовые смеси) и ГСССД МР 113-03 (Влажный нефтяной газ) в диапазоне температур от 220 до 250 К (от минус 50,15 до минус 20,15 °С). Показано, что для AGA8-DC 92, AGA8 Report Detail, GERG-2004/2008, ISO 20765-1 (ГОСТ Р 8.662-2009), ГСССД МР 113-03 отклонение расчетных значений коэффициента сжимаемости от экспериментальных находится в пределах 0,1 %, что подтверждает возможность их применения в качестве расчетных методик в указанном диапазоне температур. Результаты, полученные в рамках настоящего исследования, обладают высокой значимостью для расходомерии, в частности, обеспечивают повышение точности процедуры приведения объема природного газа к стандартным условиям при низких температурах.

Ключевые слова: коэффициент сжимаемости, расход природного газа, AGA8, GERG-2004, GERG-2008, методика расчета, низкие температуры.

Введение. Вопросы, связанные с обеспечением точности измерения расхода и объема природного газа, имеют в настоящее время важное значение как с технической, так и с экономической позиции. При расчете стоимости поставленного природного газа используется значение приведенного к стандартным условиям объема газа, поэтому неточность его определения может негативно влиять на достоверность учета, сведение баланса и финансовые показатели поставщика газа. Требование приведения в процессе измерения расхода газа к стандартным условиям закреплено в [1] и регламентируется [2,

3], процедура приведения к стандартным условиям реализуется автоматизированно в специализированных вычислителях, устанавливаемых на узлах учета газа.

Расчет объема газа, приведенного к стандартным условиям, производится на основании уравнений состояния, приведенных в соответствующих нормативных документах: ГОСТ 30319.1-2015, ГОСТ 30319.2-2015, ГОСТ Р 8.662-2009, ГСССД МР 118-05, ГСССД МР 113-03, ISO 20765 и ISO 12213-3:2006. Опубликованный в [4] анализ расчетных методик и уравнений состояния природного газа, приведен-

ных в указанных нормативных документах, позволил заключить, что нижняя граница их применимости находится на уровне 250 К (минус 23,15 °С). В то же время температура рабочей среды в зимний период в ряде регионов Российской Федерации может опускаться существенно ниже. Поэтому одной из актуальных в настоящее время задач данного направления является уточнение процедуры приведения измеренного объема газа к стандартным условиям при низких температурах.

Отсутствие в указанном диапазоне температур однозначной стандартизированной методики определения коэффициента сжимаемости (Z), входящего в состав уравнений состояния, по которым производится расчет, приводит к тому, что процедура приведения объема природного газа к стандартным условиям для температур ниже 250 К (минус 23,15 °С) не может считаться в полной мере регламентированной. По этой причине при необходимости определения объема газа, приведенного к стандартным условиям, при низких температурах организациями могут применяться различные алгоритмы расчета, основанные на допущениях и применении подстановочных значений температуры и/или коэффициента сжимаемости рабочей среды. В [5] приведен анализ влияния подобных расчетных методик на результат определения объема газа, приведенного к стандартным условиям. Выявлено, что подобный подход может являться причиной существенной дополнительной погрешности результата, имеющей систематический характер и постоянный знак, увеличивающейся по мере снижения температуры рабочей среды и приводящей к занижению показаний приборов учета.

В то же время анализ, проведенный в [4], показывает, что непосредственно уравнения состояния в области низких температур принципиальных ограничений не имеют. Ограничения связаны именно с отсутствием стандартизированной методики расчета значения Z и оценки его погрешности в области низких температур. В то же время, согласно мнению разработчиков расчетных методик GERG, изложенному в [6], основным препятствием к созданию методики расчета Z в области низких температур является отсутствие достаточного количества метрологически достоверных данных о значениях коэффициента сжимаемости природного газа при обозначенных условиях.

Таким образом, решение вопроса получения расчетной методики определения коэффициента сжимаемости природного газа в области низких температур, либо экспериментальное подтверждение применимости существующих методик в обозначенной области, может служить недостающей ступенью к полной стандартизации процедуры определения объема природного газа, приведенного к стандартным условиям, в области температур от 223 до 250 К.

Цель исследования. Целью настоящей работы является экспериментальная оценка погрешности вычисления коэффициента сжимаемости природного газа, вычисленных по основным методикам расчета, в области низких температур.

Методы исследования. Исследование проведено посредством сопоставления значений коэффициента сжимаемости природного газа, полученного вышеуказанными расчетными методами, с высокоточными экспериментальными данными, полученными на специально разработанном для данного исследования стенде.

Основная часть. Значимым для метрологической практики источником сведений о значениях коэффициента сжимаемости природного газа являются технические монографии GERG [7–10], аккумулирующие полный перечень базы известных на момент их разработки данных о высокоточных значениях коэффициента сжимаемости с общим количеством экспериментальных точек до 36239 для температур от 218,5 до 425 К и давлений до 60 МПа. При этом значения коэффициента сжимаемости для природного газа ограничены 250 К. В [11] приведен метод расчета коэффициента сжимаемости при низких температурах, однако заявленная авторами погрешность метода на уровне 1% не может считаться удовлетворительной в контексте метрологических задач.

Вследствие отсутствия достаточного количества данных о значениях коэффициента сжимаемости природного газа в диапазоне температур 220...250 К, было принято решение получения указанных данных экспериментальным путем.

Для обеспечения технической возможности получения высокоточных сведений о значении коэффициента сжимаемости природного газа в области низких температур была проведена разработка экспериментального стенда и методики измерений, представленных в [12] и позволяющих определить значение Z с погрешностью, не превышающей 0,1 %. Величина допускаемой погрешности 0,1 % выбрана в связи с тем, что погрешности данных, приведенные в [7–9] — ключевых в настоящее время источниках сведений о значениях коэффициента сжимаемости природного газа, также находятся в пределах 0,1 %. Из этого следует, что экспериментальные данные, полученные с применением разработанных в рамках исследования методики и стенда, могут считаться соответствующими современному научно-техническому уровню и обладающими достаточной точностью.

Ввиду ограниченности достоверных сведений о значениях коэффициента сжимаемости природного газа в области температур 220...250 К тестирование разработанного оборудования и методики было произведено на природном газе при температурах выше 220 К, а также на средах, коэффициент сжимаемости которых хорошо известен в широком температурном диапазоне, включая исследуемую область 220–250 К: метане, азоте, аргоне, воздухе. Результаты тестирования разработанной методики на чистых средах и воздухе подтверждают ее корректность и подробно изложены в [13].

Погрешности значений коэффициента сжимаемости природного газа, полученных в результате проведенных испытаний, не превышают 0,1 % относительно справочных данных для всех рассмотренных рабочих сред, что подтверждает возможность применения разработанной методики и стенда для экспериментального определения коэффициента сжимаемости природного газа в диапазоне температур 220...250 К.

Экспериментальное исследование корректности расчетных методик определения Z было проведено для области температур от минус 50 до 0 °С (от 220,15 до 270,15 К) и давлений до 5 МПа. Проверка проведена в отношении методик AGA8-DC 92 [14], AGA8 Report 1 Detail [15], ГОСТ Р 8.662-2009 (ISO 20765) [16, 17], GERG-2004 [10], GERG-2008 [6], уравнений состояния для сокращенных компонентных составов GERG-91 [14], NX19 [14], а также модифицированного уравнения ГСССД МР 118-05

Компонентные составы исследованных природных газов

Компонент	Состав № 1	Состав № 2	Компонент	Состав № 1	Состав № 2
Метан	0,9421	0,918173	изо-Пентан	0	0,000205
Этан	0,02012	0,0295	Азот	0,019463	0,0149
Пропан	0,00504	0,01	Диоксид углерода	0,010132	0,02
изо-Бутан	0,00154	0,00101	Гелий	0	0,0025
н-Бутан	0,00159	0,001	Водород	0	0,00251
н-Пентан	0	0,000202	—	—	—

(Умеренно сжатые газовые смеси) [18] и ГСССД МР 113-03 [19] (влажный нефтяной газ).

Проведение экспериментальных исследований значения коэффициента сжимаемости природного газа Z было реализовано на двух различных газовых смесях, компонентный состав которых представлен в табл. 1. В составе второй смеси присутствуют все компоненты первой, а также н-Пентан, изо-Пентан, гелий и водород.

В процессе исследования получена база значений коэффициента сжимаемости природного газа для указанных компонентных составов в диапазоне изменения температуры от минус 50 до 0 °С (223,15...273,15 К) и давлений до 5 МПа, содержащая 127 точек. Проверка методик расчета коэффициента сжимаемости, в свою очередь, реализована посредством сопоставления значений, определенных экспериментально, со значениями, вычисленными по перечисленным выше методикам для газа того же компонентного состава при соответствующих входных условиях.

В процессе обработки было использовано относительное значение коэффициента сжимаемости ζ :

$$\zeta = Z/Z_0, \quad (1)$$

где Z — значение коэффициента сжимаемости при заданных температуре и давлении, а Z_0 — опорное значение, полученное при температуре 273,15 К.

Соотношение экспериментальных и расчетных данных о значениях относительного коэффициента сжимаемости было представлено в относительном виде (2):

$$\Delta\zeta = (1 - \zeta_{\text{эксп}} / \zeta_{\text{расчет}}) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{эксп}}$ — относительное значение коэффициента сжимаемости газовой смеси, полученное экспериментально, $\zeta_{\text{расчет}}$ — относительное значение коэффициента сжимаемости газовой смеси, полученное по соответствующим расчетным методикам (GERG-2004, AGA8-DC 92 и пр.).

Сопоставление результатов определения коэффициента сжимаемости

1. GERG-2004/2008.

Уравнение для расчета коэффициента сжимаемости природного газа по методике GERG-2008 отличается от уравнения GERG-2004 учетом в первом из них содержания в газовой смеси сероводорода, н-Нонана и н-Декана [11]. Поскольку примененные в эксперименте смеси не содержат указанных компонентов, результаты расчета по методикам GERG-2004 и GERG-2008 в данном исследовании идентич-

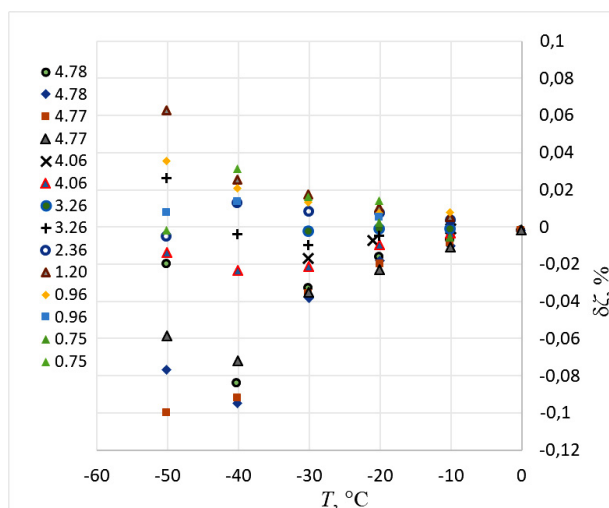


Рис. 1. Отклонения результатов определения ζ по методике GERG 2004/2008 от экспериментальных для первой смеси, параметр — начальное давление, МПа

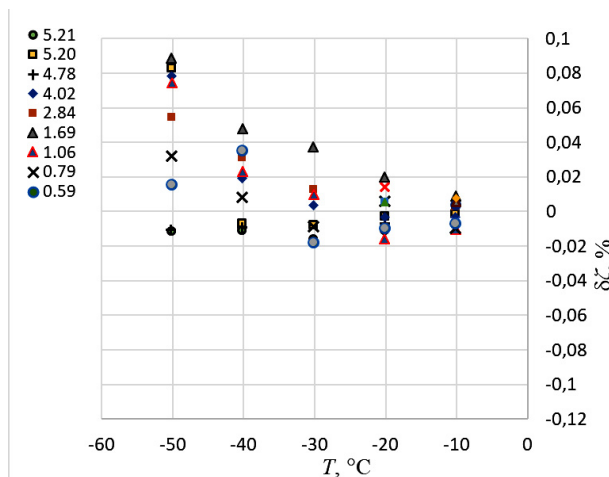


Рис. 2. Отклонения результатов определения ζ по методике GERG 2004/2008 от экспериментальных для второй смеси, параметр — начальное давление, МПа

ны и указаны в данной статье как GERG- 2004/2008. Согласно результатам, полученным для данных методик, отклонения расчетных данных от экспериментально полученных значений для обеих смесей находятся в пределах $\pm 0,1$ % (рис. 1, 2), что подтверждает применимость методик GERG-2004/2008 для определения Z при температурах ниже 250 К (минус 23,15 °С).

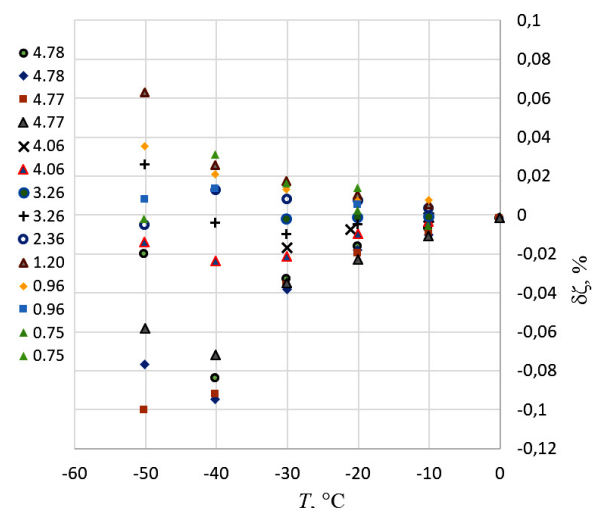


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных и расчета по уравнению AGA8 Report 1 Detail (состав 1). Зависимость $\delta\zeta$ от температуры; параметр — начальное давление, МПа

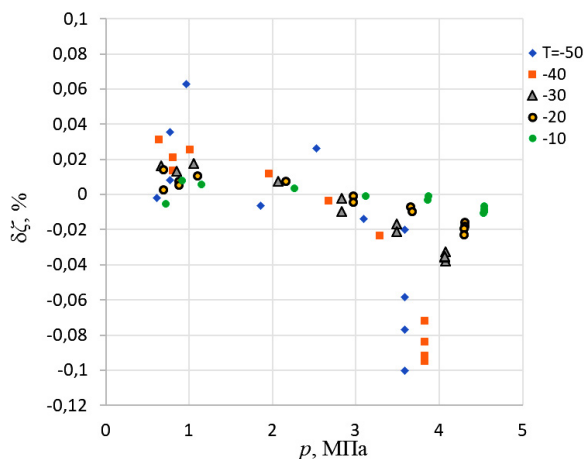


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных и расчета по уравнению AGA8 report 1 Detail (состав 1). Зависимость $\delta\zeta$ от давления при $T=\text{const}$

2. AGA8 Report 1 Detail.

Результаты сопоставления экспериментально полученных значений с расчетными данными, полученными для тех же газов по методике AGA8 Report 1 Detail, представлены на рис. 3. В исследуемом диапазоне температуры и давлений отклонения результатов расчета от эксперимента не превышают $\pm 0,1$ %. Из графиков $\delta\zeta$ также видно, что при понижении температуры разброс данных увеличивается. Однако представление этих данных в виде зависимости от давления при постоянной температуре (рис. 4) показывает, что данные, относящиеся к какой-либо одной температуре, выражено зависят от давления, а разброс данных при этом существенно снижается. Следовательно, увеличение разброса данных на рис. 4 вызвано, прежде всего, различной зависимостью рассчитанного коэффициента сжимаемости от давления при низких температурах по сравнению с экспериментом.

3. AGA8-DC 92.

Характер распределения $\delta\zeta$ в зависимости от температуры и давления рабочей среды для данных, полученных по уравнению AGA8-DC 92 (рис. 5), носит аналогичный характер и также укладывается

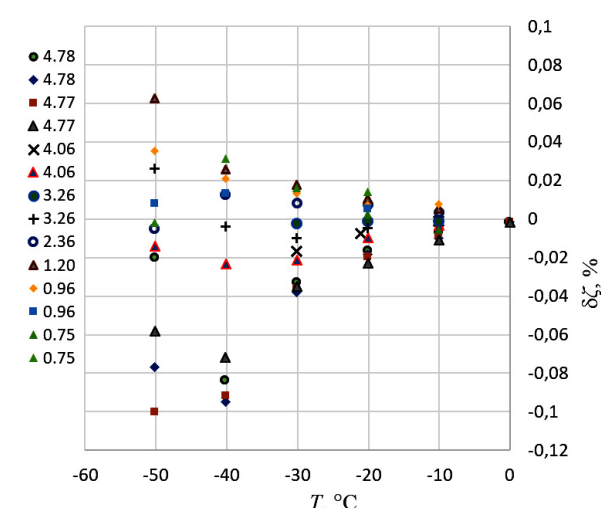


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных и расчета по уравнению AGA8-DC92. Зависимость $\delta\zeta$ от температуры; параметр — начальное давление, МПа

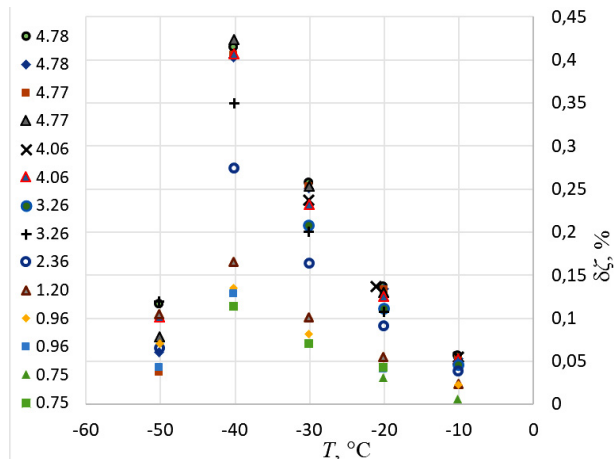


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных и расчета по уравнению NX19. Зависимость $\delta\zeta$ от температуры; параметр — начальное давление, МПа

в диапазон $-0,1...0,1$ %. Следовательно, данное уравнение также может быть применимо для расчета коэффициента сжимаемости природного газа в области низких температур.

4. ГОСТ Р 8.662-2009 (ISO 20765-1).

Отклонение экспериментальных данных от расчетов, выполненных по уравнению ГОСТ Р 8.662-2009 (ISO 20765-1), имеет характер, аналогичный предыдущим рассмотренным случаям (рис. 1–5), с выраженным расширением диапазона разброса данных по мере снижения температуры в силу вышеуказанных причин. Максимальное отклонение в данном случае также не выходит за пределы $\pm 0,1$ %, что в целом соответствует заявленным требованиям к точности расчета.

5. Уравнения состояния для сокращенного компонентного состава GERG-91, NX19.

Уравнения GERG-91, NX19, в отличие от предыдущих, не требуют знания полного компонентного состава газовой смеси, для их применения достаточно указания молярной доли азота и диоксида углерода.

Аналогично предыдущим рассмотренным случаям, отклонение результатов при расчете коэф-

Авторы выражают благодарность коллективу ООО Центр метрологии «СТП» за активное участие в научно-исследовательских работах, результаты которых положены в основу данной статьи.

Библиографический список

1. ГОСТ 2939-63. Газы. Условия для определения объема. Введ. 01–01–1964. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 3 с.
2. ГОСТ Р 8.740-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход и количество газа. Методика измерений с помощью турбинных, ротационных и вихревых расходомеров и счетчиков. Введ. 01–01–2013. Москва: Стандартинформ, 2010. 57 с.
3. Ганиев Р. И., Кутовой Д. Ю., Фафурин В. А., Шустрова М. Л., Явкин В. Б. Оценка применимости уравнений состояния природного газа в области низких температур // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 4–10. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-4-10.
4. ГОСТ 8.611-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход и количество газа. Методика (метод) измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода. Введ. 01–07–2014. Москва: Стандартинформ, 2013. 54 с.
5. Ганиев Р. И., Кутовой Д. Ю., Фафурин В. А., Шустрова М. Л., Явкин В. Б. Влияние погрешностей определения коэффициента сжимаемости на результат измерения расхода природного газа при низких температурах // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 4 (50). С. 16–21.
6. Kunz O., Wagner W. The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An expansion of GERG-2004 // Journal of Chemical & Engineering Data. 2012. № 57 (11). P. 3032–3091. DOI: 10.1021/je300655b.
7. Jaeschke M., Humphreys A. E. The GERG Databank of High Accuracy Compressibility Factor Measurements // GERG Technical Monograph. 1991. Vol. 6, № 251. URL: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/technical_monographs/tm4_91.pdf (дата обращения: 23.12. 2023).
8. Jaeschke M., Humphreys A. E. Standard GERG Virial Equation for Field Use, Simplification of the Input Data Requirements for the GERG Virial Equation — an Alternative Means of Compressibility Factor Calculation for Natural Gases and Similar Mixtures // GERG Technical Monograph. 1992. Vol. 6, № 266. URL: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/technical_monographs/tm5_large.pdf (дата обращения: 23.12. 2023).
9. Jaeschke M., Hinze H. M., Humphreys A. E. Supplement to the GERG databank of High-Accuracy Compression Factor Measurements // GERG Technical Monograph. 1997. Vol. 6, № 355. URL: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/technical_monographs/tm7_97.pdf (дата обращения: 23.12. 2023).
10. Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures // GERG Technical Monograph. 2007. Vol. 6, № 557. URL: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/technical_monographs/tm15_04.pdf. (дата обращения: 25.12. 2023).
11. Китаев Д. Н., Недобежкин Д. О., Богданов В. М. [и др.]. Коэффициент сжимаемости природного газа расчетного состава // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2019. № 1 (14). С. 29–33. EDN: ТККQDQ.
12. Kutovoy D. Y., Lovtsov P. V., Yatsenko I. A., Mukhametov A. N., Ganiev R. I., Yavkin V. B. Experimental determination of the compressibility factor of natural gas: methods and results // Measurement Techniques. 2021. Vol. 64, № 9. P. 737–743. DOI: 10.1007/s11018-022-01997-7.
13. Кутовой Д. Ю., Ганиев Р. И., Шустрова М. Л., Явкин В. Б., Миннегалиева Л. В., Фафурин В. А. Апробация ме-

фициента сжимаемости по уравнениям состояния GERG-91 и NX19 возрастает по мере понижения температуры. Зависимость $\delta\zeta$ от величины давления в данном случае так же прослеживается, ее характер аналогичен предыдущим случаям. Однако величина отклонений расчетных значений с экспериментом в данном случае существенно превышает значение аналогичного показателя для приведенных выше методик. Так, для компонентного состава первой газовой смеси отклонение расчетов и эксперимента достигает 1,2 % для GERG-91 и 0,45 % для NX19. Для второй смеси отклонение результатов, полученных по уравнению GERG-91, изменяется в пределах от 0 до 1,6 %, а для уравнения NX19 (рис. 6) от 0 до 0,65 %.

Поскольку полученные погрешности превышают 0,1 %, расчетные методики GERG-91 и NX19 не могут быть рекомендованы для использования при температурах ниже 250 К.

6. ГСССД МР 118-05 (Умеренно сжатые газовые смеси).

Отклонение результатов расчета, полученное в случае применения расчетной методики ГСССД МР 118-05 лежит в пределах от 0,12 % до 0,15 % и от минус 0,2 до 0,16 % для первого и второго компонентных составов соответственно. Результаты, полученные в процессе сопоставления с экспериментом результата расчета по методике ГСССД МР 118-05 для умеренно сжатых газовых смесей, в целом повторяют обозначенные тенденции, отмеченные для распределения коэффициента сжимаемости в функции температуры и давления.

7. ГСССД МР 113-03 (Влажный нефтяной газ).

Применение уравнения, представленного в ГСССД МР 113-03, в свою очередь, позволяет получить результаты, отклонения $\delta\zeta$ которых изменяются в диапазоне от минус 0,06 до 0,085 % и от минус 0,45 до 0,11 % для каждой смеси соответственно. Отмеченные ранее тенденции в данном случае сохраняются, однако величина отклонений для второй смеси превышает 0,1 %, поэтому данная методика не может быть рекомендована для использования в области низких температур.

Заключение. Результаты, полученные в настоящей работе, подтверждают применимость ряда расчетных методик для определения коэффициента сжимаемости природного газа в области низких температур. Из проведенного исследования следует, что расчетные методики, изложенные в GERG-2004/2008, AGA8-DC 92, AGA8 report 1 detail, ISO 20765 (ГОСТ Р 8.662-2009), позволяют проводить расчет коэффициента сжимаемости природного газа в области температур 220...250 К с погрешностью, не превышающей 0,1 %.

Отклонения от экспериментальных данных при расчетах по уравнениям для влажного нефтяного газа ГСССД МР 113-03, умеренно сжатых газовых смесей ГСССД МР 118-05 и уравнениям, использующим неполный компонентный состав (GERG-91 и NX19), выходят за пределы 0,1 %, и, соответственно, данные расчетные методики не могут быть рекомендованы к применению при низких температурах.

Полученные в данном исследовании сведения имеют высокую значимость для практики измерения расхода при низких температурах. Применение их на практике служит повышению точности процедуры приведения объема природного газа к стандартным условиям при низких температурах, что способствует повышению достоверности учета природного газа в области низких температур.

тодики определения коэффициента сжимаемости на чистых средах и воздухе // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 6. С. 49–54. DOI: 10.25699/SSSB.2023.52.6.003.

14. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. Введ. 01–07–1997. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. 61 с.

15. ГОСТ 30319.2-2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. Введ. 01–01–1997. Москва: Стандартиформ, 2016. 13 с.

16. ГОСТ Р 8.662-2009 (ИСО 20765-1:2005). Государственная система обеспечения единства измерений. Газ природный. Термодинамические свойства газовой фазы. Методы расчетного определения для целей транспортирования и распределения газа на основе фундаментального уравнения состояния AGA8. Введ. 01–01–2011. Москва: Стандартиформ, 2010. 41 с.

17. ISO 20765-2:2015. Natural gas — Calculation of thermodynamic properties. Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application. URL: <https://www.iso.org/standard/59222.html> (дата обращения: 03.01. 2024).

18. ГСССД МР 118-2005. Расчет плотности, фактора сжимаемости, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости умеренно сжатых газовых смесей. Москва, 2005. 32 с. Деп. в ГНМЦ «ССД» 15.09.2005, № 812а-05кк.

19. ГСССД МР 113-2003 Определение плотности, фактора сжимаемости, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости влажного нефтяного газа в диапазоне температур 263...500 К при давлениях до 15 МПа. Москва, 2003. 48 с. Деп. в ГНМЦ «ССД» 10.06.2003, № 804-03кк.

КУТОВОЙ Денис Юрьевич, заместитель начальника Управления по внедрению и эксплуатации АСКУТ и метрологии ООО «Газпром межрегионгаз», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 4454-6579

AuthorID (РИНЦ): 1221096

AuthorID (SCOPUS): 57454390400

ГАНИЕВ Раис Ильясович, кандидат технических наук, начальник отдела перспективных разработок ООО Центр метрологии «СТП», г. Казань.

ORCID: 0000-0002-0817-1491

AuthorID (SCOPUS): 57454398500

ШУСТРОВА Марина Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем сбора и обработки информации Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ), г. Казань.

SPIN-код: 7363-4825

AuthorID (РИНЦ): 692110

ORCID: 0000-0002-1230-4154

AuthorID (SCOPUS): 55899044400

ResearcherID: AAB-9523-2020

Адрес для переписки: shu.ma@bk.ru

ЯВКИН Владимир Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева, г. Казань.

SPIN-код: 6292-3020

AuthorID (РИНЦ): 16521

ORCID: 0000-0002-3837-6033

AuthorID (SCOPUS): 6507971971

ФАФУРИН Виктор Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем сбора и обработки информации КНИТУ, г. Казань.

SPIN-код: 2211-7181

AuthorID (РИНЦ): 650664

ORCID: 0000-0002-3814-2544

AuthorID (SCOPUS): 16021867600

Для цитирования

Кутовой Д. Ю., Ганиев Р. И., Шустрова М. Л., Явкин В. Б., Фафури В. А. Экспериментальное исследование применимости методик определения коэффициента сжимаемости природного газа в области низких температур // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 163–170. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-163-170.

Статья поступила в редакцию 26.02.2024 г.

© Д. Ю. Кутовой, Р. И. Ганиев, М. Л. Шустрова,

В. Б. Явкин, В. А. Фафури

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE APPLICABILITY OF METHODS FOR CALCULATING THE COMPRESSIBILITY FACTOR OF NATURAL GAS AT LOW TEMPERATURES

The article is devoted to the analysis of compressibility factor calculation methods in the temperature range from 220 to 250 K. The AGA8-92DC (GOST 30319.2-96), AGA8 Report Detail (GOST 30319.3-2015), GERG-2004/2008, NX19, GERG-91, ISO 20765-1 (GOST R 8.662-2009), GSSSD MR 118-05 (moderately compressed gas mixtures) and GSSSD MR 113-03 (Wet Oil Gas) methods are experimentally tested. Deviations of experimental data and calculated values of compressibility coefficient determined by the specified methods are shown. It is found out that the deviation of the calculated values of the compressibility factor according to the AGA8-92DC, AGA8 Report 1 Detail, GERG-2004/2008, ISO 20765-1 (GOST R 8.662-2009), GSSSD MR 13-03 methods from the experimental ones does not exceed 0,1 %. This fact confirms the possibility of using these methods in the temperature range from 220 to 250 K. The results obtained in the framework of this study are highly significant for flow metering, and in particular, provide an increase in the accuracy of the procedure for bringing the volume of natural gas to standard conditions at low temperatures.

Keywords: compressibility factor, natural gas flow rate, AGA8, GERG-2004, calculation method, low temperatures.

Acknowledgments

The authors of the article express gratitude to the staff of the LLC Metrology Center «STP» for their active participation in research work, the results of which are the basis of this article.

References

1. GOST 2939-63. Gazy. Usloviya dlya opredeleniya ob'yema [Gases. Conditions for determination of volume]. Moscow, 1988. 3 p. (In Russ.).
2. GOST R 8.740-2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Raskhod i kolichestvo gaza. Metodika izmereniy s pomoshch'yu turbinnnykh, rotatsionnykh i vikhrevykh raskhodomerov i schetchikov [State system for ensuring the uniformity of measurements. Flow rate and quantity of gas. Measurements procedure by turbine, rotary

and vortex flow meters and gas meters]. Moscow, 2010. 57 p. (In Russ.).

3. Ganiev R. I., Kutovoy D. Yu., Fafurin V. A., Shustrova M. L., Yavkin V. B. Otsenka primenimosti uravneniy sostoyaniya prirodnogo gaza v oblasti nizkikh temperature [Applicability Evaluation of Natural Gas State Equations at Low Temperatures] // *Intellectual'nyye sistemy v proizvodstve. Intellectual Systems in Production*. 2023. Vol. 21, no. 3. P. 4–10. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-4-10. (In Russ.).
4. GOST 8.611-2013. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Raskhod i kolichestvo gaza. Metodika (metod) izmereniy s pomoshch'yu ul'trazvukovykh preobrazovateley raskhoda [State system for ensuring the uniformity of measurements. Flow rate and quantity of gas. Technique (method) of measurements by ultrasonic meters]. Moscow, 2013. 54 p. (In Russ.).
5. Ganiev R. I., Kutovoy D. Yu., Fafurin V. A., Shustrova M. L., Yavkin V. B. Vliyaniye pogreshnostey opredeleniya koeffitsiyenta

szhimayemosti na rezul'tat izmereniya raskhoda prirodnogo gaza pri nizkikh temperaturakh [Effect of compressibility factor error on low temperature natural gas flow measurement] // Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2023. No 4. (50). P. 16–21. (In Russ.).

6. Kunz O., Wagner W. The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An expansion of GERG-2004 // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2012. No. 57 (11). P. 3032–3091. DOI: 10.1021/je300655b. (In Engl.).

7. Jaeschke M., Humphreys A. E. The GERG Databank of High Accuracy Compressibility Factor Measurements // GERG Technical Monograph. 1991. Vol. 6, no. 251. URL: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/technical_monographs/tm4_91.pdf (accessed: 23.12.2023). (In Engl.).

8. Jaeschke M., Humphreys A. E. Standard GERG Virial Equation for Field Use, Simplification of the Input Data Requirements for the GERG Virial Equation — an Alternative Means of Compressibility Factor Calculation for Natural Gases and Similar Mixtures // GERG Technical Monograph. 1992. Vol. 6, no. 266. URL: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/technical_monographs/tm5_large.pdf (accessed: 23.12.2023). (In Engl.).

9. Jaeschke M., Hinze H. M., Humphreys A. E. Supplement to the GERG databank of High-Accuracy Compression Factor Measurements // GERG Technical Monograph. 1997. Vol. 6, no. 355. URL: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/technical_monographs/tm7_97.pdf (accessed: 25.12.2023). (In Engl.).

10. Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures // GERG Technical Monograph. 2007. Vol. 6, no. 557. URL: http://www.gerg.eu/public/uploads/files/publications/technical_monographs/tm15_04.pdf. (accessed: 25.12.2023). (In Engl.).

11. Kitayev D. N., Nedobezhkin D. O., Bogdanov V. M. [et al.]. Koeffitsiyent szhimayemosti prirodnogo gaza raschetnogo sostava [Natural gas composition ratio design structure] // *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikatsii. Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii*. 2019. No. 1 (14). P. 29–33. EDN: TKKQDQ. (In Russ.).

12. Kutovoy D. Y., Lovtsov P. V., Yatsenko I. A., Mukhamev A. N., Ganiev R. I., Yavkin V. B. Experimental determination of the compressibility factor of natural gas: methods and results // *Measurement Techniques*. 2021. Vol. 64, no. 9. P. 737–743. DOI: 10.1007/s11018-022-01997-7. (In Engl.).

13. Kutovoy D. Yu., Ganiev R. I., Shustrova M. L., Yavkin V. B., Minnegaliev L. V., Fafurin V. A. Aprobatsiya metodiki opredeleniya koeffitsiyenta szhimayemosti na chistyykh sredakh i vozdukhhe [Test procedure for determination of compressibility coefficient on pure gases and air] // *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. South-Siberian Scientific Bulletin*. 2023. No. 6. P. 49–54. DOI: 10.25699/SSSB.2023.52.6.003. (In Russ.).

14. GOST 30319.2-96. Gaz prirodnyy. Metody rascheta fizicheskikh svoystv. Opredeleniye koeffitsiyenta szhimayemosti [Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Definition of compressibility coefficient]. Minsk, 1996. 61 p. (In Russ.).

15. GOST 30319.2-2015. Gaz prirodnyy. Metody rascheta fizicheskikh svoystv. Opredeleniye koeffitsiyenta szhimayemosti [Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Calculation of physical properties on base information on density of standards conditions and nitrogen and carbon dioxide contents]. Moscow, 2016. 13 p. (In Russ.).

16. GOST R 8.662-2009 (ISO 20765-1:2005). Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Gaz prirodnyy. Termodinamicheskiye svoystva gazovoy fazy. Metody raschetnogo opredeleniya dlya tseyey transportirovaniya i raspredeleniya gaza na osnove fundamental'nogo uravneniya sostoyaniya AGA8 [State system for ensuring the uniformity of measurements. Natural gas. Gas phase thermodynamic properties. Methods of calculation for transmission and distribution applications on base of the AGA8 fundamental equation of state]. Moscow, 2010. 41 p. (In Russ.).

17. ISO 20765-2:2015. Natural gas — Calculation of thermodynamic properties. Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application. URL: <https://www.iso.org/standard/59222.html> (accessed: 03.01.2024). (In Engl.).

18. GSSSD MR 118-2005. Raschet plotnosti, faktora szhimayemosti, pokazatelya adiabaty i koeffitsiyenta dinamicheskoy vyazkosti umerenno szhatykh gazovykh smesey [Guidelines. Calculating density, compressibility factor, adiabatic exponent and dynamic viscosity for moderately dense gas mixtures]. Moscow, 2005. 32 p. Dep. CSMC «SRD» 15.09.2005, no. 812a-05kk. (In Russ.).

19. GSSSD MR 113-2003. Opredeleniye plotnosti, faktora szhimayemosti, pokazatelya adiabaty i koeffitsiyenta dinamicheskoy vyazkosti vlazhnogo neftyanogo gaza v diapazone temperatur 263...500 K pri davleniyakh do 15 MPa [Guidelines. determination of density, compressibility factor, adiabatic index and dynamic viscosity coefficient of wet petroleum gas in the range of 263...500 K temperatures at pressures up to 15 MPa]. Moscow, 2003. 48 p. Dep. CSMC «SRD» 10.06.2003, no. 804-03kk. (In Russ.).

KUTOVOY Denis Yuryevich, Deputy Head of Implementation and Operation of ASKUG and Metrology Department, LLC «Gazprom Mezhhregiongaz», Saint Petersburg.

SPIN-code: 4454-6579

AuthorID (RSCI): 1221096

AuthorID (SCOPUS): 57454390400

GANIEV Rais Ilyasovich, Candidate of Technical Sciences, Head of Advanced Development Department, LLC Metrology Center «STP», Kazan.

ORCID: 0000-0002-0817-1491

AuthorID (SCOPUS): 57454398500

SHUSTROVA Marina Leonidovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Automated Information Collection and Processing Systems Department, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan.

SPIN-code: 7363-4825

AuthorID (RSCI): 692110

ORCID: 0000-0002-1230-4154

AuthorID (SCOPUS): 55899044400

ResearcherID: AAB-9523-2020

Correspondence address: shu.ma@bk.ru

YAVKIN Vladimir Borisovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan.

SPIN-code: 6292-3020

AuthorID (RSCI): 16521

ORCID: 0000-0002-3837-6033

AuthorID (SCOPUS): 6507971971

FAFURIN Viktor Andreyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Automated Information Collection and Processing Systems Department KNRTU, Kazan.

SPIN-code: 2211-7181

AuthorID (RSCI): 650664

ORCID: 0000-0002-3814-2544

AuthorID (SCOPUS): 16021867600

For citations

Kutovoy D. Yu., Ganiev R. I., Shustrova M. L., Yavkin V. B., Fafurin V. A. Experimental verification of the applicability of methods for calculating the compressibility factor of natural gas at low temperatures // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 163–170. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-163-170.

Received February 26, 2024.

© D. Yu. Kutovoy, R. I. Ganiev, M. L. Shustrova, V. B. Yavkin, V. A. Fafurin

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