

ISSN 1999-5458

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3-4, т. 17, 2021

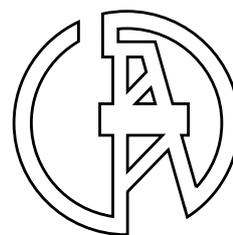
Electrical and data processing facilities and systems

№ 3-4, т. 17, 2021



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



УГНТУ

№ 3-4, т. 17, 2021

Журнал основан в 2005 году. Выходит 4 раза в год.

Учредитель

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

Журнал 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».

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Главный редактор:
М.И. Хакимьянов — д-р техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)

Члены редакционной коллегии:

К. Лингфей — Ph. D, профессор
«Нанкинский университет авиации и аэронавтики»
(г. Нанкин, Китай)



А. Вахеда — Ph. D, профессор
«Иранский университет науки и технологий»
(г. Тегеран, Иран)



В.М. Артюшенко — д-р техн. наук, профессор
ГБОУ ВО МО «Технологический университет»
(г. Москва, Российская Федерация)



М.А. Ураксеев — д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



М.Ю. Долوماتов — д-р хим. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Н.А. Феоктистов — д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет дизайна и технологий» (г. Москва, Российская Федерация)



В.Г. Крымский — д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Ф.Ф. Хизбуллин — д-р хим. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



В.Г. Кушнир — д-р техн. наук, профессор
Костанайского регионального университета имени Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Казахстан)



В.А. Шабанов — канд. техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Зам. главного редактора:

Зам. главного редактора:
Р.Т. Хазиева — канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)

С.В. Павлов — д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Р.Р. Сафин — д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»
(г. Уфа, Российская Федерация)



И. Цицмане — д-р техн. наук, профессор
Рижского технического университета, эксперт научного совета Латвийской академии наук (г. Рига, Латвия)



Б. Брудник — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Тель-Авивского университета (г. Тель-Авив, Израиль)



А.С. Глазырин — д-р техн. наук, профессор ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Российская Федерация)



М.А. Григорьев — д-р техн. наук, профессор ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск, Российская Федерация)



В.П. Метельков — д-р техн. наук, профессор ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Российская Федерация)



А.А. Николаев — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск, Российская Федерация)



А.Б. Петрович — д-р техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь, Российская Федерация)



Р.Р. Саттаров — д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Ответственный секретарь: П. И. Васильев
Технический редактор: С. В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте www.ugues.ru
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-67387 от 05.10.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021.

Адрес редакции и издательства: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
Тел.: (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 03.02.2022 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14.42.
Тираж 1 000 экз. Заказ № 24.

Адрес типографии: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы», допускается только с письменного разрешения редакции.

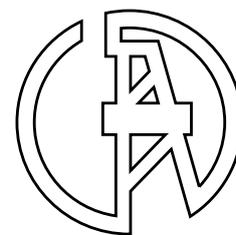
Материалы приводятся в авторской редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых статей.

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 3-4, v. 17, 2021

The journal was founded in 2005. Issued 4 times a year.

Founder

Federal State-Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» (USPTU)

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of theses on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences».

International standard serial number ISSN 1999-5458.

Editorial board:

Editor-in-chief:

M.I. Khakimyanov — Dr. Sci. Tech.,
Associate Professor of FSBEI HE «Ufa State Petroleum
Technological University»
(Ufa, Russia)

Members of an editorial board:

X. Lingfei — Ph. D., Professor of Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics
(Nanjing, China)

A. Vahedi — Ph. D., Professor of Iran University
of Science & Technology
(Tehran, Iran)

V.M. Artyushenko — Dr. Sci. Tech., Professor
of SBEI HE MR «University of Technology»
(Moscow, Russia)

M.A. Urakseev — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»
(Ufa, Russia)

M.Yu. Dolomatov — Dr. Sci. Chem., Professor
of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russia)

N.A. Feoktistov — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Moscow State University of Design and
Technology» (Moscow, Russia)

V.G. Krymsky — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russia)

F.F. Hizbullin — Dr. Sci. Chem., Professor
of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russia)

V.G. Kushnir — Dr. Sci. Tech., Professor
of Akhmet Baitursynov Kostanay Regional University
(Kostanay, Kazakhstan)

V.A. Shabanov — Cand. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russia)

Deputy editor-in-chief:

R.T. Khazieva — Cand. Sci. Tech.
of FSBEI HE «Ufa State Petroleum
Technological University»
(Ufa, Russia)



S.V. Pavlov — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»
(Ufa, Russia)



R.R. Safin — D. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Bashkir State University»
(Ufa, Russia)



I. Zicmane — Dr. Sci. Tech., Professor
of Riga Technical University, Expert of the Latvian Council
of Science (Riga, Latvia)



B. Brudnik — Dr. Sci. Tech., Leading Researcher
of Tel Aviv University
(Tel Aviv, Israel)



A.S. Glazyrin — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSAEI HE «National Research Tomsk Polytechnic University»
(Tomsk, Russia)



M.A. Grigorev — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSAEI HE «South Ural State University»
(Chelyabinsk, Russia)



V.P. Metelkov — Dr. Sci. Tech., Professor of FSAEI HE
«Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin» (Yekaterinburg, Russia)



A.A. Nikolaev — Cand. Sci. Tech., Associate Professor
of FSBEI HE «Nosov Magnitogorsk State Technical University»
(Magnitogorsk, Russia)



A.B. Petrochenkov — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Perm National Research Polytechnic University»
(Perm, Russia)



R.R. Sattarov — Dr. Sci. Tech., Professor
of FSBEI HE «Ufa State Aviation Technical University»
(Ufa, Russia)



Assistant editor: P. I. Vasiliev

Technical editor: S. V. Khalitova

The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC).

Access and subscription to the electronic version of the journal is available on the website www.ugues.ru.

Mass media registration certificate ПИ № ФС 77–67387 dd. 05.10.2016 given by Federal service of supervision in the scope of communication, information technologies and mass media.

© Ufa State Petroleum Technological University, 2021.

Address of Editors office and Founder: 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 03.02.2022 Paper format 60×84/8. Offset printing. 14.42 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 24.

Address of Publishing Office: 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without prior written consent of the Editors office of the «Electrical and data processing facilities and systems».

The items of this publication preserve original edition by their authors.

The Editors office do not always share an opinion of authors of the articles published.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Баннов Д.М.* Анализ методов диагностики обрыва стержня ротора асинхронного двигателя 5
- Буньков Д.С.* Обзор методов оценивания параметров схемы замещения асинхронной электрической машины для организации векторной системы управления 24
- Пичугин П.И.* Решение обратной задачи нахождения поверхностной плотности заряда по известному электрическому потенциалу средствами Comsol Multiphysics 39
- Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф.* Конический спиральный датчик вибрации с улучшенными метрологическими характеристиками 49

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Алаева Н.Н., Ситдикова И.П.* К вопросу непрерывного контроля параметров добываемой продукции нефтяных скважин 63
- Зайцева А.А., Лихачев Е.А., Дудаев Н.О., Щербаков К.В.* Высокопроизводительный информационно-управляющий комплекс для перспективного высокоскоростного вертолета 72
- Хамитов Р.Н., Зыкин П.В., Глазырин А.С.* Разработка нечеткой системы управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на основе совместно используемых функций принадлежности 82
- Коледин О.С., Долوماتов М.Ю., Ковалева Э.А., Гарипов Р.В., Валеев М.Р.* Модель QSPR для прогноза октановых чисел углеводородов ряда алкенов по топологическим характеристикам молекул 92
- Пудовкин А.Н., Халиков Р.М., Булатов Б.Г., Соколова В.В., Недосеко И.В.* Цифровое регулирование параметров в системе автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси 103
- Об авторах** 114
- Список статей, изданных в 2021 году** 118

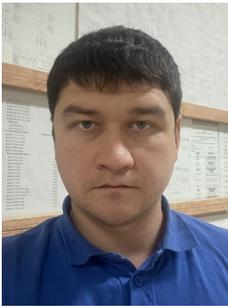
Content

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

- Bannov D.M.* Analysis of methods for diagnostics broken rotor bar of induction motor 5
- Bunkov D.S.* The review methods of induction machine equivalent circuit parameters estimation for field oriented control implementation 24
- Pichugin P.I.* Solution of an inverse problem of finding surface charge density with a known electrical potential using Comsol Multiphysics 39
- Safitullin R.A., Yangirov I.F.* Conical spiral vibration sensor with improved metrological characteristics 49

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

- Alaeva N.N., Sitdikova I.P.* On continuous monitoring of oil well production parameters 63
- Zaytseva A.A., Likhachev E.A., Dudaev N.O., Shcherbakov K.V.* High performance information and control complex for perspective high-speed helicopter 72
- Hamitov R.N., Zykin P.V., Glazyrin A.S.* Development of fuzzy CNC lathe drive control system based on shared accessory functions 82
- Koledin O.S., Dolomatov M.Yu., Kovaleva E.A., Garipov R.V., Valeev M.R.* The QSPR model for prediction of octane numbers of hydrocarbons of series of alkenes by topological characteristics of molecules 92
- Pudovkin A.N., Khalikov R.M., Bulatov B.G., Sokolova V.V., Nedoseko I.V.* Digital regulation of parameters in the automated control system of asphalt concrete mixture 103
- About the authors** 114
- List of articles published in 2021** 118



Дмитрий Михайлович Баннов
Dmitriy M. Bannov

*инженер кафедры «Электрические станции»,
Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия*

УДК 621.313.333.2, 621.317.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-5-23

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОБРЫВА СТЕРЖНЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Актуальность

Бесперебойная работа объектов промышленности, нефтегазового сектора, металлургии, генерации электроэнергии и прочих отраслей напрямую зависит от надежной работы ответственных механизмов, приводимых во вращение электромеханическими преобразователями, эксплуатируемыми в составе рабочих комплексов. Надежность работы таких механизмов зависит от надежности всех элементов, составляющих технологический процесс.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (в том числе и высоковольтный) является одним из самых распространенных видов преобразователей электрической энергии в механическую энергию. Его бесперебойная эксплуатация напрямую зависит от надежности двух основных элементов: статора и ротора. Если причины выхода из строя асинхронного двигателя из-за статора (межвитковые, междуфазные и однофазные короткие замыкания) определяются предусмотренными защитами, то повреждения в роторной цепи могут носить неявный характер и существовать продолжительное время, нарушая безотказность машины.

Большинство неисправностей в асинхронном двигателе, приводящих к аварийному останову технологических процессов рабочих комплексов, также имеют свою историю развития. В момент возникновения и в период, когда дефект не влияет на работоспособность машины, но ее эксплуатация становится критически опасной, отсутствует возможность определения наличия неисправности. Так, например, обрыв стержня короткозамкнутого ротора высоковольтного асинхронного двигателя проявляет себя на стадии выхода в сторону воздушного зазора в момент эксплуатации с последующим повреждением статорной обмотки и магнитопровода. При этом существование данного дефекта имело место в течение некоторого промежутка времени, достаточного для его обнаружения средствами диагностических устройств.

В статье проанализированы разработанные на сегодняшний день системы диагностирования наличия неисправности по различным параметрам (температура, шум, вибрация, анализ потребляемых электрических величин) как в статоре, так и в роторе. Определено, что наиболее перспективными и технически реализуемыми являются методы, основанные на анализе токов статора.

При изучении работ по направлению диагностики асинхронного двигателя выявлено, что значительная доля отказов механизмов, эксплуатируемых в составе рабочих комплексов, по причине выхода из строя асинхронного двигателя происходит из-за обрыва стержня короткозамкнутого ротора. В связи с этим в статье уделяется повышенное внимание анализу методов диагностирования обрыва стержня короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя.

Цель исследования

Провести анализ существующих методов диагностирования асинхронных двигателей в процессе эксплуатации.

Методы исследования

В статье применялись общенаучные методы исследования: метод анализа литературных источников, изучение и обобщение сведений, сравнение, классифицирование.

Результаты

Проведен анализ существующих методов непрерывной диагностики асинхронных двигателей на предмет внутренних электрических и механических повреждений. Определено, что наиболее перспективным с точки зрения экономической и технической целесообразности являются методы, основанные на анализе потребляемых статором токов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, обрыв стержня ротора, диагностика электрооборудования, сигнатурный анализ, MCSA, вейвлет-преобразование, быстрое преобразование Фурье, аналого-цифровое преобразование

ANALYSIS OF METHODS FOR DIAGNOSTICS BROKEN ROTOR BAR OF INDUCTION MOTOR

Relevance

Uninterrupted operation of industrial facilities, oil and gas sector, metallurgy, power generation and other industries directly depends on reliable operation of critical mechanisms driven by electromechanical converters, operated as a part of working complexes. Reliability of operation of such mechanisms depends on reliability of all elements that make up the technological process.

Inductions motor with squirrel-cage rotor (including high-voltage motors) is one of the most common types of converters of electrical energy into mechanical energy. Its uninterrupted operation directly depends on the reliability of two main elements: stator and rotor. If the causes of induction motor failure due to stator causes (inter-turn, inter-phase and single-phase short circuits) are determined by the provided protections, the damage in the rotor circuit can be implicit and exist for a long time, violating the machine uptime.

Also, most of the faults in the inductions motor, leading to an emergency shutdown of technological processes of working complexes have their own history of development. At the moment of occurrence and during the period when the defect does not affect the serviceability of the machine, but its operation becomes critically dangerous, because it is not possible to determine the presence of the defect. So, for example, the breakage of the short-circuited rotor core of a high-voltage induction motor manifests itself at the stage of exit to the air gap at the time of operation, with subsequent damage to the stator winding and the magnetic core. In this case, the existence of this defect took place within a certain period of time, sufficient for its detection by means of diagnostic devices.

The article analyzes the currently developed systems for diagnosing the presence of a fault according to various parameters (temperature, noise, vibration, analysis of electrical values consumed) both in the stator and in the rotor. It is determined that the most promising and technically feasible are methods based on the analysis of stator currents.

When studying the works in the direction of inductions motor diagnostics it was found that a significant proportion of failures of mechanisms operated in the working complexes due to failure of inductions motor occurs due to broken rotor bar.

Aim of research

Analyze the existing methods for diagnosing induction motors during operation.

Research methods

The article used general scientific research methods: the method of analysis of literary sources, the study and generalization of information, comparison, classification.

Results

The analysis of existing methods of continuous diagnostics of induction motors for internal electrical and mechanical damage is carried out. It has been determined that the most

promising from the point of view of economic and technical feasibility are methods based on the analysis of currents consumed by the stator.

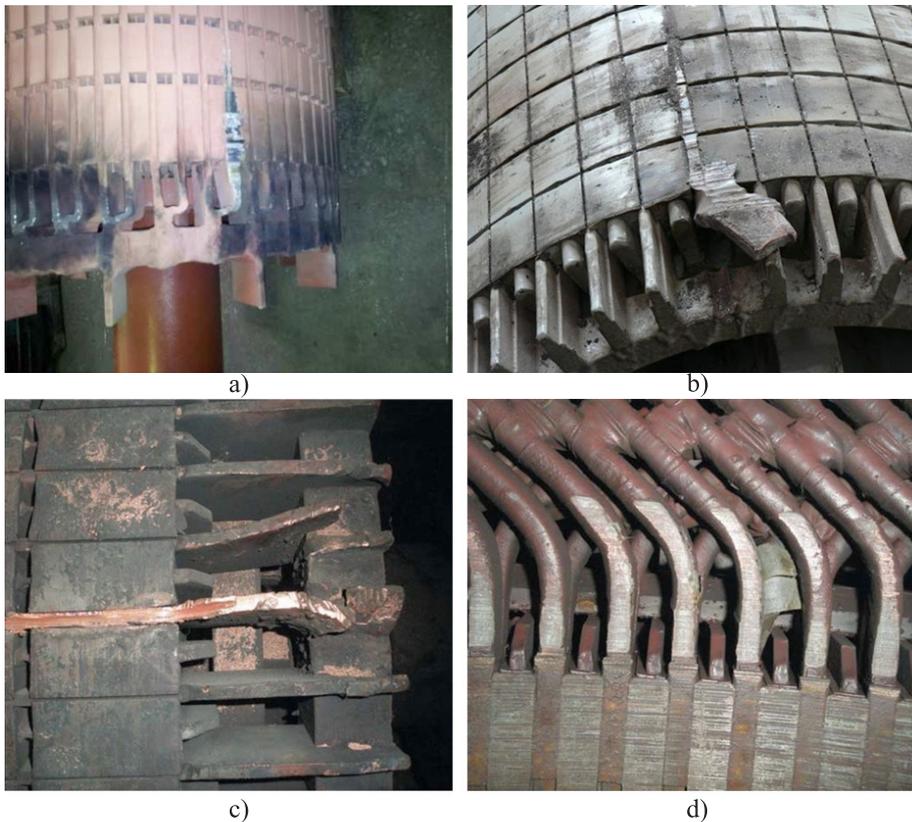
Keywords: induction motor, squirrel-cage rotor, broken rotor bar, electrical equipment diagnostics, signature analysis, MCSA, wavelet transform, fast Fourier transform, analog-to-digital transform

Введение

Высоковольтные асинхронные двигатели (АД) в большинстве случаев работают в тяжелых условиях (загрязнение, пыль, неравномерная нагрузка, затяжные пуски и пр.) и подвержены повышенному износу. При этом самым нагруженным элементом АД является ротор, в процессе эксплуатации он подвержен воздействию

центробежных сил, тепловому расширению, ударным токовым нагрузкам, электродинамическим усилиям, и в некоторых случаях «беличья клетка» ротора теряет свою целостность.

На рисунке 1 представлены последствия выхода стержня ротора высоковольтного АД из паза в сторону воздушного зазора [1, 2].



- a) выход стержня из паза ротора АД типа АДЧР-1600 с последующим коротким замыканием статорной обмотки; b) выход стержня из паза ротора АД типа ДАЗО;
 c) выход стержня из паза ротора АД типа АНЗ;
 d) повреждение обмотки статора высоковольтного АД типа АНЗ

- a) rotor bar exit from rotor slot of IM ADCHR-1600 with subsequent short circuit of stator winding; b) rotor bar exit from rotor slot of IM DAZO type;
 c) rotor bar exit from rotor slot of IM ANZ type; d) stator damage of IM ANZ type

Рисунок 1. Последствия выхода стержня ротора высоковольтного АД из паза в сторону воздушного зазора

Figure 1. Consequences of the rotor bar exit of the high-voltage IM from the rotor slot to the air gap

Техническая диагностика электродвигателя определяется как непрерывная оценка работоспособности оборудования на протяжении всего срока службы. Для непрерывной оценки состояния АД становится все более важным использовать комплексные системы мониторинга состояния. Используя техническую диагностику, можно обеспечить адекватное предупреждение о неизбежном сбое, а также планировать будущие профилактические и ремонтные работы. Это повысит производительность механизмов и технических комплексов, поскольку непрерывная техническая диагностика позволяет своевременно прогнозировать отказ оборудования, оптимизировать процесс обслуживания и свести к минимуму время простоя.

Изучение явлений, производимых АД во время ненормального (аварийного) режима работы, и возможность диагностики таких режимов являются сложной задачей для многих исследователей в области диагностики электрических машин. На сегодняшний день существуют методы мониторинга комплексного технического состояния двигателя по таким характеристикам как: мониторинг вибрации, тепловой и химический мониторинг, мониторинг акустической эмиссии, но для всех этих методов контроля требуются установка дорогостоящих датчиков, применение специализированных средств и инструментов. Отдельно следует отметить методы непрерывной технической диагностики, которые основаны на измерении основных электрических величин (тока и напряжения), потребляемых двигателем. Такие методы контроля являются наиболее выгодными по технологическим и экономическим соображениям, поскольку они не требуют установки дополнительных датчиков.

Системы диагностики, основанные на физических признаках

Комплексные системы мониторинга основаны на анализе физических величин, производимых машиной при помощи внешних измерительных приборов и устройств. К таким величинам относятся: температура, уровень шума и вибрации, крутящий момент и прочие. С помощью них анализируется текущее состояние двигателя, и на основе их возрастания (изменения) принимается решение о неисправности.

Тепловой мониторинг. Тепловой мониторинг электрических машин осуществляется путем измерения местных или объемных температур двигателя и путем оценки этих параметров. Термический мониторинг, как правило, используется в качестве косвенного метода обнаружения некоторых неисправностей статора (виткового замыкания) и износа подшипников. Следствием развития виткового замыкания может стать локальный нагрев той части статора, где оно произошло. При этом обнаружение неисправности очень медленное и происходит спустя некоторое время, которого достаточно для достижения разрушительной стадии (межвиткового замыкания и замыкания на корпус). Для достижения наибольшей эффективности некоторые исследователи разработали математические тепловые модели электрических машин, на основании которых можно оценивать степень вероятности возникновения повреждений такого рода [3–5].

По такому типу обнаружения разработано два типа моделей:

- конечно-элементный анализ модели;
- тепловая модель с сосредоточенными параметрами.

Тепловая модель с включенным параметром используется для прогнозирования как стационарного, так и переходного

режима температур в АД. Система нелинейных обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих тепловое поведение машины в переходных и стационарных состояниях, решалась в [4] численно с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка и метода Гаусса-Зейделя. Производительность модели подтверждается экспериментальными измерениями на испытательной машине при номинальной нагрузке. Тепловое поведение машины при конечно-элементном анализе модели точно описывается решением только восьми таких уравнений. Поэтому модель подходит для применения к непрерывному мониторингу температуры для защиты и оценки рабочего цикла.

В случае обнаружения неисправностей подшипников повышенный износ увеличивает трение и температуру в области машины, где они установлены. Это повышение температуры может быть точно и вовремя обнаружено с помощью теплового мониторинга второго типа моделей.

Тепловая модель с сосредоточенными параметрами эквивалентна тепловой сети, состоящей из тепловых сопротивлений, емкостей и соответствующих потерь мощности. Точность модели обычно зависит от количества термически однородных тел, используемых в модели [4, 5]. Параметры модели с сосредоточенными параметрами обычно определяются двумя способами. Во-первых, с использованием всесторонних знаний о двигателях, физических размерах и свойствах используемых материалов. Во-вторых, необходимо идентифицировать параметры от обширного измерения температуры в разных местах двигателя. Исходя из этого предположения, в [6] описана упрощенная модель, определяющая параметры и коэффициенты тепловой модели, по которой оценивались

тепловые характеристики асинхронного двигателя (1 кВт). Эта модель получена путем анализа потерь мощности и теплопередачи внутри двигателя (с учетом двух частей: статора и ротора) и окружающей среды. Таким образом, выводятся два дифференциальных уравнения, которые в каждый момент времени отражают баланс между потерями мощности, теплом и накопленным теплом в двигателе.

Аналогичным образом в работе [7] была разработана термическая модель синхронной машины с постоянными магнитами. В данном случае разработка такой модели начинается с оценки зависящих от температуры параметров двигателя и от измерения линейных напряжений и токов. Затем параметры используются для получения оценок температуры двигателя.

Мониторинг шума и вибрации. Все электрические машины генерируют шум и вибрацию (рисунок 2). Анализ производимого шума и вибрации может быть использован для получения информации о состоянии машины, поскольку даже очень малая амплитуда вибрации корпуса машины может создавать высокий уровень шума. Данные источники информации в электрических машинах вызваны силами магнитного, механического и аэродинамического происхождения [8–10]. Их основными источниками являются радиальные силы, возникающие в поле воздушного зазора, а так как распределение плотности магнитного потока воздушного зазора является продуктом результирующей магнитодвижущей силы (МДС), то получаемая МДС также может содержать информацию о возможных нарушениях работы ротора или статора. Таким образом, анализируя вибрационный сигнал электрической машины, можно обнаружить различные типы неисправностей и асимметрий [11].

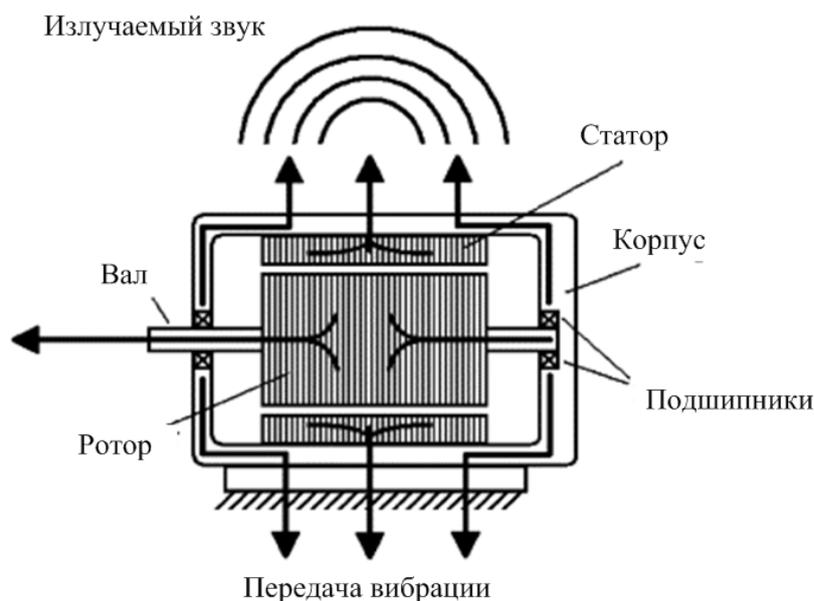


Рисунок 2. Схема передачи вибрации и шума от асинхронного двигателя

Figure 2. Induction motor schematic sound and vibration transmission paths

Акустический шум от эксцентриситета воздушного зазора в АД можно использовать для обнаружения неисправностей. Мониторинг шума осуществляется путем измерения и анализа спектра акустического шума, однако применение шумовых измерений на установке нецелесообразно вследствие шумового фона от других машин, работающих поблизости. Этот шум снижает точность обнаружения неисправностей. В работе [9] с помощью этого метода, на основе теста проведенного в безэховой камере, обнаружен эксцентриситет воздушного зазора. Ряд обнаруженных шумовых компонентов, которые значительно меняются с эксцентриситетом ротора, был аналитически идентифицирован из выражений для номеров мод и частот волн магнитной силы, принимая во внимание прорези статора и ротора. Представлен метод расчета вариации важных компонентов шума с эксцентриситетом. Слотовые (щелевые) гармоники в спектрах акустических шумов от АД малой мощности были функциями статического эксцентриситета.

Неисправности подшипника, эксцентриситеты ротора, неисправности ведомых механизмов и электрически несимметричные обмотки ротора являются лучшими кандидатами для обнаружения методами на основе вибродиагностики. Вибрационный контроль электрических машин осуществляется с помощью широкополосного, узкополосного или спектрального (сигнатурного) анализа измеренной энергии вибрации машины. Вибродиагностика — лучший метод диагностики неисправностей, но для этого нужны дорогие акселерометры и соответствующий набор дополнительных необходимых элементов (датчики, анализаторы). Это в некоторых случаях ограничивает его использование, особенно в небольших машинах, где стоимость играет важную роль при выборе метода мониторинга и целесообразности его применения в целом.

Так, в [12] был осуществлен контроль вибрации для диагностики повреждений подшипников качения. Окончательные диагнозы сделаны с использованием нейронной сети. Исследование проводилось

с использованием имитационных вибраций и реальных измерений. В обоих случаях результаты показывают, что нейронная сеть может быть эффективным инструментом в диагностике различных повреждений подшипников двигателя посредством измерения и интерпретации сигналов вибрации подшипника. В этом исследовании характеристики вибрации получены из частотной области с использованием техники Быстрого Фурье-преобразования. Построены пять сигнатур вибрации. Они создаются из спектра мощности вибрационного сигнала и состоят из соответствующих базовых частот с изменяющимися амплитудами на основе присутствующего дефекта. На рисунке 3 показаны кривые частотных характеристик при неповрежденном состоянии и с повреждением одного стержня ротора.

Также учитываются данные временной области, такие как максимальное и среднее значение амплитудно-колебательной формы волны и коэффициент эксцесса формы колебаний. Таким образом, пол-

ная нейронная сеть имеет 6 входных измерений. Исследователи показали, как нейронная сеть может эффективно использоваться при диагностике различных повреждений подшипников двигателя посредством соответствующего измерения и интерпретации сигналов вибрации двигателя.

В [13] был предложен подход, который дает лучшие результаты. В этом исследовании нейронной сети помогает генетический алгоритм, и статистические оценки вибрационного сигнала рассматриваются как входные характеристики. В исследовании рассматривается использование генетического алгоритма для выбора наиболее значимых входных признаков в контексте мониторинга состояния машины. При этом выбирается подмножество из 6 входных функций из большого набора возможных функций, что дает очень высокую точность классификации — 99,8 %.

Основным недостатком вибрационного мониторинга является стоимость, например обычный датчик вибрации стоит

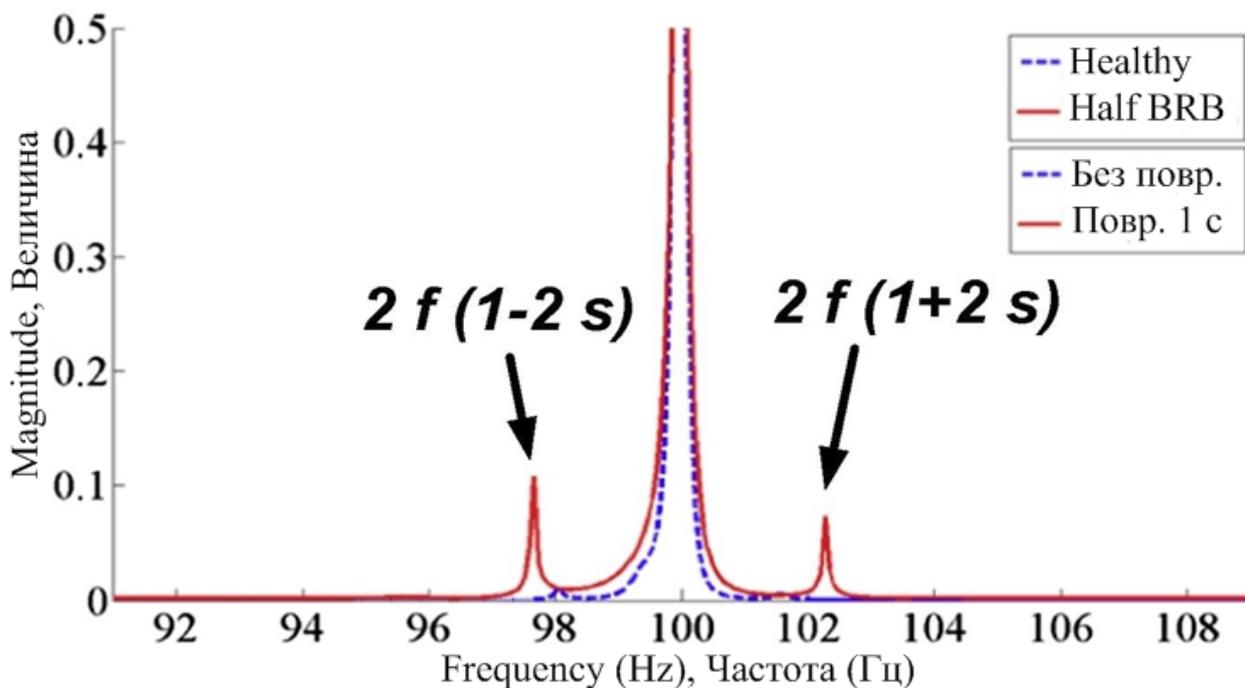


Рисунок 3. Спектр работы асинхронного двигателя при нагрузке 75 %

Figure 3. Spectrum of running induction motor at 75 % load

несколько сотен долларов. Высокая стоимость продукта может быть вызвана только за счет использования необходимых датчиков вибрации для большого количества электрических машин. Другим недостатком вибрационного мониторинга является то, что он требует доступа к машине и для точных измерений датчики должны быть плотно установлены на электрических машинах, что требует особого подхода к монтажу [14–16]. Кроме того, сами датчики могут выйти из строя.

Системы диагностики, основанные на анализе токов статора

Вектор тока Парка, ток нулевой и обратной последовательности и анализ сигнатур тока (MCSA) относятся ко всей категории электрического мониторинга. Рассматриваемые методы используют информацию, получаемую от потребляемого тока, для обнаружения разного рода ошибок в электродвигателях.

В большинстве случаев ток статора АД легко доступен для измерения, поскольку он является одним из основных источников информации для защиты машин от перегрузок, токов замыкания на «землю», междуфазных коротких замыканий и т.д.

Анализ сигнатуры тока. Motor Current Signature Analysis (MCSA) — обобщенное название комплекса сигналов, получаемых при анализе и последующем преобразовании потребляемых электрической машиной токов. В большинстве случаев для этого применяют преобразование Фурье. Анализ Фурье раскладывает сигнал на синусоиды разных частот, из которых он состоит. Вид сигнала при этом изменяется с временной базы на частотную. Преобразование Фурье непрерывного сигнала $x(t)$ определяется как:

$$X^{FT}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt.$$

Это преобразование дает глобальное частотное распределение исходного сигнала $x(t)$ во временной области. Боль-

шинство экспериментально полученных сигналов не являются непрерывными во времени, но преобразуются в виде дискретных временных интервалов ΔT . Кроме того, они имеют конечную длину и время измерения T , разделенное на $N = T/\Delta T$ интервалов, и могут анализироваться в частотной области с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Из-за выборки сигнала частотный спектр становится периодическим, поэтому частоты, которые могут быть проанализированы, являются конечными. ДПФ оценивается по дискретной частоте $f_n = n/T$, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Расчет ДПФ может стать очень трудоемким и ресурсозатратным процессом для больших сигналов (больших N).

$$X^{DFT}(f_n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-j2\pi f_n k}.$$

Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) не принимает произвольного числа интервалов N , поскольку он работает только с интервалами $N = 2^m$, $m \in \mathbb{N}$. Уменьшение числа интервалов делает БПФ наиболее эффективным.

БПФ широко использовалось для диагностики электрических машин и показало эффективную работу по определению разного рода неисправностей. При помощи данного вида диагностики возможно обнаружение таких дефектов, как неисправность подшипников, эксцентриситет ротора, обрыв стержня, межвитковое замыкание и пр. При этом каждому виду неисправности присваивается своя, характерная ей сигнатура (от англ. *signature* — подпись). На деле это название присвоено определенному набору частот и гармоник, возникающих при той или иной неисправности. В большинстве случаев для использования данного метода необходимо «обучить» систему на двигателе, который не имеет каких-либо неисправностей.

В ряде работ [17–20] рассмотрено применение анализа спектра токов двигателя для обнаружения повреждения подшипников качения в асинхронных двигателях. В исследовании [17] определяется эффективность мониторинга тока для обнаружения неисправностей путем корреляции соотношения между вибрационными и токовыми частотами, вызванными начальными отказами подшипников. Экспериментальным образом рассмотрены режимы отказа подшипников и определены характерные частоты, связанные с их физической конструкцией [18]. Описано влияние на спектр тока статора и определены соответствующие частоты. Экспериментальные результаты показывают, что колебательные и токовые спектры асинхронной машины с различными неисправностями подшипников можно использовать для проверки связи между колебательной и текущей частотами [20].

Фильтр избирательной частоты изучает характерные частоты электрической машины при работе во всех нормальных условиях нагрузки. Сгенерированная таблица частот сводится к управляемому числу с использованием набора экспертных системных правил, основанных на известной физической конструкции машины. Этот список частот формирует входы алгоритма кластеризации нейронной сети, которые сравниваются с эксплуатационными характеристиками, полученными из начальных характеристик двигателя. Это требует только того, чтобы машина находилась в «хорошем» рабочем состоянии при обучении системы. Поскольку дефект продолжает деградировать текущую сигнатуру (подпись) по мере ее прогрессирования с течением времени, система ищет эти изменения в исходных изученных спектрах, которые указывают на состояние неисправности и аварийные сигналы, когда они отклоняются на достаточную величину. Комбинация частотного фильтра с норми-

рованной системой (экспертной системы) и нейронной сети максимизирует способность системы обнаруживать небольшие спектральные изменения, вызванные начальными условиями сбоя. Надвигающийся отказ двигателя моделировали путем введения вращающегося механического эксцентриситета в испытательную машину. После обучения нейронной сети система смогла легко обнаружить текущие спектральные изменения, вызванные условием отказа.

Однако некоторые исследования выявили некоторые недостатки метода MCSA. Так, в [21, 22] исследовали влияние изменяющегося по положению крутящего момента нагрузки на диагностирование эксцентриситета воздушного зазора. Было обнаружено, что колебания крутящего момента вызывают те же самые гармоники, что и эксцентриситет. Эти гармоники всегда намного больше гармоник, связанных с ним, поэтому было сделано заключение, что невозможно разделить крутящие колебания и эксцентриситет, если неизвестно угловое положение места эксцентриситета относительно характеристики крутящего момента нагрузки. Было также показано, что гармоники, связанные с крутящим моментом нагрузки, совпадают с гармониками, вызванными сбоем ротора, когда нагрузка изменяется синхронно с положением ротора. Кроме того, поскольку влияние нагрузки и ошибки на единую гармоническую составляющую тока статора пространственно зависимо, то часть, вызванная сбоем, не может быть отделена от части нагрузки. Поэтому любая схема обнаружения в реальном времени, которая измеряет спектр одной фазы тока статора, должна опираться на мониторинг тех спектральных компонентов, на которые не влияют колебания крутящего момента нагрузки.

Тем не менее, дальнейшие разработки позволили использовать данный метод с

учетом влияния характера нагрузки на спектр электрической машины. В [23] отмечено, что ранее представленные схемы мониторинга текущего состояния игнорируют эффект нагрузки или предполагают, что он известен. Поэтому схема определения состояния машины при наличии изменяющегося характера нагрузки требует некоторого способа разделения этих эффектов. Это достигается путем сравнения фактического тока статора с опорным значением модели, которое включает в себя элемент нагрузки. Разница между этими двумя сигналами обеспечивает отфильтрованную величину, независимую от нагрузочных вариаций, которая позволяет проводить непрерывный мониторинг состояния в непрерывном режиме, не беспокоясь о состоянии нагрузки. Результаты моделирования показали эффективность этой схемы эталонной оценки модели при снятии воздействия нагрузки на вал АД из контролируемых спектров. Экспериментальные результаты иллюстрируют осуществимость предлагаемой системы. Они продемонстрировали, что характерные спектральные компоненты присутствуют в разностном токе, и что эффекты нагрузки могут быть эффективно удалены из контролируемого спектра для улучшения их обнаруживаемости.

Вейвлет-преобразование. Вейвлет (от англ. *wavelet* — короткая волна, рябь) — обобщенное название семейства математических функций, имеющих определенную форму, локальных по времени и частоте. Все эти функции получаются из одной базовой посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени и рассматривают анализируемые функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте [22–27]. Применяя вейвлеты в исследовании, можно обрабатывать и анализировать нестационарные неоднородные сигналы, несущие сведения об определенных локальных координатах, в

которых выражаются те или иные группы частотных составляющих. Такой метод разложения дает возможность анализировать сигналы сразу в двух пространствах, поскольку частота и координата рассматриваются как независимые переменные. Следовательно, в отличие от Фурье-преобразования он обеспечивает двумерную развертку и с гораздо более высокой точностью представляет локальные особенности сигналов:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0.$$

Существует два вида вейвлет-преобразований: непрерывное (CWT — Continuous Wavelet Transform) и дискретное (DWT — Discrete Wavelet Transform).

Метод обнаружения на вейвлетах показывает хорошую чувствительность, короткое время обнаружения и может быть легко применен для обнаружения неисправностей электрических машин.

Из вышесказанного видно, что все сигналы могут быть восстановлены из наборов локальных сигналов разного масштаба и амплитуды, но постоянной формы. В работе [28], таким образом, проанализировали ток статора посредством вейвлет-преобразования для обнаружения дефектов подшипника. Предлагаемый метод имеет ряд преимуществ по сравнению с инструментами анализа Фурье, используемыми при MCSA. Из-за нестационарного характера тока статора вейвлет-преобразование обеспечивает лучший анализ при различных условиях нагрузки. Пакетное преобразование вейвлета также позволяет регулировать полосы частот в том диапазоне частот, который был вызван дефектами подшипника, возникающими в результате изменений частоты вращения ротора.

В [29, 30] применили Вейвлет-преобразование для диагностики неисправностей АД с фазным ротором. Двигатель был протестирован, когда он считался исправным, и затем — с искус-

ственно созданным повреждением ротора. Разностный сигнал на 11-м уровне одномерного дискретного разложения вейвлет-анализа использовался для обнаружения неисправности ротора двигателя. Для сравнения с исправным двигателем использовались среднеквадратичное значение 11-го вейвлет-коэффициента — d_{11} и ток. Наконец, сделано заключение, что вейвлет-анализ может быть успешно использован для обнаружения повреждений фазного ротора.

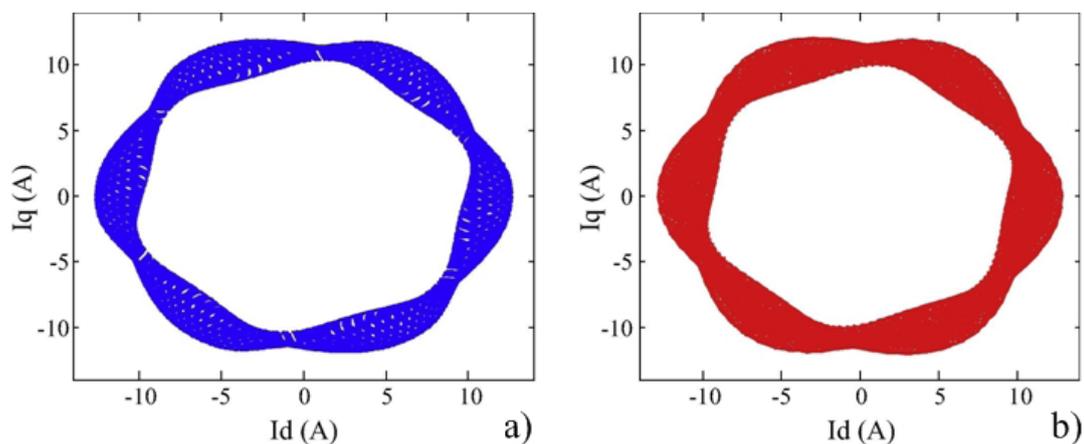
В работе [31–33] был предложен метод диагностики обрывов роторных стержней в АД на основе анализа тока статора во время запуска с использованием дискретного вейвлет-преобразования. В случае разрыва стержня компоненты более высокого уровня ДПФ тока статора следуют характеристическому шаблону, который подробно описан и физически оценен. Несколько экспериментов проводятся в различных для двигателя условиях (без повреждения и с разным уровнем повреждения) и нагрузки (без нагрузки, при полной нагрузке, пульсирующей нагрузке). В каждом случае результаты сравнивались с результатами, полученными с использованием классического подхода на основе анализа установившегося тока с использованием преобразования Фурье. Испытания показали, что если переходный момент запуска не очень короткий, надежность предлагаемого метода диагностики разрыва стержня аналогична надежности классического подхода, основанного на преобразовании Фурье. Этот метод позволяет правильно диагностировать двигатель в тех случаях, когда анализ Фурье приводит к ошибочному результату.

Вектор Парка. Еще одним важным методом непрерывного мониторинга является вектор Парка. Этот метод применим к АД, подключенным к сети по схеме «звезда», поскольку в них ток статора не имеет нулевой последовательности. Двухмерное представление трехфаз-

ных токов, называемое вектором Парка, является круговым рисунком, и в идеальных условиях, когда все токи сбалансированы и нет отклонений от нормального режима, эта окружность имеет центр в начале координат и «правильную» форму.

Еще в одной работе [34] показано, что метод, основанный на векторе Парка, используется для обнаружения дефектов ротора АД с короткозамкнутым ротором. Испытания проводились на двигателе с двумя одинаковыми роторами, без повреждений и с поврежденными стержнями ротора. Линейные токи двигателя визуализировались на осциллографе, используя специальную электронную схему, которая смогла синтезировать две ортогональные составляющие тока, напряжения и магнитного потока. Кроме того, линейные токи были получены с помощью платы DAQ National Instruments на ПК с использованием виртуальных приборов, созданных в среде LabVIEW. Были построены несколько характеристик изучаемого двигателя. Из-за сломанных стержней ротора наблюдалось значительное колебание крутящего момента машины, а амплитуда тока в конце начального периода была довольно высокой. Форма фазового тока неисправного двигателя не была идеальной круглой формы, что явилось четким признаком неисправности в асинхронной машине с короткозамкнутым ротором. На рисунке 4 представлено отличие вектора тока Парка неповрежденного АД и с обрывом одного стержня.

У метода, основанного на преобразовании сигналов тока в вектор Парка, существуют свои расширения. Так, в [35, 36] исследовали применение анализа сигнатуры тока статора АД (MCSA) с использованием преобразования Парка для обнаружения повреждений подшипника качения в трехфазном асинхронном двигателе. В этом исследовании также приведен краткий обзор алгоритма нейронных сетей радиальной базисной функции,



a) не поврежденное состояние ротора; b) поврежден один стержень

a) healthy rotor; b) one broken rotor bar

Рисунок 4. Вектор тока Парка асинхронного двигателя с 28 стержнями в роторе

Figure 4. The Park's Vector for the induction motor with 28 rotor slots

достигнутой с помощью языка программирования MATLAB. Сбор данных и алгоритм преобразования Парка проводились при помощи пакета LabVIEW.

Все преимущества и недостатки изложенных в работе методов диагностики представлены в таблице 1. В ней представлены критерии, сформированные на основе экспертной оценки значимости преимуществ разных методов диагностики. Такими критериями для методов диагностики АД являются:

1. диагностика в режиме работы АД;

2. обнаружение дефекта на ранней стадии;

3. наличие внешних устройств и специальных датчиков;

4. необходимость «обучать» систему диагностики;

5. возможность адаптации под разные типы двигателей;

6. воздействие внешних факторов на результат диагностики;

7. повышенные требования к вычислительным мощностям устройства и наличие аппаратуры АЦП;

Таблица 1. Анализ методов диагностики АД

Table 1. Analysis of methods for diagnosing IM

Критерий	Методы диагностики АД					
	ТМ	ВД	ША	MCSA	ВА	ВП
1	+	+	+	+	+	+
2	-	-	-	+	+	-
3	-	-	-	+	+	+
4	+	+	+	+	-	-
5	+	+	+	-	-	-
6	+	-	-	+	+	+
7	+	+	+	-	-	-
8	-	-	-	+	+	+

8. перспектива расширения функционала устройства.

Методы диагностики, в свою очередь, подразделены на основные их типы:

ТМ — термомониторинг;

ВД — вибродиагностика;

ША — шумовой анализ;

МССА — анализ сигнатуры тока статора;

ВА — вейвлет-анализ;

ВП — вектор тока Парка.

Выводы

1. Приведены методы мониторинга текущего состояния АД в режиме работы, разработанные на сегодняшний день. Рассмотрены и проанализированы работы по непрерывной диагностике повреждения роторной цепи АД как российских, так и зарубежных исследователей. Выявлены слабые и сильные стороны

Список источников

1. Зюзов А.М., Метельков В.П. Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 1 (34). С. 60-67.

2. Новоселов Е.М. Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю: дисс. ... канд. техн. наук. Иваново, 2018. 234 с.

3. Дорохина Е.С. Мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей: дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. 155 с.

4. Ammar K. Al-Musawi, Fatih Anayi, Michael Packianather. Three-Phase Induction Motor Fault Detection Based on Thermal Image Segmentation // *Infrared Physics & Technology*. 2020. Vol. 104. P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103140>.

5. Дорохина Е.С., Хорошко А.А., Рапопорт О.Л. Система мониторинга теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока // *Известия выс-*

рассматриваемых методов диагностирования в режиме работы.

2. Определено, что не существует одного универсального метода непрерывного диагностирования текущего состояния АД, который обладал бы достаточной степенью чувствительности и селективности. Результаты оценки рассматриваемых методов сведены в таблицу.

3. Установлено, что наилучшими, с точки зрения экономической целесообразности и технической реализации в целом, являются методы диагностики, основанные на анализе цифрового сигнала потребляемых токов статора.

4. В процессе анализа сформулированы основные проблемы, препятствующие разработке и реализации методов непрерывной диагностики асинхронных двигателей.

ших учебных заведений. *Электромеханика*. 2012. № 4. С. 16-21.

6. Smolyanov I., Sarapulov F., Tarasov F. Calculation of Linear Induction Motor Features by Detailed Equivalent Circuit Method Taking into Account Non-Linear Electromagnetic and Thermal Properties // *Computers and Mathematics with Application*. 2019. Vol. 78. P. 3187-3199. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.05.015>.

7. Glowacz A., Glowacz Z. Diagnostics of Stator Faults of the Single-Phase Induction Motor Using Thermal Images // *MoASoS and Selected Classifiers. Measurement*. 2016. P. 86-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.008>.

8. Dongmei Wang, Yanping Liang, Cangxue Li, Peipei Yang, Chunlei Zhou, Lianlian Gao. Thermal Equivalent Network Method for Calculating Stator Temperature of a Shielding Induction Motor // *International Journal of Thermal Sciences*. 2020. Vol. 147. P. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106149>.

9. Guoyun Fang, Wei Yuan, Zhiguo Yan, Yalong Sun, Yong Tang. Thermal Management Integrated with Three-Dimensional Heat Pipes for Air Cooled

- Permanent Magnet Synchronous Motor // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 152. P. 594-604. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.120>.
10. Попов В.И., Тихонов С.И. Магнитный шум трехфазных многополюсных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии RA // Электричество. 2008. № 4. С. 66-73.
11. Changle Xiang, Feng Liu, Hui Liu, Lijin Han, Xun Zhang. Nonlinear Dynamic Behaviors of Permanent Magnet Synchronous Motors in Electric Vehicles Caused by Unbalanced Magnetic Pull // Journal of Sound and Vibration. 2016. Vol. 371. P. 277-294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.02.015>.
12. Gurmeet Singh, V.N.A. Naikan. Detection of Half Broken Rotor Bar Fault in VFD Driven Induction Motor Drive Using Motor Square Current MUSIC Analysis // Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. Vol. 110. P. 333-348. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.03.001>.
13. Shaojiang Dong, Wenliang Wu, Kun He, Xiaoyan Mou. Rolling Bearing Performance Degradation Assessment Based on Improved Convolutional Neural Network with Anti-Interference // Measurement. 2020. Vol. 151. P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107219>.
14. Yassmin Seid Ahmed, A.F.M. Arif, Stephen Clarence Veldhuis. Application of the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals for Built-Up Edge Monitoring in Stainless Steel Machining // Measurement. 2020. Vol. 154. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107478>.
15. Zhao Haisen, Wang Yilong, Wang Yuhan, Zhan Yang, Xu Guorui. Loss and Air-gap Force Analysis of Cage Induction Motors with Non-Skewed Asymmetrical Rotor Bars Based on FEM // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. Vol. 53. No. 6. P. 1-4. doi: 10.1109/TMAG.2017.2660762.
16. Parth Sarathi Panigrahy, Paramita Chattopadhyay. Tri-Axial Vibration Based Collective Feature Analysis for Decent Fault Classification of VFD Fed Induction Motor // Measurement. 2021. Vol. 168. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108460>.
17. Rui Zhao, Ruqiang Yan, Zhenghua Chen, Kezhi Mao, Peng Wang, Robert X. Gao. Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 115. P. 213-237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>.
18. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Дмитриевский А.А. Токовая диагностика неисправностей подшипников асинхронных двигателей на основе быстрого преобразования Фурье // Электротехника. 2016. № 12. С. 14-19.
19. Новожилов А.Н., Ахметова Ф.К. Анализ методов диагностики состояния подшипников качения в асинхронном двигателе // Наука и техника Казахстана. 2008. № 3. С. 50-52.
20. Корф А.А., Суворов И.Ф., Дедов А.С. и др. Диагностика состояния подшипников асинхронного двигателя 0,38 кВ на основе спектрального состава напряжения выбега // Наука и образование: актуальные исследования и разработки: сб. ст. III Всеросс. науч.-практ. конф., Чита, 29–30 апреля 2020 года. Чита: Забайкальский государственный университет, 2020. С. 124-130.
21. Deekshit Kompella K.C., Venu Gopala Rao Mannam, Srinivasa Rao Rayapudi. Bearing Fault Detection in a 3 Phase Induction Motor Using Stator Current Frequency Spectral Subtraction with Various Wavelet Decomposition Techniques // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Vol. 9. No. 6. P. 2427-2439. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2017.06.002>.
22. Nazarychev A.N., Skorobogatov A.A., Novoselov E.M. Diagnostics of Breaks of Rotor Winding Bars in Electric Motors Based on Stator Current Analysis // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. Vol. 47, No. 3. P. 209-215.
23. Arturo Mejia-Barron, Guillermo Tapia-Tinoco, Jose R. Razo-Hernandez, Martin Valtierra-Rodriguez, David Granados-Lieberman. A Neural Network-Based Model for MCSA of Inter-Turn Short-Circuit Faults in Induction Motors and Its Power Hardware in the Loop Simulation // Computers & Electrical Engineering. 2021.

Vol. 93. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107234>.

24. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A. Stator Current Fault Diagnosis of Induction Motor Bearings Based on the Fast Fourier Transform // *Russian Electrical Engineering*. 2016. Vol. 87. Issue 12. P. 661-665.

25. Большунова О.М., Большунов А.В., Камышьян А.М. Диагностика технического состояния тяговых асинхронных двигателей карьерного автосамосвала с применением вейвлет-анализа // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2016. № 2. С. 49-52.

26. Постоянкова К.Ю. Применение вейвлет-анализа в диагностике обмотки ротора асинхронного двигателя // *Вестник современных исследований*. 2020. № 7-7(37). С. 38-40.

27. Ромашихіна Ж.І., Калінов А.П. Использование вейвлет-анализа для диагностики обрывов стержней роторов асинхронных двигателей // *Електро-механічні і енергозберігаючі системи*. 2010. № 4(12). С. 22-27.

28. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Смольянов И.А. Токовая диагностика подшипников асинхронных двигателей на основе вейвлет-анализа и задачи энергоресурсосбережения // *Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике*. 2014. № 1. С. 72-80.

29. Priyanka Gandhi, Dr Neelam Turk, Dr Ratna Dahiya. Health Monitoring of Induction Motors through Embedded Systems-Simulation of Broken Rotor Bar Fault and Abnormal Gear Teeth Fault // *Micro-processors and Microsystems*. 2020. Vol. 76. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103077>.

30. Воскобойников Ю.Е., Гочаков А.В., Колкер А.Б. Фильтрация сигналов и изображений: Фурье и Вейвлет алгоритмы. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. 188 с.

31. Xinmin Tao, Chao Ren, Yongkang Wu, Qing Li, Wenjie Guo, Rui Liu, Qing He, Junrong Zou. Bearings Fault Detection Using Wavelet Transform and Generalized Gaussian Density Modeling // *Measurement*.

2020. Vol. 155. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107557>.

32. Abdelelah Almounajjed, Ashwin Kumar Sahoo, Mani Kant Kumar. Diagnosis of Stator Fault Severity in Induction Motor Based on Discrete Wavelet Analysis // *Measurement*. 2021. Vol. 182. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109780>.

33. Tarek Ameid, Arezki Menacer, Hicham Talhaoui, Youness Azzoug. Discrete Wavelet Transform and Energy Eigen Value for Rotor Bars Fault Detection in Variable Speed Field-Oriented Control of Induction Motor Drive // *ISA Transactions*. 2018. Vol. 79. P. 217-231. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.04.019>.

34. Jose A. Antonino-Daviu, Martin Riera-Guasp, José Roger Folch, M. Pilar Molina Palomares. A Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures in Induction Machines // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2006. Vol. 42. No. 4. P. 990-996.

35. Konstantinos N. Gyftakis, Antonio J. Marques Cardoso, Toth F., Jose A. Antonino-Daviu. Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to Detect Broken Rotor Bars in Induction Motors Independently from the Rotor Slots Number // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 93. P. 30-50. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.046>.

36. Диб М., Ибрагим Г., Ассаф Т. Диагностика неисправностей обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя с помощью векторного анализа Парка // *Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ*. 2021. № 5. С. 69-74. doi 10.24160/1993-6982-2021-5-69-74.

References

1. Zyuzev A.M., Metel'kov V.P. Analiticheskiy metod otsenki nagreva obmotki rotora vysokovol'tnykh asinkhronnykh dvigatelei v puskovykh rezhimakh [Analytical Method for Evaluation of High-Voltage Induction Motor Rotor Winding Heating at Start-Up Mode]. *Elektrotekhnologii v promyshlennosti — Electrotechnical Systems*

and Complexes, 2017, No. 1 (34), pp. 60-67. [in Russian].

2. Novoselov E.M. *Razrabotka metoda funktsional'noi diagnostiki obmotki rotora asinkhronnykh elektrodvigatelei sobstvennykh nuzhd elektrostantsii po vneshnemu magnitnomu polyu: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a Method for Functional Diagnostics of the Rotor Winding of Asynchronous Electric Motors for Auxiliary Needs of Power Plants by An External Magnetic Field: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ivanovo, 2018. 234 p. [in Russian].

3. Dorokhina E.S. *Monitoring teplovogo sostoyaniya asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigatelei: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Asynchronous Traction Motors Thermal State Monitoring: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Tomsk, 2015. 155 p. [in Russian].

4. Ammar K. Al-Musawi, Fatih Anayi, Michael Packianather. Three-Phase Induction Motor Fault Detection Based on Thermal Image Segmentation. *Infrared Physics & Technology*, 2020, Vol. 104, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103140>.

5. Dorokhina E.S., Khoroshko A.A., Rapoport O.L. Sistema monitoringa teplovogo sostoyaniya tyagovykh elektrodvigatelei postoyannogo toka [System for Monitoring the Thermal State of Direct Current Traction Electric Motors]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika — Izvestia of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 2012, No. 4, pp. 16-21.

6. Smolyanov I., Sarapulov F., Tarasov F. Calculation of Linear Induction Motor Features by Detailed Equivalent Circuit Method Taking into Account Non-Linear Electromagnetic and Thermal Properties. *Computers and Mathematics with Application*, 2019, Vol. 78, pp. 3187-3199. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2019.05.015>.

7. Glowacz A., Glowacz Z. Diagnostics of Stator Faults of the Single-Phase Induction

Motor Using Thermal Images. *MoASoS and Selected Classifiers. Measurement*, 2016, pp. 86-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.008>.

8. Dongmei Wang, Yanping Liang, Cangxue Li, Peipei Yang, Chunlei Zhou, Lianlian Gao. Thermal Equivalent Network Method for Calculating Stator Temperature of a Shielding Induction Motor. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020, Vol. 147, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106149>.

9. Guoyun Fang, Wei Yuan, Zhiguo Yan, Yalong Sun, Yong Tang. Thermal Management Integrated with Three-Dimensional Heat Pipes for Air Cooled Permanent Magnet Synchronous Motor. *Applied Thermal Engineering*, 2019, Vol. 152, pp. 594-604. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.120>.

10. Popov V.I., Tikhonov S.I. Magnitnyi shum trekhfaznykh mnogopolyusnykh asinkhronnykh dvigatelei s korotkozamknutym rotorom serii RA [Magnetic Noise of Three-Phase Multi-Pole Asynchronous Motors with a Squirrel-Cage Rotor of the RA Series]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2008, No. 4, pp. 66-73. [in Russian].

11. Changle Xiang, Feng Liu, Hui Liu, Lijin Han, Xun Zhang. Nonlinear Dynamic Behaviors of Permanent Magnet Synchronous Motors in Electric Vehicles Caused by Unbalanced Magnetic Pull. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, Vol. 371, pp. 277-294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.02.015>.

12. Gurmeet Singh, V.N.A. Naikan. Detection of Half Broken Rotor Bar Fault in VFD Driven Induction Motor Drive Using Motor Square Current MUSIC Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, Vol. 110, pp. 333-348. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.03.001>.

13. Shaojiang Dong, Wenliang Wu, Kun He, Xiaoyan Mou. Rolling Bearing Performance Degradation Assessment Based

on Improved Convolutional Neural Network with Anti-Interference. *Measurement*, 2020, Vol. 151, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107219>.

14. Yassmin Seid Ahmed, A.F.M. Arif, Stephen Clarence Veldhuis. Application of the Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals for Built-Up Edge Monitoring in Stainless Steel Machining. *Measurement*, 2020, Vol. 154. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107478>.

15. Zhao Haisen, Wang Yilong, Wang Yuhan, Zhan Yang, Xu Guorui. Loss and Air-gap Force Analysis of Cage Induction Motors with Non-Skewed Asymmetrical Rotor Bars Based on FEM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, Vol. 53, No. 6, pp. 1-4. doi: 10.1109/TMAG.2017.2660762.

16. Parth Sarathi Panigrahy, Paramita Chattopadhyay. Tri-Axial Vibration Based Collective Feature Analysis for Decent Fault Classification of VFD Fed Induction Motor. *Measurement*, 2021, Vol. 168. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108460>.

17. Rui Zhao, Ruqiang Yan, Zhenghua Chen, Kezhi Mao, Peng Wang, Robert X. Gao. Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, Vol. 115, pp. 213-237. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.050>.

18. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A. Tokovaya diagnostika neispravnosti podshipnikov asinkhronnykh dvigatelei na osnove bystrogo preobrazovaniya Fur'e [Current Diagnostics of Faults in Bearings of Asynchronous Motors Based on the Fast Fourier Transform]. *Elektrotehnika — Electrical Engineering*, 2016, No. 12, pp. 14-19. [in Russian].

19. Novozhilov A.N., Akhmetova F.K. Analiz metodov diagnostiki sostoyaniya podshipnikov kacheniya v asinkhronnom dvigatеле [Analysis of Methods for Diagnosing the State of Rolling Bearings in

an Asynchronous Motor]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana — Science and Technology of Kazakhstan*, 2008, No. 3, pp. 50-52. [in Russian].

20. Korf A.A., Suvorov I.F., Dedov A.S. e.a. Diagnostika sostoyaniya podshipnikov asinkhronnogo dvigatelya 0,38 kV na osnove spektral'nogo sostava napryazheniya vybega [Diagnostics of the State of Bearings of a 0.38 kV Induction Motor Based on the Spectral Composition of the Run-Out Voltage]. *Sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie: aktual'nye issledovaniya i razrabotki»*, Chita, 29–30 aprelya 2020 goda [Collection of Articles of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Science and Education: Current Research and Development», Chita, April 29–30, 2020]. Chita: Zabaikal'skii gosudarstvennyi universitet, 2020, pp. 124-130. [in Russian].

21. Deekshit Kompella K.C., Venu Gopala Rao Mannam, Srinivasa Rao Rayapudi. Bearing Fault Detection in a 3 Phase Induction Motor Using Stator Current Frequency Spectral Subtraction with Various Wavelet Decomposition Techniques. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, Vol. 9, No. 6, pp. 2427-2439. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2017.06.002>.

22. Nazarychev A.N., Skorobogatov A.A., Novoselov E.M. Diagnostics of Breaks of Rotor Winding Bars in Electric Motors Based on Stator Current Analysis. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, Vol. 47, No. 3, pp. 209-215.

23. Arturo Mejia-Barron, Guillermo Tapia-Tinoco, Jose R. Razo-Hernandez, Martin Valtierra-Rodriguez, David Granados-Lieberman. A Neural Network-Based Model for MCSA of Inter-Turn Short-Circuit Faults in Induction Motors and Its Power Hardware in the Loop Simulation. *Computers & Electrical Engineering*, 2021, Vol. 93. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107234>.

24. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A. Stator Current Fault Diagnosis of Induction Motor Bearings Based on the Fast Fourier Transform. *Russian Electrical Engineering*, 2016, Vol. 87, Issue 12, pp. 661-665.
25. Bol'shunova O.M., Bol'shunov A.V., Kamysh'yan A.M. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya tyagovykh asinkhronnykh dvigatelei kar'ernogo avtosamosvala s primeneniem veivlet-analiza [Diagnostics of the Technical Condition of Traction Asynchronous Engines of a Dump Truck Using Wavelet Analysis]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin — Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2016, No. 2, pp. 49-52. [in Russian].
26. Postoyankova K.Yu. Primenenie veivlet-analiza v diagnostike obmotki rotora asinkhronnogo dvigatelya [Application of Wavelet Analysis in the Diagnostics of the Rotor Winding of an Asynchronous Motor]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy — Bulletin of Modern Research*, 2020, No. 7-7(37), pp. 38-40. [in Russian].
27. Romashikhina Zh.I., Kalinov A.P. Ispol'zovanie veivlet-analiza dlya diagnostiki obryvov sterzhnei rotorov asinkhronnykh dvigatelei [The Use of Wavelet Analysis for Diagnosing Breaks in the Rotor Bars of Asynchronous Motors]. *Elektromekhanichni I energozberigayuchi sistemi — Elektromechanical and Energy Saving Systems*, 2010, No. 4(12), pp. 22-27. [in Russian].
28. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Smol'yanov I.A. Tokovaya diagnostika podshipnikov asinkhronnykh dvigatelei na osnove veivlet-analiza i zadachi energo-resursosberezheniya [Current Diagnostics of Asynchronous Motor Bearings Based on Wavelet Analysis and Problems of Energy and Resource Saving]. *Energetika. Innova-tсионnye napravleniya v energetike. CALS-tekhnologii v energetike — Energetika. Innovative Trends in Energy. CALS-Technologies in Power Engineering*, 2014, No. 1, pp. 72-80.
29. Priyanka Gandhi, Dr Neelam Turk, Dr Ratna Dahiya. Health Monitoring of Induction Motors through Embedded Systems-Simulation of Broken Rotor Bar Fault and Abnormal Gear Teeth Fault. *Microprocessors and Microsystems*, 2020. Vol. 76. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103077>.
30. Voskoboinikov Yu.E., Gochakov A.V., Kolker A.B. *Fil'tratsiya signalov i izobrazhenii: Fur'e i Veivlet algoritmy* [Filtering Signals and Images: Fourier and Wavelet Algorithms]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2010. 188 p. [in Russian].
31. Xinmin Tao, Chao Ren, Yongkang Wu, Qing Li, Wenjie Guo, Rui Liu, Qing He, Junrong Zou. Bearings Fault Detection Using Wavelet Transform and Generalized Gaussian Density Modeling. *Measurement*, 2020, Vol. 155. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107557>.
32. Abdelelah Almounajjed, Ashwin Kumar Sahoo, Mani Kant Kumar. Diagnosis of Stator Fault Severity in Induction Motor Based on Discrete Wavelet Analysis. *Measurement*, 2021, Vol. 182. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109780>.
33. Tarek Ameid, Arezki Menacer, Hicham Talhaoui, Youness Azzoug. Discrete Wavelet Transform and Energy Eigen Value for Rotor Bars Fault Detection in Variable Speed Field-Oriented Control of Induction Motor Drive. *ISA Transactions*, 2018, Vol. 79, pp. 217-231. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.04.019>.
34. Jose A. Antonino-Daviu, Martin Riera-Guasp, José Roger Folch, M. Pilar Molina Palomares. A Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures in Induction Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, Vol. 42, No. 4, pp. 990-996.
35. Konstantinos N. Gyftakis, Antonio J. Marques Cardoso, Toth F., Jose A. Antonino-Daviu. Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to Detect Broken Rotor Bars in Induction

Motors Independently from the Rotor Slots Number. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, Vol. 93, pp. 30-50. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.046>.

36. Dib M., Ibragim G., Assaf T. Diagnostika neispravnosti obmotki statora trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya s pomoshch'yu vektornogo analiza Parka

[Diagnostics of Faults in the Stator Winding of a Three-Phase Asynchronous Motor Using Park's Vector Analysis]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI — Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of MPEI*. 2021, No. 5, pp. 69-74. doi 10.24160/1993-6982-2021-5-69-74. [in Russian].



Дмитрий Сергеевич Буньков
Dmitriy S. Bunkov

*инженер-программист отделения силовой электроники,
АО «ЭлеСи», Томск, Россия*

УДК 621.313.33

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-24-38

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Актуальность

На сегодняшний день, в силу общеизвестных и подтвержденных многими годами успешной эксплуатации положительных качеств, асинхронные электрические машины нашли широкое применение в различных сферах промышленности [1, 2], в составе двигательных [3–5] и генераторных установок [6–8]. К основным достоинствам асинхронной машины (АМ) относятся: простота конструкции, относительно низкая себестоимость, возможность выдерживать кратковременные токовые перегрузки, отсутствие щёточно-коллекторного узла и дорогостоящих редкоземельных магнитов [9–14]. Актуальность применения АМ подтверждается, в частности, современными производителями электромобилей [15], для которых вопрос наиболее рационального расходования электроэнергии стоит на первом месте.

Развитие принципов теории управления асинхронными регулируемыми электроприводами (ЭП) привело к появлению различных методов управления АМ, реализованных в современных микропроцессорных преобразователях частоты. К таким методам управления относятся скалярное управление, векторное управление и прямое управление моментом в различных модификациях и комбинациях [16–18]. Перечисленные методы управления имеют свои области применения и в разной степени требовательны к наличию параметров схемы замещения АМ, применяемой в составе электропривода [19, 20]. Задание некорректных настроек системы управления, базирующихся в наибольшей степени именно на параметрах схемы замещения АМ, может приводить к ухудшению показателей качества регулирования, а также к снижению энергоэффективности ЭП [21–24]. Стоит отметить, что наиболее остро проблема с наличием корректных оценок параметров АМ возникает при построении бездатчиковых систем управления ЭП [25].

Цель исследования

Провести обзор и сравнение основных методов по нахождению оценок параметров схемы замещения асинхронной машины, применяемых для организации замкнутой системы управления электроприводом.

Методы исследования

В данном исследовании были использованы: обзор научной и технической литературы, анализ и обобщение сведений, сравнение характеристик методов и способов оценок параметров асинхронных машин.

Результаты

Обусловлена необходимость в нахождении оценок параметров схемы замещения асинхронной машины при организации векторной системы управления электропри-

водом. Произведен сравнительный анализ, описаны преимущества и недостатки основных групп методов по нахождению оценок параметров асинхронной машины.

Ключевые слова: схема замещения, асинхронная машина, векторное управление, предварительная идентификация

THE REVIEW METHODS OF INDUCTION MACHINE EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS ESTIMATION FOR FIELD ORIENTED CONTROL IMPLEMENTATION

Relevance

Today, due to the well-known and proven by many years of positive qualities of successful operation, induction machines (IM) have found wide application in various industries [1, 2], as part of motor [3–5] and generator sets [6–8]. The main advantages of an IM include simplicity of design, relatively low cost, the ability to withstand short-term current overloads, the absence of a brush-collector unit and expensive rare-earth magnets [9–14]. The relevance of the use of IM, which has not lost over the years, is confirmed, in particular, by modern manufacturers of electric vehicles [15], for which the issue of the most rational use of electricity is in the first place.

The development of the principles of the theory of control of asynchronous controlled electric drives led to the emergence of various IM control methods, implemented in modern microprocessor-based frequency converters. These control methods include U/f control, field oriented control and direct torque control in various modifications and combinations [16–18]. The listed control methods have their own areas of application and are, to varying degrees, demanding on the availability of the parameters of the IM equivalent circuit used as part of the electric drive [19, 20]. Setting incorrect settings of the control system, based to the greatest extent on the parameters of the IM equivalent circuit, can lead to deterioration in the quality of regulation, as well as to a decrease in the energy efficiency of the electric drive [21–24]. It should be noted that the most acute problem with the availability of correct estimates of IM parameters arises when constructing sensorless control systems for electric drives [25].

Aim of research

Review and compare the main methods estimation of induction motor equivalent circuit parameters used to organize a closed-loop control system of an electric drive.

Research methods

In this study, the following methods were used: study of scientific literature, study and generalization of information, comparison.

Results

The need to find estimations of IM equivalent circuit parameters for organizing a field oriented control system for an electric drive. A comparative analysis is carried out, the advantages and disadvantages of the main groups of methods for finding estimates of the parameters of an IM are described.

Keywords: equivalent circuit, induction machine, field oriented control, off-line identification

Роли и мсето процедури оценявания параметров схемы замещения асинхронной электрической машины в современном электроприводе

Исторически асинхронные электрические машины применялись в нерегулиру-

емых электроприводах (ЭП), что ограничивало сферу их применения. С развитием силовой, слаботочной и цифровой элементной баз появилась возможность построения регулируемых, энергоэффективных и функциональных микропроцессорных ЭП, решающих задачи в различ-

ных областях промышленности. Так, на сегодняшний день наибольшее распространение получили следующие типы систем управления ЭП [26]:

- система «ТРН-АМ с контуром обратной связи по скорости» [26–29];
- система «ПЧ-АМ со скалярным частотным управлением» [3];
- система «ПЧ-АМ с ориентированным по полю векторным управлением» (*Field Oriented Control, FOC*) [30–32];
- система «ПЧ-АМ с прямым управлением моментом» (*Direct Torque Control, DTC*) [33].

Среди перечисленных систем наиболее востребованной и универсальной, по мнению автора, является полеориентированная система векторного управления электроприводом (ЭП), применение которой возможно как для двигательных, так и для генераторных установок на основе асинхронной машины (АМ).

Векторная система управления АМ имеет ряд важных характеристик, которые привели к ее массовому внедрению в современных регулируемых электротехнических комплексах.

1. *Регулирование и поддержание скорости* на заданном уровне как в статических, так и динамических режимах работы ЭП, при этом обеспечивается широкий диапазон регулирования. Такое качество векторной системы управления является необходимым для ЭП с точным позиционированием. К таким механизмам, к примеру, можно отнести ЭП лифтовой лебедки, где недопустимы значительные отклонения задаваемой и формируемой скоростей рабочего органа, особенно при движении на малой скорости [34–36].

2. *Регулирование и ограничения момента*. Эти качества векторной системы управления крайне востребованы при организации моментных ЭП, позволяющих формировать момент на рабочем органе механизма независимо от текущей

скорости. Возможность ограничения момента также востребована для ЭП с ограниченным усилием рабочего органа, превышение которого может приводить к выходу оборудования из строя [37, 38].

3. *Снижение энергопотребления*, которого можно добиться изменением потока намагничивания с помощью соответствующего контура регулирования. Данное качество векторной системы автоматического управления (САУ) позволяет оптимизировать энергетические характеристики как двигательной установки на основе АМ в зависимости от текущего уровня нагрузки на валу [30, 39], так и генераторной установки на основе АМ в зависимости от текущего уровня и характера энергопотребления [24, 32]. Подобный подход целесообразно применять для медленно меняющихся нагрузок, изменение которых происходит в достаточно широком диапазоне [39].

4. *Оптимизация динамических характеристик*, что также достигается регулированием потокосцепления. Данный подход применим при организации высокоскоростных ЭП, для которых важно динамичное изменение величины и направления формируемого момента, однако может приводить к ухудшению энергетических показателей [39].

5. *Организация второй зоны регулирования*. Векторное управление позволяет организовать наиболее эффективную работу во второй зоне регулирования за счет ослабления потока намагничивания, обеспечивая постоянство предельной мощности ЭП [40].

Классическая двухконтурная подчиненная полеориентированная система векторного управления АМ [41] базируется на принципах управления, разработанных ранее для электроприводов постоянного тока независимого возбуждения [42–44]. Так, для управления моментом электродвигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения и, как

следствие, управления скоростью производится регулирование напряжения, подводимого к якорной цепи, и формирование тока якоря согласно модели двигателя [10], прямо пропорционального электромагнитному моменту. Регулирование напряжения, подводимого в обмотке возбуждения ДПТ, позволяет контролировать поток возбуждения, который возможно изменять, к примеру, при необходимости работы во второй зоне регулирования, либо необходимости формирования кратковременного повышенного момента на низких скоростях.

Аналогично двухконтурной системе управления ДПТ в основе векторной системы при управлении АМ имеется два условно независимых главных контура регулирования [41], а именно контур скорости и контур потокосцепления, а также два подчиненных контура, отвечающих за формирование и регулирование тока в обмотках статора. Широко применяемая в инженерной практике структура векторной системы автоматического управления асинхронным электродвигателем с датчиком скорости представлена на рисунке 1.

Согласно структуре векторной системы управления (рисунок 1) невозможно качественное функционирование контуров

регулирования тока, скорости и потокосцепления, для настройки регуляторов которых требуются оценки параметров Т-образной схемы АМ [19]. Без задания корректной уставки управления для контура потокосцепления, расчет которого также связан с оценками параметров Т-образной схемы замещения АМ, невозможно обеспечить желаемый для многих систем номинальный уровень скорости при номинальном уровне нагрузки на валу и номинальной уровне тока в обмотках статора. Обеспечение таких характеристик ЭП, в свою очередь, свидетельствует о правильном соотношении в распределении энергии между контурами скорости и потокосцепления системы управления для конкретной АМ.

Оценка параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным

На практике широко применяются методы предварительного определения параметров, базирующиеся на использовании каталожных (справочных) данных АМ. Известна безытерационная методика [45], позволяющая определить все параметры Т-образной схемы замещения АМ серий 4А и АТД. Апробирование метода

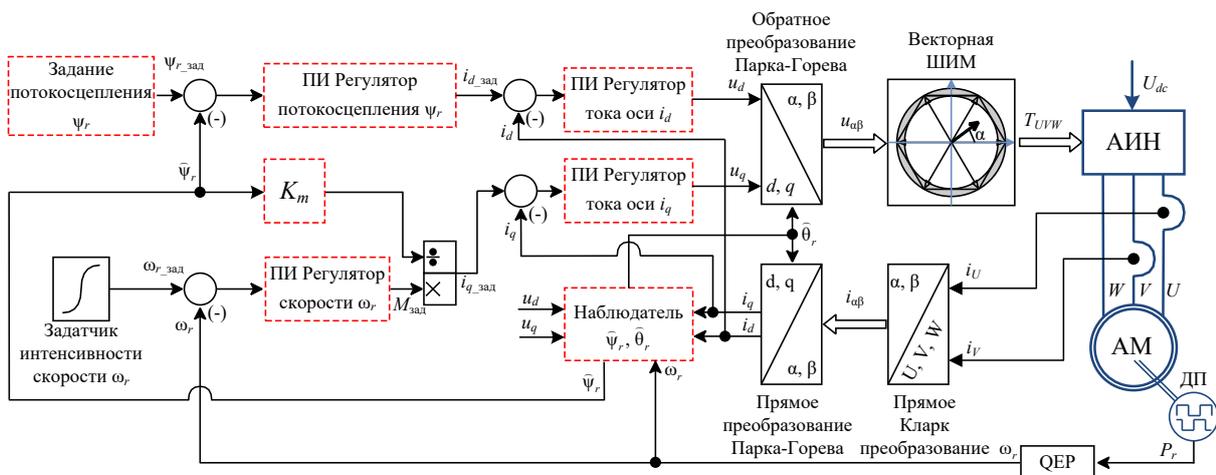


Рисунок 1. Компоненты векторной системы управления с датчиками электрических и механических переменных состояния, зависящие от оценок параметров схемы замещения АМ

Figure 1. Components of a vector control system with sensors for electrical and mechanical state variables, depending on estimates of the parameters of the IM equivalent circuit

производилось для АМ мощностью от 3 до 160 кВт, изготавливаемых в строгом соответствии с ГОСТ. Одним из достоинств методики является учет зависимости активного и индуктивного сопротивления роторной обмотки от скольжения АМ. В качестве другого достоинства методики можно выделить возможность использования в качестве исходных данных экспериментальные, полученные согласно ГОСТ [46]. Погрешности оценок параметров схемы замещения составили не более 15 %, что является приемлемым для определенных применений в инженерной практике, но не всегда достаточным.

Схожим безытерационным методом является [47], применение которого возможно для определения параметров АМ малой мощности. В качестве преимуществ метода можно выделить учет эффекта насыщения магнитной цепи. Однако стоит отметить, что подбор значения коэффициента, отвечающего за учет эффекта насыщения, производится эмпирически и с определенной степенью приближения.

В предлагаемых алгоритмах [48] также без применения итерационных процедур предусматривается определение оценок параметров схемы замещения АМ, при этом учитывается нелинейная зависимость тока холостого хода от напряжения питания и его частоты. Учет нелинейной зависимости заключается в расчете относительного значения магнитного потока в магнитопроводе статора и определении относительного значения тока холостого хода по относительной характеристике намагничивания. При этом наилучший эффект достигается при расчете характеристик АД небольшой мощности (примерно до 5 кВт) и особенно асинхронных микродвигателей, у которых относительный ток холостого хода имеет повышенное значение.

Еще один безытерационный метод [49] предлагается применять для АМ большой мощности. Апробирование метода производилось на АМ мощностью 250 кВт серии 4А. Для снижения погрешности при определении параметров предварительно определяется зависимость тока холостого хода мощных АМ от номинальной мощности.

Существуют также итерационные методы определения параметров АМ по каталожным данным [50], во многом базирующиеся на методике [45]. Метод основан на подборе коэффициента, характеризующего отношение активного сопротивления фазы статора к приведенному активному сопротивлению фазы ротора.

Другой итерационной методикой определения параметров схемы замещения АМ по справочным данным является [51]. Автор добивается схождения экспериментальных и восстановленных механических и электромеханических характеристик АМ, при этом для правильного расчета значений в режиме пуска производится учет эффекта вытеснения тока, для чего необходимо значение глубины паза, зачастую неизвестного. В расчетах также применялось приближенное значение коэффициента приведения Т-образной схемы замещения к Г-образной схеме, а также ряд других допущений. В целом предложенная методика [51] расчета параметров дает удовлетворительный результат для машин мощностью от 5 до 250 кВт серии 5А. Для машин меньшей мощности требуется уточнение модели и методики расчета параметров.

Методы [45, 47, 49–51] определения параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным, имеют *общие недостатки*:

1. многочисленные принимаемые допущения и задаваемые эмпирические коэффициенты в представленных методах дают возможность с приемлемой точ-

ностью определять параметры только серийных общепромышленных АМ. Подобные методы являются непригодными для определения параметров машин нестандартной конструкции, таких как погружные двигатели, высоковольтные, а также низкоскоростные АМ;

2. для уменьшения погрешности оценок требуется сбор априорной информации о работе АМ в номинальных режимах, режимах короткого замыкания, холостого хода, что является затруднительным;

3. представленные методы не учитывают текущее температурное состояние машины и соответственно ее влияние на определяемые параметры АМ.

К преимуществам данного подхода относятся:

1. отсутствие необходимости в выведении исследуемой АМ из эксплуатации и остановки технологического процесса;

2. отсутствие необходимости применения дополнительного испытательного оборудования и измерительных средств для нахождения оценок параметров схемы замещения АМ.

Оценка параметров схемы замещения асинхронной машины с применением испытательного оборудования

Методы независимого тестирования (off-site методы) предполагают индивидуальное тестирование АМ, отсоединенного от приводимого механизма. Для проведения тестирования применяются испытательные стенды и другое специализированное оборудование. В ходе тестирования производится оценка отклика АМ на специально сформированные управляющие воздействия и определение параметров на их основе.

Среди экспериментальных методов определения параметров наиболее часто применяются классические подходы тестирования: режим холостого хода,

короткого замыкания и номинальной нагрузки [46]. В одной из работ [52] для определения параметров производились опыты холостого хода и короткого замыкания по классической методике. В работе предложена схема замещения АД, учитывающая магнитные потери от потока рассеяния статорной обмотки. Для упрощения расчетов в установившихся и переходных режимах рекомендован учет эффекта вытеснения тока ротора, влияние которого эквивалентно магнитным потерям. Также представлен способ экспериментальной коррекции параметров модифицированной схемы замещения с учетом влияния сопротивления статорной обмотки на напряжения намагничивающего контура при обработке данных опыта холостого хода, а также влияния намагничивающего тока при обработке данных опыта короткого замыкания.

Особенностью работы [53] является методика определения основных параметров тягового электродвигателя большой мощности. Определение параметров производилось на основании опытов холостого хода и короткого замыкания с применением метода разделения потерь в режиме номинальной нагрузки. Апробирование метода производилось на асинхронном тяговом электродвигателе мощностью 1250 кВт. В результате получены оценки параметров применительно к Т-образной схеме замещения АМ, а также произведена оценка мощности основных потерь в различных режимах работы.

В работе [54] рассматривается метод определения параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя с фазным ротором на основе опыта холостого хода. В работе произведен учет влияния напряжения намагничивающего контура на ток холостого хода и потери в стали. Апробирование метода производилось на крановом асинхронном двигателе с фазным ротором мощностью 3,5 кВт.

Другому подходу к определению параметров посвящена работа [55]. Подход, включающий комбинацию схемного и пространственного моделирования электромагнитных полей, позволяет учесть влияние конструктивных особенностей АД, эффекты само- и взаимоиндукции обмоток, поверхностный и торцевой эффекты в статоре и роторе, нелинейность электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов на электромагнитные процессы и параметры АД в динамических режимах короткого замыкания. В работе установлено, что по сравнению с общеизвестными методами [45] предложенный схемно-полевой метод позволяет повысить точность оценивания параметров на 15 %. К недостаткам метода можно отнести необходимость информации о конструктивных особенностях и материалах, применяемых в конкретной АМ. В большинстве случаев эта информация недоступна для обычного пользователя электротехнического оборудования и является коммерческой тайной.

Другой подход экспериментального определения параметров схемы замещения АМ описан в [56]. Метод, разработанный автором, позволяет найти не сами параметры, а характеризующие их коэффициенты, которые могут быть использованы при настройке векторной системы управления. Для определения границы линейной зоны кривой намагничивания предлагается применять опыт холостого хода. Нахождение соотношения параметров для настройки системы управления производится с помощью опыта минимума тока, а также произвольно задаваемого потокосцепления ротора. Предложенная методика была протестирована на низкоскоростном многополюсном асинхронном двигателе. Применение данного подхода ограничивается условно линейной зоной кривой намагничивания, не достигая зоны насыщения. Данная

методика может применяться только для АМ, у которых при определении оценок параметров схемы замещения с помощью опыта холостого хода индуктивность мало зависит от тока статора.

Методы независимого тестирования для определения параметров схемы замещения асинхронной машины имеют *общие недостатки*:

1. методы независимого тестирования требуют выведения используемой АМ из эксплуатации и дальнейших испытаний на специализированных нагрузочных стендах с требуемым набором датчиков. Это обстоятельство делает подобную процедуру определения параметров дорогостоящей, а в случае габаритных АМ большой мощности, не всегда реализуемой;

2. представленные методы не могут учитывать текущее температурное состояние машины, и соответственно влияние температуры на определяемые параметры АМ, непосредственно в составе рабочего органа.

К преимуществам данного подхода относится возможность исследования асинхронной машины в различных режимах работы, что позволяет определить оценки параметров наиболее достоверно.

Методы предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с заторможенным ротором средствами преобразователя частоты

Методы предварительной идентификации параметров схемы замещения АМ с заторможенным ротором средствами частотного преобразователя (ПЧ) базируются на подаче тестовых сигналов напряжения в обмотки АМ и оценке соответствующих откликов тока с использованием различных численных методов.

В работе [57] описывается метод определения параметров Т-образной схемы

замещения АМ, базирующийся на восстановлении частоты и амплитуды тока с помощью быстрого Фурье преобразования (*Fast Fourier Transform*). На первом этапе производится определение активного сопротивления ротора, для чего на статорные обмотки подается ступенчатое управляющее воздействие. На следующем этапе производится определение индуктивностей рассеяния статора и ротора, для чего на обмотки статора подается высокочастотный сигнал (78 Гц), позволяющий игнорировать процессы, происходящие в цепи намагничивания. На последнем этапе производится экспериментальное определение индуктивности главного контура намагничивания, а также приведенного активного сопротивления ротора с помощью формирования низкочастотного синусоидального сигнала тока (от 0,7 Гц и 1,5 Гц) в статорных обмотках. В работе описаны проблемы выделения спектра зашумленных и искаженных фазных токов, а также методы компенсации негативного влияния мертвого времени на сигнал, модулированный автономным инвертором напряжения (АИН). Недостатком работы является недостаточная теоретическая обоснованность подбора частот синусоидальных тестовых воздействий.

Схожей методике определения параметров АМ посвящена работа [58]. Особенностью данной работы является то, что метод предназначен для определения параметров схемы замещения линейного асинхронного электродвигателя, у которого индуктивности рассеяния статора и ротора значительно различаются, в отличие от вращающихся асинхронных машин, для которых индуктивности рассеяния часто принимают равными. Определение параметров производится в три этапа аналогично [57] с применением Фурье-преобразования при анализе синусоидальных сигналов. На первом этапе на

обмотки линейной АМ подается постоянное напряжение, и производится определение активного сопротивления статорной обмотки по установившемуся значению фазного тока. На втором этапе производится определение суммарной индуктивности рассеяния с помощью подачи высокочастотного синусоидального сигнала (500 Гц), что позволяет не учитывать в расчетах активные сопротивления статора и ротора, а также контур намагничивания. На третьем этапе на статорные обмотки подается низкочастотный синусоидальный сигнал, и производится определение индуктивности главного контура намагничивания, а также приведенного активного сопротивления ротора. Предложенный подход имеет хорошую точность при определении индуктивностей рассеяния статора и ротора в сравнении с методами, основанными на опытах холостого хода и короткого замыкания, однако демонстрирует большую погрешность при определении индуктивности главного контура намагничивания. Кроме того, в предложенной методике применяется коэффициент, определяемый эмпирически для подобных машин, что может вызывать дополнительные погрешности при определении параметров линейных АМ нестандартного исполнения. Также в работе [58] не учитывается негативное влияние работы АИН на форму токов, формируемых в АМ, как это было исследовано в [57].

К недостаткам данного метода можно отнести:

1. необходимость остановки технологического процесса для проведения процедуры предварительной идентификации;
2. необходимость построения сложной процедуры, требующей учета множества факторов и не имеющей общепризнанного математического описания.

При этом у данного метода имеется ряд преимуществ:

1. определение оценок параметров модели АМ, непосредственно применяемой в составе ЭП с учетом ее текущего температурного состояния, с высокой точностью непосредственно перед началом эксплуатации;
2. отсутствие необходимости в выведении ЭП из эксплуатации, а также в применении дополнительного испытательного оборудования и измерительных средств для нахождения оценок параметров АМ.

Выводы

Проведенный анализ методов нахождения оценок параметров схемы замещения асинхронной машины показал, что:

- эффективность и работоспособность современных систем управления частотными электроприводами непосредственно зависит от корректности электромагнитных параметров модели АМ, при-

Список источников

1. Kostic M., Ivanovic M., Minic S. Reduction of Electric Energy Consumption in Induction Motor Drives by Setting Supply Voltage. 2012 2nd International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications. 2019. P. 128-133.
2. Mohammadali Khodapanah, Ahmed F Zobia, Maysam Abbod. Estimating Power Factor of Induction Motors Using Regression Technique // 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). 2016. P. 502-507.
3. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
4. Бекишев Р.Ф., Дементьев Ю.Н. Электропривод. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 301 с.
5. Crowder R. Electric Drives and Electromechanical Systems. 2nd Ed. Butterworth-Heinemann, UK, 2019. 322 p.
6. Tilli A., Conficoni C., Hashemia A. An Effective Control Solution for Doubly-Fed Induction Generator under Harsh

меняемой в составе электропривода. Как следствие, есть потребность в оценке значений электромагнитных параметров модели АМ непосредственно перед началом эксплуатации ЭП;

- значения параметров АМ зависят от текущего теплового состояния и режима работы ЭП. Достаточная степень уточнения модели, а также допущения, принимаемые при ее составлении, зависят от требуемого режима эксплуатации, а также от типа АМ, применяемой в составе ЭП;

- определение значений оценок параметров схемы замещения асинхронных машин возможно как по каталожным данным либо с использованием специального испытательного оборудования, так и путем проведения процедуры предварительной активной идентификации на основе переменных состояния, доступных для измерения средствами ПЧ, таких как токи, напряжения и угловая скорость ротора.

Balanced and Unbalanced Voltage Sags // Control Engineering Practice. 2019. Vol. 84. P. 172-182. doi: 10.1016/j.conengprac.2018.11.014.

7. Papera L.M. Microhydro Power Plant Future Energy Source. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 56 p.

8. Дворецкая М.И., Жданова А.П., Лушников О.Г., Слива И.В. Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России: справочник / Под общ. ред. к.т.н., проф. В.В. Берлина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 224 с.

9. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1980. 890 с.

10. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1985. 840 с.

11. De Doncker R., Pulte D.W.J., Veltman A. Advanced Electrical Drives. Springer Netherlands, 2011. 462 p.

12. Епифанов А.П., Епифанов Г.А. Электрические машины: учебник. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 300 с.

13. Bai L., Ma W. *Energy-Saving Principles and Technologies for Induction Motors*. John Wiley & Sons Limited, 2019. 227 p.
14. Попов В.В. *Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов*. СПб.: Питер, 2007. 350 с.
15. Sieklucki G. An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model S Vehicle // *International Symposium on Electrical Machines (SME)*. 2018. P. 1-6.
16. Макаров В.Г. *Асинхронный электропривод электромеханических систем с оптимальными режимами работы по критерию энергосбережения: дисс. ... канд. техн. наук*. Казань, 2011. 162 с.
17. Котин Д.А. *Адаптивные алгоритмы бездатчикового управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: дисс. ... канд. техн. наук*. Новосибирск, 2010. 135 с.
18. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. *Induction Motor Control Design*. Springer-Verlag London, 2011. 351 p.
19. Веселов Г.Е. *Прикладная теория и методы синергетического синтеза иерархических систем управления: дисс. ... д-ра техн. наук*. Таганрог, 2006. 332 с.
20. Панкратов В.В. *Методы синтеза автоматического управления электроприводами переменного тока, малочувствительных к изменениям параметров: дисс. ... д-ра техн. наук*. Новосибирск, 1997. 479 с.
21. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. Методы и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2015. Т. 15. № 1. С. 47-53.
22. Cheng-Ta Chung, Chien-Hsun Wu, Yi-Hsuan Hung. Evaluation of Driving Performance and Energy Efficiency for a Novel Full Hybrid System with Dual-Motor Electric Drive and Integrated Input- and Output-Split e-CVT // *Energy*. 2020. Vol. 191. P. 1-10.
23. Minav T.A., Laurila L.I.E., Pyrhönen J.J. Analysis of Electro-Hydraulic Lifting System's Energy Efficiency with Direct Electric Drive Pump Control // *Automation in Construction*. 2013. Vol. 30. P. 144-150.
24. Поляков В.Н. *Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: концепция, задачи оптимизации, математические модели и алгоритмы управления: дисс. ... д-ра техн. наук*. Екатеринбург, 2009. 510 с.
25. Mohan H., Dwivedi S.K. Sensorless Control of Electric Drives — A Technological Review // *IETE Technical Review*. 2019. Vol. 37 (8). P. 1-25.
26. Глазырин А.С. *Способы и алгоритмы эффективной оценки переменных состояния и параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов: дисс. ... д-ра техн. наук*. Томск, 2016. 376 с.
27. Тимошкин В.В. *Разработка и исследование наблюдателя угловой скорости для асинхронных электроприводов по схеме ТРН-АД: дисс. ... канд. техн. наук*. Томск, 2014. 162 с.
28. Зюзев А.М. *Развитие теории и обобщение опыта разработки автоматизированных электроприводов агрегатов нефтегазового комплекса: дисс. ... д-ра техн. наук*. Екатеринбург, 2004. 347 с.
29. Козлова Л.Е. *Разработка нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН-АД: дисс. ... канд. техн. наук*. Томск, 2016. 144 с.
30. Виноградов А.Б. *Векторное управление электроприводами переменного тока*. Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2008. 298 с.
31. Пашков Е.В., Крамарь В.А., Кабанов А.А. *Следящие приводы промышленного технологического оборудования*. СПб: Изд-во «Лань», 2021. 364 с.
32. Erazo-Damián I., Apsley J.M., Perini R., Iacchetti M.F., Marques G.D. Stand-Alone DFIG FOC Sensitivity and Stability under Mismatched Inductances // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019. Vol. 34. No. 2. P. 860-869.
33. Амр Рефки Али Абд Эль Вхаб. *Разработка алгоритмов управления электропривода с улучшенными динамическими характеристиками на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами: дис. ... канд. техн. наук*. Томск, 2012. 145 с.
34. Friese P., Rambau J. Online-Optimization of Multi-Elevator Transport

- Systems with Reoptimization Algorithms Based on Set-Partitioning Models // *Discrete Applied Mathematics*. 2006. Vol. 154 (13). P. 1908-1931.
35. Utgoff P.E., Connell M.E. Real-Time Combinatorial Optimization for Elevator Group Dispatching // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*. 2012. Vol. 42. No. 1. P. 130-146.
36. Архангельский Г.Г. Современные тенденции и перспективы развития лифтостроения // *Стройпрофиль*. 2008. № 7. С. 94-96.
37. Плахотникова Е.В. Обеспечение качества систем электропривода запорная арматура на стадии проектирования // *Известия Тульского государственного университета*. 2014. № 11. Ч. 2. С. 358-364.
38. Shun-Chang Chang. Stability Analysis, Routes to Chaos, and Quenching Chaos In Electromechanical Valve Actuators // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2020. Vol. 177. P. 140-151.
39. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). ООО «Гамем», 2015. 72 с.
40. Tolochko O.I., Kaluhin D., Palis S., Oshurko S.V. Field Weakening Control for Induction Motors Based on Copper and Iron Losses Minimization // *Applied Aspects of Information Technology*. 2020. Vol. 3. No. 2. P. 44-57.
41. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANSVECTOR — Regelung von Asynchronmaschinen // *Siemens-Zeitschrift*. 1971. No. 45. P. 757.
42. Aravind M.A., Dinesh N.S., Rajana K. Application of EMPC for Precise Position Control of DC-Motor System with Backlash // *Control Engineering Practice*. 2020. Vol. 100. P. 1-10.
43. Мисеюк О.И., Васюков С.А., Красовский А.Б. Исследование двигателя постоянного тока независимого возбуждения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 24 с.
44. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 184 с.
45. Мошинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // *Электричество*. 1998. № 4/98. С. 38-42.
46. ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний (с Изменениями № 1, 2). М.: Изд-во стандартов, 2003. 41 с.
47. Свит П.П., Семкин Б.В. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности // *Ползуновский Альманах*. 2004. № 3. С. 96-99.
48. Гридин В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным // *Электричество*. 2018. № 9/98. С. 44-48.
49. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // *Вектор науки ТГУ*. 2013. № 1 (23). С. 108-112.
50. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (*MatLab 7.0.1*): учеб. пособие / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 292 с.
51. Усольцев А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным [Электронный ресурс] / [Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем]. URL: http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf (дата обращения: 19.03.2017).
52. Сидельников Б.В., Беляев М.А., Потапов А.И. Модифицированная схема замещения асинхронного двигателя // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2014. С. 186-189.
53. Якушев А.Я., Назирхонов Т.М., Викулов И.П., Марков К.В. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя // *Известия петер-*

бургского университета путей сообщения. 2019. № 4/16. С. 592-601.

54. Шеремет А.И., Шевченко Г.С. Определение параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя на основе опыта холостого хода // Научный вестник ДГМА. 2017. № 3/24Е. 2017. С. 103-108.

55. Ярымбаш Д.С., Коцур М.И., Ярымбаш С.Т., Коцур И.М. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания // Электротехника та електроенергетика. 2017. № 1. С. 24-30.

56. Калачев Ю.Н. К вопросу определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя // Труды IX международной (XX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. 2016. № 1. С. 352-355.

57. Baiqiang Yu, Anwen Shen, Yu Kong, Shuo Yue. Parameter Identification for Induction Motor Eliminating Dead Zone Effect // 2019 Chinese Automation Congress (CAC). 2019. Vol. 1. P. 1669-1675.

58. Chen Yang, Jing Yang. Off-line Parameter Identification of Linear Induction Motor Based on PWM Inverter // 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). 2019. Vol. 1. P. 477-481.

References

1. Kostic M., Ivanovic M., Minic S. Reduction of Electric Energy Consumption in Induction Motor Drives by Setting Supply Voltage. *2012 2nd International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications*, 2019, pp. 128-133.

2. Mohammadali Khodapanah, Ahmed F Zobaa, Maysam Abbod. Estimating Power Factor of Induction Motors Using Regression Technique. *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2016, pp. 502-507.

3. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.

4. Bekishev R.F., Dement'ev Yu.N. *Elektroprivod* [Electric Drive]. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 301 p. [in Russian].

5. Crowder R. *Electric Drives and Electromechanical Systems*. 2nd Ed. Butterworth-Heinemann, UK, 2019. 322 p.

6. Tilli A., Conficoni C., Hashemia A. An Effective Control Solution for Doubly-Fed Induction Generator under Harsh Balanced and Unbalanced Voltage Sags. *Control Engineering Practice*, 2019, Vol. 84, pp. 172-182. doi: 10.1016/j.conengprac.2018.11.014.

7. Papera L.M. *Microhydro Power Plant Future Energy Source*. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 56 p.

8. Dvoreckaya M.I., Zhdanova A.P., Lushnikov O.G., Sliva I.V. *Vozobnovlyaemaya energiya. Hidrojelektrostantsii Rossii: spravochnik*. [Renewable Energy. Hydroelectric Power Stations of Russia: Reference Book]. Saint-Petersburg, Izd-vo Politehn. un-ta, 2018. 224 p. [in Russian].

9. Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric Cars]. Moscow, Vysshaya shkola, 1980. 890 p. [in Russian].

10. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric Cars]. Leningrad, Energiya Publ., 1985. 840 p. [in Russian].

11. De Doncker R., Pulte D.W.J., Veltman A. *Advanced Electrical Drives*. Springer Netherlands, 2011. 462 p.

12. Epifanov A.P., Epifanov G.A. *Elektricheskie mashiny: uchebnik* [Electric Machines: Textbook]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2017. 300 p. [in Russian].

13. Bai L., Ma W. *Energy-Saving Principles and Technologies for Induction Motors*. John Wiley & Sons Limited, 2019. 227 p.

14. Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka: uchebnik dlya vuzov* [Electric Cars. AC Machines: Textbook for Universities]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2007. 350 p. [in Russian].

15. Sieklucki G. An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model S Vehicle. *International Symposium on Electrical Machines (SME)*, 2018, pp. 1-6.

16. Makarov V.G. *Asinhronnyy elektroprivod elektromekhanicheskikh sistem s optimal'nymi rezhimami raboty po kriteriyu energosberezheniya: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Asynchronous Electric Drive of

Electromechanical Systems with Optimal Operating Modes According to the Criterion of Energy Saving: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Kazan', 2011. 162 p. [in Russian].

17. Kotin D.A. *Adaptivnye algoritmy bezdatchikovogo upravleniya asinhronnymi elektroprivodami podyymno-transportnykh mekhanizmov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Adaptive Algorithms for Sensorless Control of Asynchronous Electric Drives of Hoisting and Transport Mechanisms: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Novosibirsk, 2010. 135 p. [in Russian].

18. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. *Induction Motor Control Design*. Springer-Verlag London, 2011. 351 p.

19. Veselov G.E. *Prikladnaya teoriya i metody sinergeticheskogo sinteza ierarkhicheskikh sistem upravleniya: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Applied Theory and Methods of Synergetic Synthesis of Hierarchical Control Systems: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Taganrog, 2006. 332 p. [in Russian].

20. Pankratov V.V. *Metody sinteza avtomaticheskogo upravleniya elektroprivodami peremennogo toka, malochuvstvitel'nykh k izmeneniyam parametrov: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Methods for the Synthesis of Automatic Control of AC Electric Drives Insensitive to Changes in Parameters: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Novosibirsk, 1997. 479 p. [in Russian].

21. Kozyaruk A.E., Vasil'ev B.Yu. *Metody i sredstva povysheniya energo-effektivnosti mashin i tekhnologiy s asinkhronnymi elektroprivodami* [Methods and Means of Improving the Energy Efficiency of Machines and Technologies with Asynchronous Electric Drives]. *Vestnik YurGU. Seriya «Energetika» — Vestnik SUSU. Series «Energy»*, 2015, Vol. 15, No. 1, pp. 47-53. [in Russian].

22. Cheng-Ta Chung, Chien-Hsun Wu, Yi-Hsuan Hung. Evaluation of Driving Performance and Energy Efficiency for a Novel Full Hybrid System with Dual-Motor Electric Drive and Integrated Input- and Output-Split e-CVT. *Energy*, 2020, Vol. 191, pp. 1-10.

23. Minav T.A., Laurila L.I.E., Pyrhönen J.J. Analysis of Electro-Hydraulic Lifting System's Energy Efficiency with Direct Electric Drive Pump Control. *Automation in Construction*, 2013, Vol. 30, pp. 144-150.

24. Polyakov V.N. *Energoeffektivnye rezhimy reguliruemyykh elektroprivodov: kontseptsiya, zadachi optimizatsii, matematicheskie modeli i algoritmy upravleniya: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Energy-Efficient Modes of Controlled Electric Drives: Concept, Optimization Problems, Mathematical Models and Control Algorithms: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 2009. 510 p. [in Russian].

25. Mohan H., Dwivedi S.K. Sensorless Control of Electric Drives — A Technological Review. *IETE Technical Review*, 2019, Vol. 37 (8), pp. 1-25.

26. Glazyrin A.S. *Sposoby i algoritmy effektivnoy otsenki peremennykh sostoyaniya i parametrov asinkhronnykh dvigateley reguliruemyykh elektroprivodov: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Methods and Algorithms for Effective Assessment of State Variables and Parameters of Asynchronous Motors of Adjustable Electric Drives: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Tomsk, 2016. 376 p. [in Russian].

27. Timoshkin V.V. *Razrabotka i issledovanie nablyudatelya uglovoy skorosti dlya asinkhronnykh elektroprivodov po skheme TRN-AD: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development and Study of the Observer of the Angular Velocity for Asynchronous Electric Drives According to the TRN-AD Scheme: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Tomsk, 2014. 162 p. [in Russian].

28. Zyuzev A.M. *Razvitie teorii i obobshchenie opyta razrabotki avtomatizirovannykh elektroprivodov agregatov neftegazovogo kompleksa: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Development of the Theory and Generalization of Experience in the Development of Automated Electric Drives for Oil and Gas Complex Units: Dr. Engin. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 2004. 347 p. [in Russian].

29. Kozlova L.E. *Razrabotka neyrosetevogo nablyudatelya uglovoy skorosti rotora v elektroprivode po skheme TRN-AD: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a Neural Network Observer of the Angular Velocity of the Rotor in an Electric Drive According to the TRN-AD Scheme: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Tomsk, 2016. 144 p. [in Russian].

30. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka*

[Vector Control of AC Drives]. Ivanovo, GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet im. V.I. Lenina», 2008. 298 p. [in Russian].

31. Pashkov E.V., Kramar' V.A., Kabanov A.A. *Sledyashchie privody promyshlennogo tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Tracking Drives of Industrial Technological Equipment]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2021. 364 p. [in Russian].

32. Erazo-Damián I., Apsley J.M., Perini R., Iacchetti M.F., Marques G.D. Stand-Alone DFIG FOC Sensitivity and Stability under Mismatched Inductances. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, Vol. 34, No. 2, pp. 860-869.

33. Amr Refki Ali Abd Jel' Vhab. *Razrabotka algoritmov upravleniya elektroprivoda s uluchshennymi dinamicheskimi kharakteristikami na baze sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of Control Algorithms for an Electric Drive with Improved Dynamic Characteristics Based on a Synchronous Motor with Permanent Magnets: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Tomsk, 2012. 145 p. [in Russian].

34. Friese P., Rambau J. Online-Optimization of Multi-Elevator Transport Systems with Reoptimization Algorithms Based on Set-Partitioning Models. *Discrete Applied Mathematics*, 2006, Vol. 154 (13), pp. 1908-1931.

35. Utgoff P.E., Connell M.E. Real-Time Combinatorial Optimization for Elevator Group Dispatching. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2012, Vol. 42, No. 1, pp. 130-146.

36. Arkhangel'skiy G.G. Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya lifto-stroeniya [Modern Trends and Prospects for the Development of Elevator Construction]. *Stroyprofil' — Stroyprofil*, 2008, No. 7, pp. 94-96. [in Russian].

37. Plakhotnikova E.V. Obespechenie kachestva sistem elektroprivoda zapornaya armatura na stadii proektirovaniya [Ensuring the Quality of Electric Drive Systems Shut-Off Valves at the Design Stage]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta — Izvestiya of the Tula State University*, 2014, No. 11, Ch. 2, pp. 358-364. [in Russian].

38. Shun-ChangChang. Stability Analysis, Routes to Chaos, and Quenching Chaos in Electromechanical Valve Actuators. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020. Vol. 177. P. 140-151.

39. Kalachev Yu.N. *Vektornoe regulirovanie (zametki praktika)* [Vector Regulation (Practice Notes)]. OOO «Gamem», 2015. 72 p. [in Russian].

40. Tolochko O.I., Kalukhin D., Palis S., Oshurko S.V. Field Weakening Control for Induction Motors Based on Copper and Iron Losses Minimization. *Applied Aspects of Information Technology*, 2020, Vol. 3, No. 2, pp. 44-57.

41. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANSVECTOR — Regelung von Asynchronmaschinen. *Siemens-Zeitschrift*, 1971, No. 45, pp. 757.

42. Aravind M.A., Dinesh N.S., Rayana K. Application of EMPC for Precise Position Control of DC-Motor System with Backlash. *Control Engineering Practice*, 2020, Vol. 100, pp. 1-10.

43. Miseyuk O.I., Vasyukov S.A., Krasovskiy A.B. *Issledovanie dvigatelya postoyannogo toka nezavisimogo vozbuzhdeniya* [Study of a DC Motor of Independent Excitation]. Moscow, MGTU im. N.Ye. Bauman, 2014. 24 p. [in Russian].

44. Kenio T., Nagamori S. *Dvigateli postoyannogo toka s postoyannymi magnitami: per. s angl.* [DC Motors with Permanent Magnets: transl. from Engl.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 184 p. [in Russian].

45. Moshhinskiy Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. *Opredelenie parametrov skhemy zameshheniya asinkhronnoy mashiny po kataloghnym dannym* [Determination of the Parameters of the Equivalent Circuit of an Asynchronous Machine According to Catalog Data]. *Elektrichestvo — Electricity*, 1998, No. 4/98, pp. 38-42. [in Russian].

46. *GOST R 53472-2009. Mashiny elektricheskies vrashchayushchiesya. Dvigateli asinkhronnye. Metody ispytaniy (s izmeneniyami Nos. 1, 2)* [State Standard R 53472-2009. Rotating Electrical Machines. Asynchronous Motors. Test Methods (with Changes Nos. 1, 2)]. Moscow, Izd-vo standartov, 2003. 41 p. [in Russian].

47. Svit P.P., Semkin B.V. Opredelenie parametrov skhem zameshchenii asinkhronnykh dvigateley nebol'shoy moshhnosti [Determination of the Parameters of Substitution Circuits for Asynchronous Motors of Small Power]. *Polzunovskiy Al'manakh — Polzunovskiy Almanakh*, 2004, No. 3, pp. 96-99. [in Russian].
48. Gridin V.M. Raschet kharakteristik asinkhronnykh dvigateley po kataloghnym dannym [Calculating the Characteristics of Induction Motors from the Catalogue Data]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2018, No. 9/98, pp. 44-48.
49. Makeev M.S., Kuvshinov A.A. Algoritm rascheta parametrov skhemy zameshheniya asinkhronnogo dvigatelya po kataloghnym dannym [Algorithm for Calculating the Parameters of the Equivalent Circuit of an Asynchronous Motor According to Catalog Data]. *Vektor nauki TGU — Vector of Science TSU*, 2013, No. 1 (23), pp. 108-112. [in Russian].
50. Teryokhin V.B. *Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink (MatLab 7.0.1): uchebnoe posobie* [Simulation of Electric Drive Systems in Simulink (MatLab 7.0.1): Textbook]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. 292 p. [in Russian].
51. Usol'tsev A.A. *Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po spravochnym dannym* [Determination of the Parameters of the Equivalent Circuit of an Asynchronous Motor According to Reference Data [Electronic Resource]]. St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems. URL: http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf (data obrashheniya: 19.03.2017). [in Russian].
52. Sidel'nikov B.V., Belyaev M.A., Potashov A.I. Modifitsirovannaya skhema zameshheniya asinkhronnogo dvigatelya [Modified Equivalent Circuit for an Asynchronous Motor]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta — Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University*, 2014, pp. 186-189. [in Russian].
53. Yakushev A.Ya., Nazirkhonov T.M., Vikulov I.P., Markov K.V. Opredelenie osnovnykh parametrov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya [Determination of the Main Parameters of an Asynchronous Traction Electric Motor]. *Izvestiya peterburgskogo universiteta putey soobshheniya — Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, No. 4/16, pp. 592-601. [in Russian].
54. Sheremet A.I., Shevchenko G.S. Opredelenie parametrov T-obraznoy skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya na osnove opyta kholostogo khoda [Determination of the Parameters of the T-Shaped Equivalent Circuit of an Asynchronous Motor Based on the Experience of Idling]. *Nauchnyy vestnik DGMA — Scientific Herald of the DSMBA*, 2017, No. 3/24E. 2017, pp. 103-108.
55. Yarymbash D.S., Kotsur M.I., Yarymbash S.T., Kotsur I.M. Osobennosti opredeleniya parametrov skhemy zameshheniya asinkhronnogo dvigatelya dlya rezhima korotkogo zamykaniya [Peculiarities of Determining the Parameters of the Equivalent Circuit of an Asynchronous Motor for a Short Circuit Mode]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika — Electrical and Power Engineering*, 2017, No. 1, pp. 24-30.
56. Kalachev Yu.N. K voprosu opredeleniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya [On the Issue of Determining the Parameters of the Replacement Circuit of an Asynchronous Motor]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive]. 2016, No. 1, pp. 352-355. [in Russian].
57. Baiqiang Yu, Anwen Shen, Yu Kong, Shuo Yue. Parameter Identification for Induction Motor Eliminating Dead Zone Effect. *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2019, Vol. 1, pp. 1669-1675.
58. Chen Yang, Jing Yang. Off-line Parameter Identification of Linear Induction Motor Based on PWM Inverter. *2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 2019, Vol. 1, pp. 477-481.



Павел Игоревич Пичугин
Pavel I. Pichugin

*магистрант кафедры
техники и электрофизики высоких напряжений,
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
Москва, Россия*

УДК 621.317

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-39-48

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ НАХОЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА ПО ИЗВЕСТНОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ПОТЕНЦИАЛУ СРЕДСТВАМИ COMSOL MULTIPHYSICS

Актуальность

Во множестве прикладных задач электрофизики и техники высоких напряжений благодаря своим отличным диэлектрическим свойствам широкое применение находят полимерные материалы, которые обладают способностью к накоплению на своей поверхности или в объёме электрических зарядов. Это свойство может быть как достоинством (при изготовлении электретов), так и недостатком (при использовании полимеров как изоляционной среды). Принципиально важной при этом является необходимость в характеристике и контроле степени заряженности, для чего используется величина поверхностной плотности заряда, которая, однако, может быть найдена лишь косвенным образом через электрический потенциал. При измерении потенциала ёмкостным зондом возникает трудность в решении обратной задачи преобразования потенциала в поверхностную плотность заряда, поскольку связь между этими величинами во многом зависит от геометрии заряженного тела и ёмкостного зонда. Наличие эффективного и универсального метода преобразования значительно упростит измерение поверхностной плотности заряда, знание которое необходимо в практических задачах электротехнологий и эксплуатации высоковольтного оборудования, имеющих элементы из полимерных материалов.

Цель исследования

Разработать методику восстановления распределения поверхностной плотности заряда по заданному измеренному распределению электрического потенциала, создаваемого поверхностным зарядом. Дать рекомендации по достижению оптимального соотношения между точностью и трудоёмкостью численных расчётов.

Методы исследования

Задача решается с применением численного моделирования в программном обеспечении на базе метода конечных элементов Comsol Multiphysics. С помощью созданной 3D модели, содержащей воспроизведённую конструкцию ёмкостного зонда и исследуемый заряженный материал, поясняется принцип формирования матрицы весовых коэффициентов, через которую впоследствии устанавливается взаимосвязь между дискретным набором измеренных потенциалов и неизвестным распределением поверхностной плотности заряда.

Результаты

Разработан эффективный метод пересчёта известного распределения электрического потенциала от заряженной поверхности в её поверхностную плотность заряда. Показан принцип построения и задания граничных условий в необходимой для пересчёта 3D модели. На примере одного заданного распределения электрического потенциала была показана высокая эффективность метода получения распределения

плотности заряда. Установлено, что точность метода растёт при более мелком разбиении заряженной поверхности на элементарные заряженные площадки. Даны рекомендации по использованию методов решения возникающих систем линейных алгебраических уравнений. Также было показано, как можно упростить используемую методику при наличии осесимметричного распределения плотности заряда.

Ключевые слова: обратная задача, электрический потенциал, поверхностная плотность заряда, ёмкостный зонд, плавающий потенциал, матрица весовых коэффициентов, обобщённый метод минимальных невязок, метод конечных элементов

SOLUTION OF AN INVERSE PROBLEM OF FINDING SURFACE CHARGE DENSITY WITH A KNOWN ELECTRICAL POTENTIAL USING COMSOL MULTIPHYSICS

Relevance

Polymer materials capable of electric charge accumulation on their surface and in volume have wide application in a great number of applied problems of electrophysics and high-voltage engineering due to their excellent dielectric property. This property can be both an advantage (in electret manufacture), and a disadvantage (when using polymers as an isolating medium). Fundamentally important here is the need to characterize and control the degree of charge using the value of surface charge density which, however, can be determined indirectly through the electric potential only. When measuring the potential using a capacitive probe, difficulties arise in solving an inverse problem of converting the potential into surface charge density, since the relationship between these values largely depends on the geometry of the charged body and the capacitive probe. An effective and universal conversion method will greatly simplify the measurement of the surface charge density that will be helpful in practical tasks of electrical technology and operation of high-voltage equipment with elements made of polymer materials.

Aim of research

Aim of the research is to develop a technique for restoring surface charge density distribution according to a given measured distribution of electric potential created by the surface charge; give recommendations on how to achieve an optimal balance between accuracy and labor intensity of numerical calculations.

Methods

The problem is solved using numerical modeling in finite element method based software Comsol Multiphysics. With the help of the created 3D model containing the reproduced design of the capacitive probe and the charged examined material, the principle of the weight coefficients matrix formation is explained, through which the relationship between a discrete set of measured potentials and the unknown distribution of the surface charge density is subsequently established.

Results

An effective method has been developed to recalculate the known distribution of the electric potential from a charged surface into its surface charge density. The principle of constructing and setting the boundary conditions in the 3D model required for recalculation is shown. On the example of one given distribution of electric potential, the high efficiency of the method for obtaining the distribution of the charge density was shown. It has been established that the accuracy of the method increases with a finer partition of the charged surface into elementary charged areas. Recommendations are given on the use of methods for solving the arising systems of linear algebraic equations. It was also shown how to simplify the technique used in the presence of an axisymmetric distribution of the charge density.

Keywords: inverse problem, electric potential, surface charge density, capacitive probe, floating potential, matrix of weighting coefficients, generalized minimal residual method, finite element method

Постановка проблемы

Во многих прикладных задачах возникает потребность в решении обратных задач, заключающихся в нахождении параметров модели по известному ответу модели на какое-либо воздействие.

Одной из таких задач в электростатике является получение распределения плотности заряда по какой-либо кривой или поверхности при наличии данных о создаваемом зарядами электрическом потенциале в определённых точках пространства. Иными словами, необходимо при помощи известного отклика системы в виде потенциала определить вызывающую его первопричину — величину заряда.

Данная задача часто возникает в следующих областях:

1) электротехнологии. В качестве примера можно привести получение полимерных электретов, которые представляют собой диэлектрики, сохраняющие электрическую поляризацию, обусловленную внешним электрическим полем [1]. Находясь в наэлектризованном состоянии, такой диэлектрик из полимерного материала обладает уникальными физико-химическими свойствами, что предопределило их использование в телефонии, электроакустике, медицине и нелинейной оптике. Одним из наиболее технологичных способов получения электретов является их электрическая зарядка в поле коронного разряда (короноэлектреты), в результате которого образованные ионы оседают на поверхности материала и создают определённый поверхностный потенциал. В [2] отмечается, что «одним из важнейших технологических факторов, влияющих на стабильность короноэлектретов, является характер распределения поверхностной плотности заряда».

Таким образом, принципиально важным является получение по измеренному потенциалу поверхностной плотности заряда для более эффективного контроля и повышения качества получения электретов;

2) эксплуатация высоковольтного оборудования. Полимерная изоляция высоковольтного оборудования, широко применяющаяся благодаря своим отличным электрическим и механическим свойствам, наряду с изолирующей функцией имеет способность к накоплению зарядов на поверхности или в объёме диэлектрика. Это негативно сказывается на диэлектрических свойствах полимера, поскольку накопленный заряд повышает риск развития частичных разрядов, повышает внутреннюю энергию материала и ведёт к его преждевременному старению [3]. Из этого также вытекает необходимость исследования образованной плотности заряда на поверхности диэлектрика;

3) нейтрализация статического электричества. Статическое электричество может накапливаться при транспортировке нефтепродуктов или сжатых газов по трубопроводам, в результате применения движущихся диэлектрических транспортерных лент в процессе обработки материалов, при пневмотранспорте, дроблении и перемешивании сыпучих материалов [4]. Статическое электричество представляет большую опасность для человека и технологических процессов.

В отличие от прямых задач, в которых ищется отклик системы на основании знания её свойств и параметров, решение обратных задач зачастую представляет довольно большую трудность. С широким распространением программ моделирования физических процессов, основан-

ных на методе конечных элементов (МКЭ), появляется возможность эффективного численного решения обратных задач. В статье излагается метод преобразования распределения потенциала, создаваемого заряженной поверхностью, в соответствующее ему распределение поверхностной плотности заряда.

Теоретические положения метода

Пусть имеется заряженная поверхность с поверхностной плотностью заряда $\sigma(x, y)$. Поверхностный заряд создаёт в пространстве электрическое поле, которое характеризуется распределением потенциала $\varphi(x, y, z)$.

Одним из распространённых способов измерения данного потенциала является использование ёмкостных зондов (Capacitive Probe) [5]. Находясь в электрическом поле на некотором расстоянии от заряженной поверхности, согласно закону электростатической индукции, на поверхности зонда наводится заряд противоположного знака Q , а сам зонд приобретает некоторый потенциал φ относительно заранее заданного нулевого потенциала (земли). Зная ёмкость зонда C , можно из соотношения $Q = C\varphi$ отыскать потенциал зонда. Если заряд равномерно распределён по поверхности ($\sigma = \text{const}$), то в большинстве случаев по измеренному потенциалу зонда φ можно сразу получить искомую поверхностную плотность заряда.

Если же заряд распределён неравномерно по поверхности, то чувствительность данного метода уже недостаточна для точного измерения потенциала. В таких случаях зонд соединяется с вибрирующим или вращающимся вольтметром. Вибрации или вращение элементов вольтметра создают изменение его ёмкости C по заранее известному закону, а нахождение вольтметра вместе с зондом под одним и тем же потенциалом φ создаёт в его цепи протекание ёмкостного тока I_C ,

через измерение которого представляется возможным получить значение наведённого на зонде потенциала φ .

Из электростатики известно, что потенциал φ одной из обкладок плоского конденсатора при заземлённой другой находится по следующей формуле:

$$\varphi = \frac{\sigma d}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (1)$$

где d — расстояние между обкладками;

ε — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками;

ε_0 — электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Из формулы (1) видно, что имеется соответствие между потенциалом обкладки и поверхностной плотностью заряда на ней, которое зависит только от геометрических и электрических параметров конденсатора.

Поскольку зонд и заряженная поверхность представляют собой аналогичным образом некоторую ёмкость, то для него справедливо соотношение (1) в следующем виде:

$$\varphi = A\sigma, \quad (2)$$

где A — функция, задающая ёмкостные параметры системы «зонд — поверхность» и зависящая, таким образом, от электрических (диэлектрические проницаемости заряженной поверхности и среды между ней и зондом), от геометрических (толщина заряженной поверхности, расстояние между зондом и поверхностью) параметров системы и геометрии зонда.

Поскольку зонд, как правило, представляет собой определённой степени сложности геометрическую конструкцию, то найти аналитическое выражение функции зонда A невозможно.

Решить данную проблему позволяет дискретизация задачи [6], заключающаяся в разбиении заряженной поверхности на N элементов, каждый из которых заряжен с постоянной поверхностной плотно-

стью заряда σ_j ($j = 1, \dots, N$). Пусть потенциал измеряется аналогично в N точках пространства. Тогда каждый потенциал φ_i ($i = 1, \dots, N$) по принципу суперпозиции является суммой потенциалов, создаваемых каждым заряженным элементом поверхности с поверхностной плотностью заряда σ_j :

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \sigma_j. \quad (3)$$

Расписывая выражение (3) для всех N точек измерения, можно получить следующее матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{N1} & A_{N2} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \dots \\ \sigma_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_N \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Из выражения (3) видно, что функция A заменяется матрицей коэффициентов A_{ij} , определяющих вклад заряженного элемента σ_j в потенциал i -ой точки пространства φ_i .

Таким образом, обратная задача сводится к нахождению матрицы весовых коэффициентов A_{ij} . Её нахождение возможно с помощью программного обеспечения для решения инженерных и научных задач на базе МКЭ Comsol Multiphysics. Покажем методику отыскания весовых коэффициентов A_{ij} .

Создание расчётной модели в Comsol Multiphysics

Создадим в программе Comsol Multiphysics 3D модель, состоящую из заряженной квадратной плёнки со стороной $a = 40$ мм, диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,3$ и толщиной $h = 100$ мкм, а также произвольно начерченного ёмкостного зонда, служащего для измерения созданного поверхностным зарядом потенциала электрического поля на высоте $H = 10$ мм от поверхности плёнки (рисунок 1). При этом исключается z -координата, измеренный потенциал

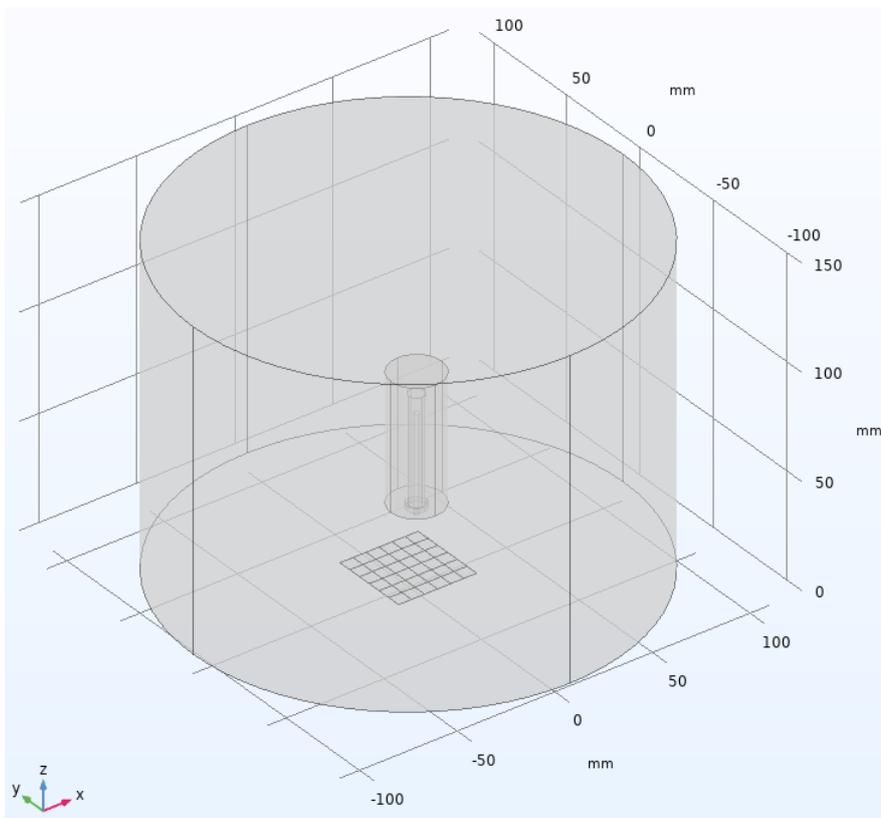


Рисунок 1. 3D-модель для нахождения весовых коэффициентов в программе Comsol Multiphysics

Figure 1. 3D model for finding weight coefficients in Comsol Multiphysics program

$\varphi(x, y)$ зависит теперь только от двух координат.

Металлический стержень ёмкостного зонда, на котором будет индуцироваться заряд, содержит вокруг себя заземлённый экран с целью предотвращения влияния сторонних электрических полей на измерительный процесс.

Поскольку МКЭ требует для расчётов задания искусственных границ, система «зонд — плёнка» была помещена в цилиндр больших размеров с нулевыми

граничными условиями 2-го рода на нём. Приведём в таблице 1 заданные граничные условия.

Разобьём поверхность плёнки на N квадратных элементов, $N = 25$ (рисунок 2).

Принцип нумерации заряженных элементов и точек измерения потенциала (точки на рисунке) показан на рисунке 2.

Зарядим в модели первый квадратный элемент поверхностной плотностью заряда $\sigma_1 = 1$ нКл/см², заряды же всех остальных квадратов примем равным

Таблица 1. Граничные условия 3D-модели

Table 1. Boundary conditions of a 3D model

Граничное условие	Место	Значение
Ground 1	нижняя сторона плёнки	плёнка заземлена ($\varphi = 0$ В)
Ground 2	весь объём экрана зонда	экран заземлён ($\varphi = 0$ В)
Floating Potential	весь объём стержня зонда	плавающий потенциал на стержне зонда (электростатическая индукция)
Surface Charge Density	выбранный квадратный заряженный элемент	поверхностная плотность заряда квадрата ($\sigma = 1$ нКл/см ²)

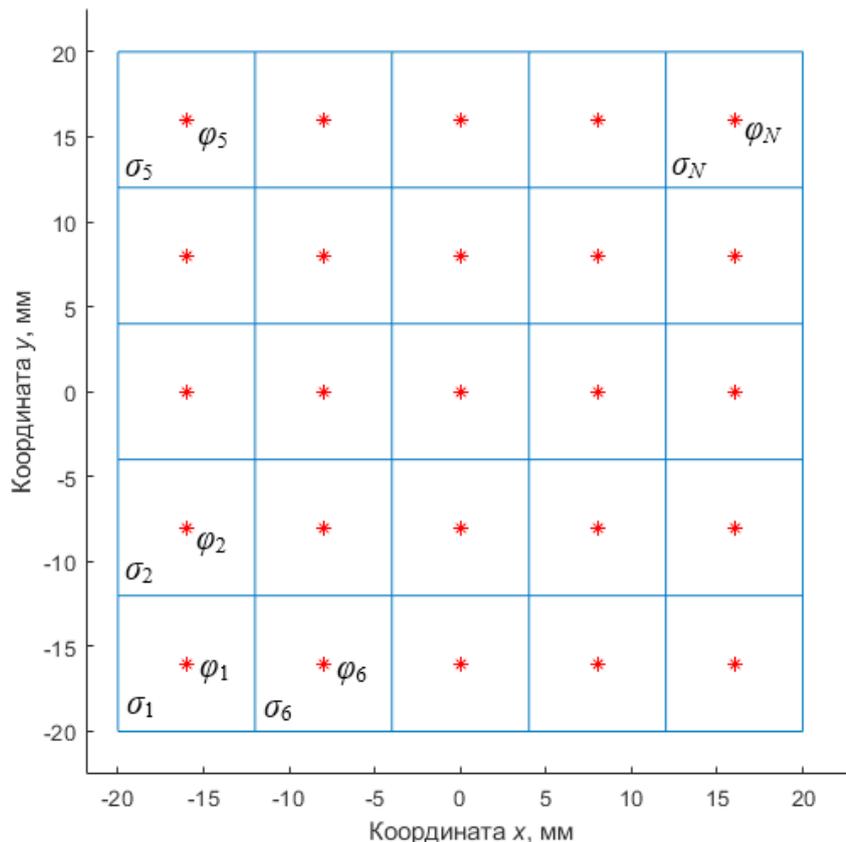


Рисунок 2. Разбиение заряженной поверхности на элементы

Figure 2. Partition of a charged surface into elements

нулю $\sigma_j = 0$ нКл/см² ($j = 2, \dots, N$). Измерим после полевого расчёта в программе Comsol Multiphysics потенциалы во всех точках i ($i = 1, \dots, N$), которые обусловлены только зарядом первого элемента. Потенциалы $\varphi(x, y)$ будем измерять в точках, координаты x, y которых соответствуют центрам квадратных элементов (рисунок 2).

Тогда выполняя матричное умножение в (4), можно получить следующий ряд выражений:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \Lambda & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \Lambda & A_{2N} \\ M & M & O & M \\ A_{N1} & A_{N2} & \Lambda & A_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ 0 \\ M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ M \\ \varphi_N \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$$\varphi_1 = A_{11}\sigma_1, \varphi_2 = A_{21}\sigma_1, \dots, \varphi_N = A_{N1}\sigma_1$$

Учитывая, что задана единичная поверхностная плотность заряда, можно получить, что измеренные в программе потенциалы точек центров квадратов численно соответствуют весовым коэффициентам первого столбца матрицы A .

Пусть далее заряжен второй квадратный элемент $\sigma_2 = 1$ нКл/см², заряды же всех остальных квадратов примем равным нулю $\sigma_j = 0$ нКл/см² ($j = 1, 3, \dots, N$). Прделав ту же самую процедуру измерения потенциалов точек можно получить значения коэффициентов второго столбца:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \Lambda & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \Lambda & A_{2N} \\ M & M & O & M \\ A_{N1} & A_{N2} & \Lambda & A_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \sigma_2 \\ M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ M \\ \varphi_N \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$\varphi_1 = A_{12}\sigma_2, \varphi_2 = A_{22}\sigma_2, \dots, \varphi_N = A_{N2}\sigma_2$$

Заряжая далее последовательно все остальные квадратные элементы, можно получить всю матрицу весовых коэффициентов A .

Зная матрицу A и имеющееся реальное распределение потенциала $\varphi(x, y)$ в данных точках, можно решить систему уравнений (4) и получить интересующее рас-

пределение $\sigma(x, y)$ поверхностной плотности заряда в образованных квадратных элементах:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ M \\ \sigma_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \Lambda & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \Lambda & A_{2N} \\ M & M & O & M \\ A_{N1} & A_{N2} & \Lambda & A_{NN} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ M \\ \varphi_N \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Очевидно, что чем мельче будет разбиение квадрата, тем точнее будет реконструировано распределение поверхностной плотности заряда. Однако с увеличением числа квадратных элементов будут расти трудозатраты на формирование матрицы, а также время вычисления всех потенциалов в рамках одной итерации. С этой целью необходимо ограничиться оптимальным числом N , при котором меньшая трудоёмкость будет сопровождаться удовлетворительной точностью расчёта.

Особое внимание следует уделить решению матричного уравнения (7). Значительная доля обратных задач являются вследствие дискретизации изначально непрерывного решения математически некорректно поставленными. Часто это обстоятельство приводит к неустойчивости решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Опыт решения рассматриваемой обратной задачи показывает, что из-за очень малого определителя матрицы весовых коэффициентов A получить адекватное решение традиционными методами решения СЛАУ не представляется возможным. В этой связи при решении обратной задачи следует прибегнуть к использованию итеративных решателей, среди которых эффективными оказываются обобщённый метод минимальных невязок (Generalized Minimal Residual Method) или его подвид метод квази-минимальных невязок (Quasi-Minimal Residual Method). Используя для решения данной обратной задачи программу MATLAB,

можно обратиться к соответствующим решателям Gmres или Qmr [7]. Сходимость к решению наблюдается при задании относительной погрешности вычисления 10^{-2} :

$$\frac{\text{norm}(\varphi - A\sigma)}{\text{norm}(\varphi)} \leq 10^{-2}. \quad (8)$$

Для решения задачи преобразования потенциала в поверхностную плотность заряда данная точность вычислений оказывается весьма удовлетворительной.

Пример использования метода

Продемонстрируем применение изложенной методики на конкретном примере.

Пусть измеренное распределение потенциала $\varphi(x, y)$ на высоте $H = 10$ мм от заряженной плёнки является симметричным относительно центра системы координат $(0; 0)$ и описывается аналитическим выражением (x, y в мм):

$$\varphi(x, y) = 10 - \frac{x^2 + y^2}{100} \text{ В}. \quad (9)$$

Проведём два расчёта, различающиеся числом квадратных элементов, на которые разбита заряженная поверхность: $N = 25$ (рисунок 2) и $N = 36$. Подставляя координаты центров квадратов в выражение (9), можно получить потенциалы точек $\varphi_i (i = 1, \dots, N)$.

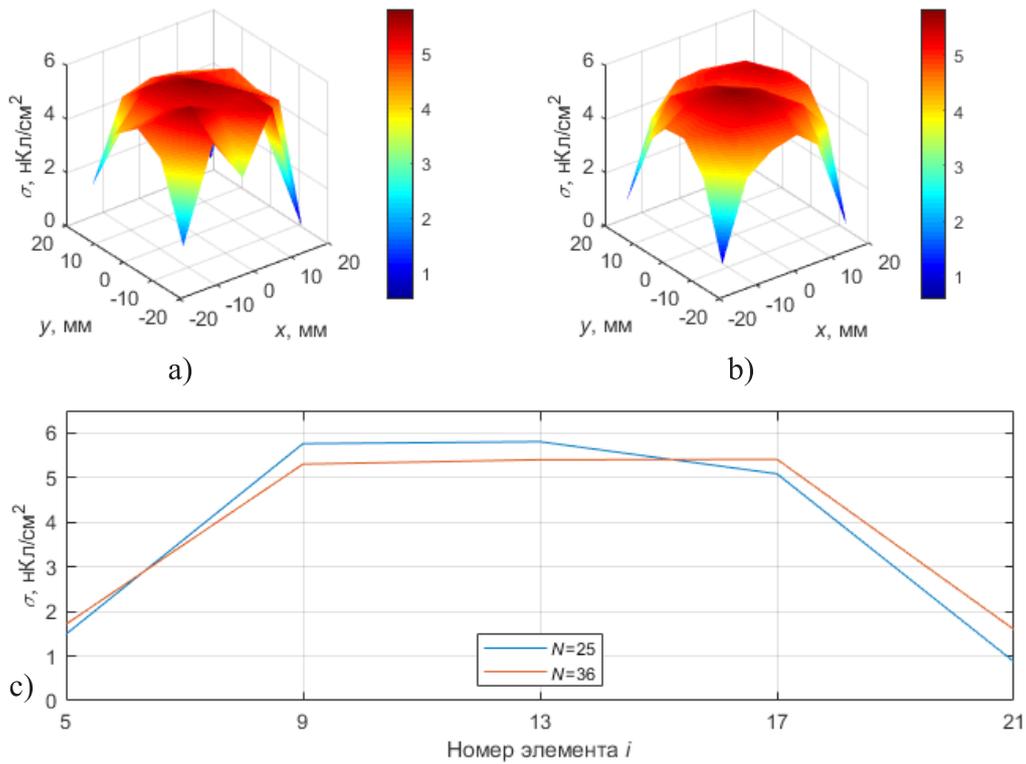
Подготовив по вышеизложенной методике матрицы весовых коэффициентов A и используя какой-либо из перечисленных итеративных решателей, можно получить распределения поверхностной плотности заряда по квадратам $\sigma_j (j = 1, \dots, N)$. Приведём полученные поверхности (рисунок 3), дополнительно построим график распределения поверхностной плотности заряда вдоль одной из диагоналей плёнки (с 5 до 21 элемента

для $N = 25$, с 6 до 31 элемента для $N = 36$). Поскольку распределение потенциала (9) задаёт параболоид, то распределения плотностей заряда вдоль диагоналей квадратной плёнок должно быть также симметричным относительно центра плёнки. Для возможности сравнения двух результатов плотности заряда при более мелком разбиении интерполированы на узлах более крупной сетки элементов.

Из рисунка 3, *b* видно, что при более мелком дроблении сетки полученный результат численно мало отличается от результата при дроблении сетки на $N = 25$ элементов (рисунок 3, *a*). Относительная погрешность максимальной поверхностной плотности заряда $\sigma_{N=25}$ по сравнению с $\sigma_{N=36}$ составляет около 2,5 %. Однако из рисунка 3, *b* можно заметить, что более мелкое дробление сетки привело к повышению симметричности распределения, что и должно наблюдаться в данной задаче. Таким образом, начиная с числа элементов $N = 36$, можно получить удовлетворительное по точности решение.

Разбиение заряженной поверхности на квадратные или прямоугольные элементы является универсальным и позволяет найти распределение плотности заряда при любом распределении потенциала. Если же заведомо имеется осесимметричное распределение плотности заряда (например, при зарядке круглой плёнки в поле коронного разряда при расположении коронирующего острия над центром плёнки), то вышеизложенный алгоритм можно видоизменить, рассматривая в качестве заряженных элементов круговые кольца (рисунок 4) и измеряя потенциал только вдоль одного из радиусов.

Расчёты показывают, что довольно хорошая точность может быть достигнута при числе колец $N = 20$.



a) $N = 25$; b) $N = 36$; c) вдоль диагонали заряженной поверхности

a) $N = 25$; b) $N = 36$; c) along the diagonal of the charged surface

Рисунок 3. Результаты вычислений поверхностной плотности заряда

Figure 3. Results of calculating surface charge density

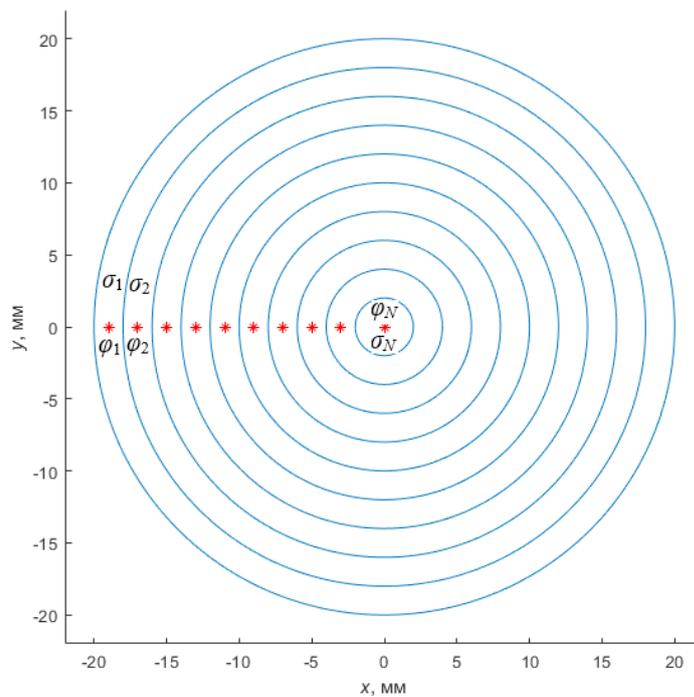


Рисунок 4. Разбиение заряженной поверхности на кольцевые элементы в случае осесимметричного распределения плотности заряда

Figure 4. Partition of a charged surface into ring elements in case of axisymmetric distribution of the charge density

Выводы

1. Изложенный метод является эффективным средством решения обратной задачи преобразования распределения потенциала в распределение поверхностной плотности заряда.

2. Точность расчёта растёт с увеличением степени мелкости разбиения заряженной поверхности на элементарные заряженные площадки. Параллельно увеличиваются затраты времени на форми-

рование матрицы весовых коэффициентов, что требует выбора оптимального числа заряженных элементов.

3. Для решения возникающих систем линейных уравнений необходимо применять итеративные решатели, дающие, как правило, точность не ниже 10^{-2} .

4. При наличии осесимметричного распределения поверхностной плотности заряда в качестве заряженных элементов следует использовать кольцевые сегменты.

Список литературы

1. Кондратюк А.Д. Электретные свойства диэлектриков // Ярославский педагогический вестник. 1998. № 3. С. 109-112.

2. Бойцов В.Г., Рычков Д.А. Полимерные электреты в инновационных технологиях // Известия РГПУ. Естественные и точные науки: Научный журнал. 2002. № 2(4). С. 118-132.

3. Smili K., Herous L. Corona Charging and Charge Decay on Polyethylene Terephthalate Films (PET) // *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*. 2019. Vol. 67. No. 3. P. 81-90. ISSN 1582-5175.

4. Кушелев В.П., Орлов Г.Г., Сорокин Ю.Г. Охрана труда в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: учебник для вузов. М.: Химия, 1983. 472 с.

5. Noras M.A. Non-Contact Surface Charge/Voltage Measurements // *Capacitive Probe — Principle of Operation*. 2002. No. 3001. P. 1-8.

6. Takuma T., Yashima M., Kawamoto T. Principle of Surface Charge Measurement for Thick Insulating Specimens // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1998. Vol. 5. No. 4. P. 497-504. doi: 10.1109/94.708264.

7. MATLAB: Iterative Methods for Linear Systems. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/iterative-methods-for-linear-systems.html> (дата обращения 01.12.2021).

Dielectrics]. *Yaroslavskii pedagogicheskii vestnik — Yaroslavl Pedagogical Bulletin*, 1998, No. 3, pp. 109-112. [in Russian].

2. Boitsov V.G., Rychkov D.A. Polimernye elektrety v innovatsionnykh tekhnologiyakh [Polymer Electrets in Innovative Technologies]. *Izvestiya RGPU. Estestvennyye i tochnyye nauki: Nauchnyi zhurnal — Izvestiya RSPU. Natural and Exact Sciences: Scientific Journal*, 2002, No. 2(4), pp. 118-132. [in Russian].

3. Smili K., Herous L. Corona Charging and Charge Decay on Polyethylene Terephthalate Films (PET). *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2019, Vol. 67, No. 3, pp. 81-90. ISSN 1582-5175.

4. Kuselev V.P., Orlov G.G., Sorokin Yu.G. *Okhrana truda v neftepererabatyvayushchei i neftekhimicheskoi promyshlennosti: uchebnik dlya vuzov* [Labor Protection in Oil Refining and Petrochemical Industry: Textbook for Universities]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 472 p. [in Russian].

5. Noras M.A. Non-Contact Surface Charge/Voltage Measurements. *Capacitive Probe — Principle of Operation*, 2002, No. 3001, pp. 1-8.

6. Takuma T., Yashima M., Kawamoto T. Principle of Surface Charge Measurement for Thick Insulating Specimens. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, Vol. 5, No. 4, pp. 497-504. doi: 10.1109/94.708264.

7. MATLAB: Iterative Methods for Linear Systems. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/iterative-methods-for-linear-systems.html> (accessed 01.12.2021).

References

1. Kondratyuk A.D. Elektretnye svoystva dielektrikov [Electret Properties of



Рузил Ахнафович Сафиуллин
Ruzil A. Safiullin

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технических дисциплин, Башкирский государственный университет, филиал, Нефтекамск, Россия



Ильгиз Флюсович Янгиров
Ilgiz F. Yangirov

доктор технических наук, доцент кафедры электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

УДК 621.313.13

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-49-62

КОНИЧЕСКИЙ СПИРАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ВИБРАЦИИ С УЛУЧШЕННЫМИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Актуальность

В настоящее время для повышения интенсивности и эффективности технологических процессов извлечения исходного сырья и полуфабрикатов (гранулирования, сушки, растворения и выщелачивания, экстрагирования, адсорбционного разделения газов и т.д.) широко используется вибрация деталей различных машин. В других случаях, наоборот, необходимо устранить вредное влияние вибрации на производственные процессы для замедления перемещений узлов и механизмов, гашения колебаний различными способами (управляемые амортизационные системы, электромагнитные демпферы, виброзащита и др.). Для активного управления колебательными процессами, происходящими в данных машинах, используются непосредственно присоединенные к ним вибродатчики. Основным элементом различных вибродатчиков является чувствительный элемент, преобразующий механическое движение в электромагнитный сигнал, который позволяет в дальнейшем ее обрабатывать. В качестве чувствительных элементов электромеханических преобразователей вибродатчиков для измерения малых колебаний поверхностей объектов вибрации используются классические тензометрические, магнитоэлектрические, магнитострикционные, пьезоэлектрические и частотно-импульсные элементы. Проектирование и создание новых вибродатчиков с улучшенными метрологическими характеристиками являются актуальными задачами электротехники и электромеханики. В работе получены основные формулы и графики экспериментальных выходных данных метрологических характеристик новой конструкции вибродатчика.

Цель исследования

Исследовать метрологические характеристики новой конструкции конического спирального датчика вибрации.

Методы исследования

Для определения колебательных процессов используются методы теории электрических цепей, магнитные поля, методы математического анализа и теория электрических колебательных процессов в (биения, индукция и т.д.) сложных контурах.

Результаты

Разработана новая конструкция конического спирального датчика вибрации и исследованы его метрологические характеристики.

Ключевые слова: вибрация, соленоид, биения, лайнер, резонанс

CONICAL SPIRAL VIBRATION SENSOR WITH IMPROVED METROLOGICAL CHARACTERISTICS

Relevance

Currently, vibration of parts of various machines is widely used to increase the intensity and efficiency of technological processes for extracting raw materials and semi-finished products (granulating, drying, dissolving and leaching, extracting, adsorption gas separation, etc.). In other cases, on the contrary, it is necessary to eliminate the harmful effect of vibration on production processes to slow down the movement of units and mechanisms, to damp vibrations in various ways (controlled shock absorption systems, electromagnetic dampers, vibration protection, etc.). For active control of oscillatory processes occurring in these machines, vibration sensors directly connected to them are used. The main element of various vibration sensors is a sensitive element that converts mechanical movement into an electromagnetic signal, which allows it to be further processed. As sensitive elements of electromechanical transducers of vibration sensors for measuring small vibrations of the surfaces of vibration objects, classical strain gauge, magnetoelectric, magnetostrictive, piezoelectric and frequency-pulse elements are used. The design and creation of new vibration sensors with improved metrological characteristics is an urgent task for electrical engineering and electromechanics. In this work, the basic formulas and graphs of the experimental output data of the metrological characteristics of the new design of the vibration sensor are obtained.

Aim of research

To investigate the metrological characteristics of a new design of a conical spiral vibration sensor.

Research methods

To determine the oscillatory processes, the methods of the theory of electrical circuits, magnetic fields, methods of mathematical analysis and the theory of electrical oscillatory processes in (beats, induction, etc.) folded circuits are used.

Results

A new design of a conical spiral vibration sensor has been developed and its metrological characteristics have been investigated.

Keywords: vibration, solenoid, beats, liner, resonance

Введение

Практически во всех отраслях народного хозяйства страны в системах управления и автоматики широко эксплуатируются электромеханические преобразователи энергии (ЭМП). ЭМП используются в качестве измерительных, преобразовательных и исполнительных элементов в системах управления и автоматики раз-

личных механических машин и электрооборудования электроэнергетических систем. Для повышения интенсивности и эффективности технологических процессов производства (гранулирования, сушки, растворения и выщелачивания, экстрагирования, адсорбционного разделения газов и т.д.) в настоящее время активно используется вибрация. В дру-

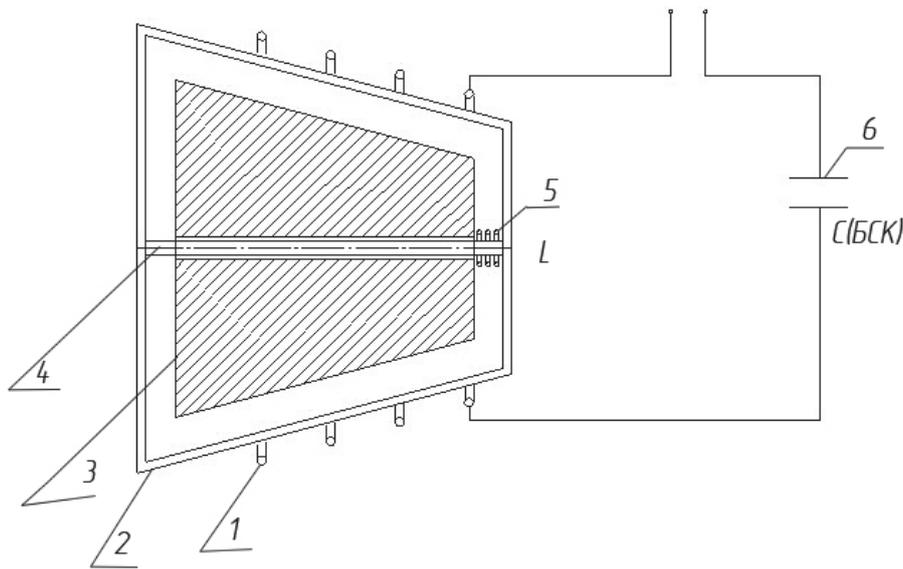
гих, наоборот, необходимо устранить вредное влияние вибрации на производственные процессы различными способами (управляемые амортизационные системы, виброзащита и др.). Кроме того, вибрация может использоваться для получения информации о состоянии технических объектов (машин) и процессов, происходящих в них [1].

В системах управления вибрационными процессами широко используются вращающиеся ЭМП с механическими преобразователями в возвратно-поступательное движение (электроприводы). Однако в последнее время растет интерес к линейным ЭМП, в том числе возвратно-поступательного движения. В наши дни существуют различные типы ЭМП с различными чувствительными элементами [2–6]. Ряд особенностей электромеханических преобразователей возвратно-поступательного движения (краевые эффекты, движения с изменяющимся

ускорением) не позволяет применять непосредственно общую теорию вращающихся ЭМП для их анализа и синтеза. В данной работе исследуется вибрационный электромеханический преобразователь (ВЭМП) с помощью традиционных подходов общей теории электромеханического преобразования энергии. Разработка методов проектирования и создание их математических моделей является актуальной научно-технической проблемой электротехники и электромеханики [7–10].

Постановка задачи исследования

Для активного управления колебательными процессами, происходящими в различных машинах, используются непосредственно присоединенные к ним вибродатчики [10]. В качестве объекта исследования представим на рисунке 1 оригинальную конструкцию ВЭМП [2].



1 — коническая спиральная пружина; 2 — металлический лайнер; 3 — инерционный магнитопровод; 4 — ось магнитопровода; 5 — демферная цилиндрическая пружина; 6 — блок статических конденсаторов

1 — conical spiral spring; 2 — metal liner; 3 — inertial magnetic circuit; 4 — axis of the magnetic circuit; 5 — damper cylindrical spring; 6 — block of static capacitors

Рисунок 1. Спиральный управляемый датчик вибрации

Figure 1. Spiral driven vibration sensor

Исходный ВЭМП состоит из спиральной изолированной конической электропроводящей пружины (1), продетой на металлический лайнер (2) в виде конической трубки. Внутри магнитопровода находится инерционная масса (3), имеющая возможность перемещаться внутри лайнера по оси (4). Лайнер подкреплён цилиндрической пружиной (5), работающей на ограничение движения конического магнитопровода (ферромагнитного инерционного элемента). В электрическую цепь подключается последовательно блок статических конденсаторов (БСК) (6). Пружина подключена к управляемому источнику переменного тока $U_{УПР}$. Согласно поставленной цели задачи, необходимо исследовать метрологические характеристики данной ВЭМП.

Принцип работы ВЭМП

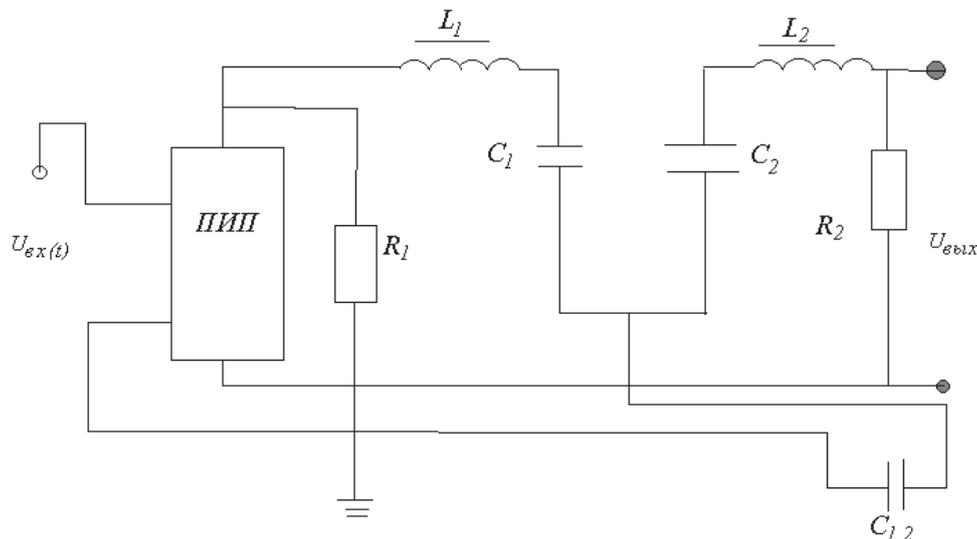
Принцип действия предлагаемого спирального ВЭМП основан на явлении резонанса между спиральным реактором (1), обладающим индуктивностью L , и

блоком статических конденсаторов (6) со связной электроёмкостью C_{12} . Источник переменного тока сжимает и растягивает пружину, тем самым инерционный элемент (3) будет двигаться вдоль оси, изменяя свою индуктивность. Вибрационная система настраивается на резонанс в электрическом контуре, обеспечивая переток реактивной мощности, и тем самым повышая $\cos\varphi$ электрической цепи [11–13].

На рисунке 2 представлена электрическая схема подключения ВЭМП к источнику питания.

Особенностью функционирования ВЭМП является настройка контуров на возбуждение электрического биения пружины (5) через разомкнутую часть магнитопровода (2), которое и фиксируется на выходе счетчика $R_{\text{вых}}$ [12].

Целью работы является анализ процессов работы вибродатчика и на основе явления возникновения электрического биения получение необходимой информации.



ПИП — переменный источник питания с напряжением $U_{\text{вх}}(t)$; R_1, R_2 — резисторы; C_1, C_2 — электроёмкости; L_1, L_2 — индуктивности; C_{12} — БСК; $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение

ПИП — alternating voltage source with $U_{\text{вх}}(t)$; R_1, R_2 — resistors; C_1, C_2 — electrical capacity; L_1, L_2 — inductors; C_{12} — BSC; $U_{\text{вых}}$ — output voltage

Рисунок 2. Электрическая схема подключения ВЭМП

Figure 2. Electrical diagram of VEMT connection

Решение задачи

При решении и анализе теоретических исследований данной работы были использованы методы теории электрических цепей, магнитные поля, методы математического анализа и теория электрических колебательных процессов (биения, индукция и т.д.) в сложных контурах [2, 12, 13].

Колебательные процессы, протекающие в отдельных частях сложных механических и электромеханических систем, взаимосвязаны между собой. Согласно рисунку 2 данный ВЭМП представляет собой вибропреобразовательное устройство, состоящее из двух электрических контуров со слабой емкостной связью, одинаковыми емкостями и индуктивностями. Аналогом данного процесса является колебательный процесс в механической системе, состоящей из двух математических маятников одинаковой длины, связанных пружиной с небольшим коэффициентом жесткости [12].

Для исследования метрологических характеристик ВЭМП представим ее электрическую схему замещения в виде, представленном на рисунке 3.

Математическая модель

Согласно схеме замещения (рисунок 3), в соответствии со вторым правилом Кирхгофа для левого и правого контуров замкнутой электрической цепи справедливы следующие соотношения для изменения токов [2, 7]:

$$L \frac{dI_1}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0, \quad (1)$$

$$L \frac{dI_2}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0. \quad (2)$$

Поскольку $I_1 = dQ_1/dt$ и $I_2 = dQ_2/dt$, то получим дифференциальные уравнения изменения зарядов в виде

$$L \frac{d^2Q_1}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}, \quad (3)$$

$$L \frac{d^2Q_2}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}. \quad (4)$$

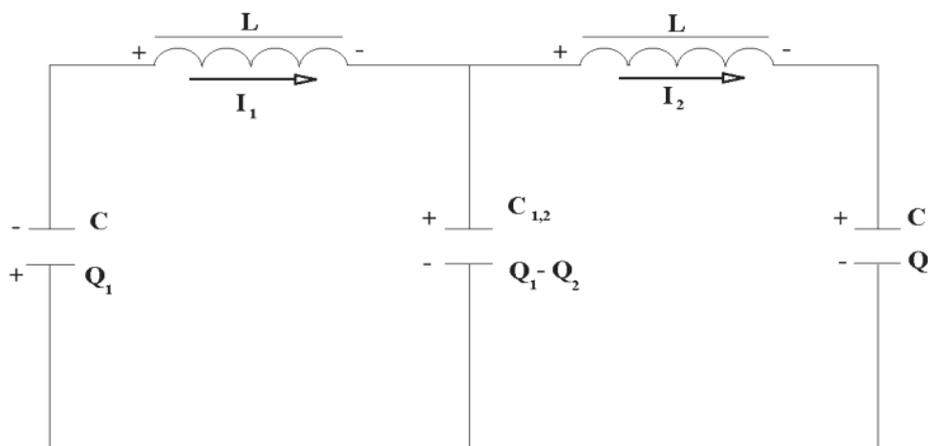
Неоднородные дифференциальные уравнения (3) и (4) можно упростить путем их сложения и вычитания. При этом получается выражение вида [4]:

$$L \frac{d^2(Q_1 + Q_2)}{dt^2} = -\frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}}, \quad (5)$$

$$L \frac{d^2(Q_1 - Q_2)}{dt^2} = -\left(\frac{1}{C} + \frac{2}{C_{12}}\right)(Q_1 - Q_2). \quad (6)$$

Результатом решения уравнений (5) и (6) являются выражения вида [2]:

$$Q_1 + Q_2 = (Q_{10} + Q_{20})\cos\omega + t, \quad (7)$$



Q_i, I_i — заряды и токи в электрической цепи

Q_i, I_i — charges and currents in an electric circuit

Рисунок 3. Схема замещения ВЭМП

Figure 3. Equivalent circuit of VEMT

$$Q_1 - Q_2 = (Q_{10} - Q_{20})\cos\omega - t. \quad (8)$$

Здесь Q_{10} , Кл и Q_{20} , Кл — заряды на правой и левой пластинах конденсаторов при $t = 0$, с. Угловая частота $\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, рад/с, соответствует угловой частоте свободных электрических колебаний в контуре, состоящем из емкости C и индуктивности L . Угловая частота $\omega^- = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_{12}} \right)}$ немного превышает угловую частоту ω^+ .

Анализ полученных решений (7) и (8) показывает, как сумма $Q_1 + Q_2$, так и разность $Q_1 - Q_2$ на емкостях C_i в левом и правом контурах изменяются со временем по закону косинуса с постоянными амплитудами $Q_{10} + Q_{20}$ и $Q_{10} - Q_{20}$ соответственно. Сложение и вычитание решений (7) и (8) позволяют установить характер изменения во времени зарядов на емкостях C_i , $i=1,2$ в левом и правом контурах.

Окончательно для зарядов получим выражения вида [7]:

$$Q_1 = \frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20})\cos(\omega^+t) + \frac{1}{2}(Q_{10} - Q_{20})\cos(\omega^-t), \quad (9)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20})\cos(\omega^+t) + \frac{1}{2}(Q_{10} - Q_{20})\cos(\omega^-t). \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) следует, что в случае равенства начальных зарядов Q_{10} и Q_{20} на емкостях C_i в левом и правом электрических контурах будут протекать одинаково направленные токи I_1, I_2 с постоянными амплитудами $\frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20})$ и угловой частотой ω^+ . При этом в обоих контурах на емкостях C_i будут происходить синфазные колебания величины заряда Q . Если же заряды Q_{10} и Q_{20} в начальный момент времени одинаковы по величине, но имеют противоположные знаки, т.е. ($Q_{10} = -Q_{20}$), то в левом и правом контурах происходят антифазные колебания величин зарядов Q_1 и Q_2 , одинаковых по величине, но противоположных по знаку.

Как видно из вышесказанного, при синфазных и антифазных колебаниях амплитудные значения величин зарядов на емкостях C_i остаются постоянными. Такие колебания в теории электромагнетизма называются нормальными модами колебаний системы связанных осцилляторов [12].

Произвольный колебательный процесс в двух электрических контурах со слабой емкостной связью можно рассматривать как суперпозицию двух нормальных мод колебаний. Рассмотрим последнее утверждение применительно к случаю, когда в момент времени $t = 0$ с заряд на емкости C_2 в правом контуре равен нулю, т.е. $Q_{20} = 0$. Тогда колебания зарядов Q_1 и Q_2 на емкостях C_1 в левом и правом электрических контурах, являющиеся нормальными модами колебаний, будут описываться формулами

$$Q_1 = \frac{1}{2}Q_{10}[\cos(\omega^+t) + \cos(\omega^-t)], \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2}Q_{10}[\cos(\omega^+t) - \cos(\omega^-t)]. \quad (12)$$

Преобразуя правые части данных формул с помощью известных тригонометрических соотношений, получим окончательные выражения зависимости зарядов от времени

$$Q_1 = Q_{10} \left[\cos \frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t \cdot \cos \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \right], \quad (13)$$

$$Q_2 = Q_{10} \left[\sin \frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t \cdot \sin \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \right], \quad (14)$$

описывающие периодические колебательные процессы, протекающие с угловой частотой $\omega = \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)$ и быстро изменяющейся во времени амплитудой. Такие переменные, быстроменяющиеся колебательные процессы называются биениями [12–14], их можно наглядно увидеть, подключив к данному электрическому контуру осциллограф. Кривые биений, согласно формулам (13) и (14), представлены на рисунке 4, *a* и *b*.

Возникновение биений в электрическом контуре ВЭМП можно объяснить следующим образом. Четная мода коле-

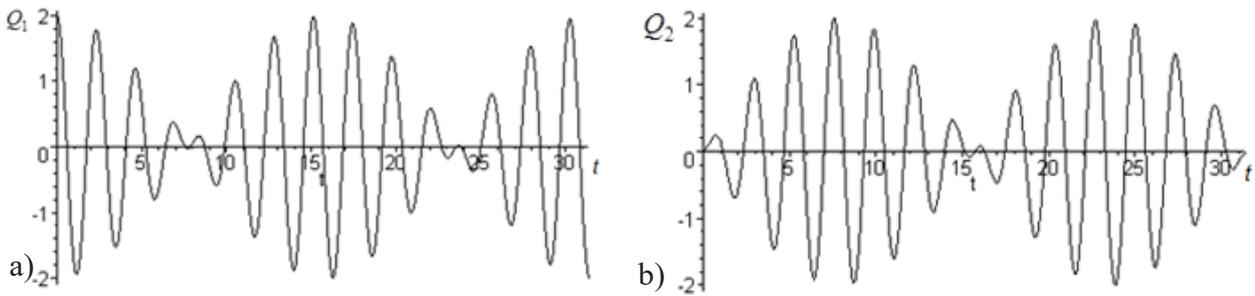


Рисунок 4. Осциллограммы выходного сигнала ВЭМП

Figure 4. Oscillograms of the VEMT output signal

баний зарядов на емкостях C_i в левом и правом контурах соответствует синфазным колебаниям с угловой частотой ω^+ . Емкость C_{12} при этом незаряжена, и колебания зарядов Q_1 и Q_2 аналогичны свободным колебаниям зарядов на емкости в замкнутом электрическом контуре, состоящем из емкости C и индуктивности L . Нечетные моды колебаний зарядов Q_1 и Q_2 на емкостях C_i в левом и правом контурах происходят с угловой частотой ω^- . Поскольку угловая частота ω^- несколько больше угловой частоты ω^+ , то антифазные колебания происходят с несколько большей частотой. Это объясняется тем, что при антифазных колебаниях емкость C_{12} оказывается заряженной.

Наложение четной и нечетной мод электромагнитных колебаний есть фактическое наложение колебаний с близкими угловыми частотами, результатом которых и являются биения [15].

В данном случае в силу того, что в начальный момент времени $t = 0$, с, емкость C_2 в правом контуре незаряжена, синфазные и антифазные колебания происходят со сдвигом по фазе, равным $\frac{\pi}{2}$. Вследствие этого в тот момент времени, когда заряд на емкости C_1 в левом контуре равен нулю, соответствующий заряд на емкости C_2 в правом контуре максимален, и наоборот (см. рисунок 2).

С энергетической точки зрения колебательный процесс в двух электрических контурах, связанных слабой емкостной

связью, при условии, что в момент времени $t = 0$, с, заряд на емкости C_2 в правом контуре равен нулю, протекает следующим образом. Первоначально вся электрическая энергия сосредоточена в левом контуре. В процессе колебаний происходит перекачка энергии из левого контура через связанную емкость C_{12} в правый контур. После того как процесс перекачки энергии завершается, начинается обратный процесс и т.д.

Период обмена энергией между левым и правым контурами определяется формулой [12, 15]

$$\frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-) \cdot t_{\text{ОБМ}} = \pi. \quad (15)$$

Откуда можно получить выражение для времени обмена энергией

$$t_{\text{ОБМ}} = \frac{2\pi}{(\omega^+ - \omega^-)}. \quad (16)$$

Угловая частота обменного процесса, равная угловой частоте биений, будет равна

$$\omega_{\text{ОБМ}} = \frac{2\pi}{t_{\text{ОБМ}}} = \omega^+ - \omega^-. \quad (17)$$

Описанная выше теория используется для математического описания колебательных процессов в случае слабой емкостной связи между электрическими контурами ВЭМП. Окончательно для частоты обменного процесса получим выражение [12]:

$$\omega_{\text{ОБМ}} = \frac{C_i}{C_{12}} \sqrt{\frac{1}{L_i C_i}} = \frac{C_i}{C_{12}} \omega.$$

Из последней формулы следует, что частотой обменного процесса, т.е. угло-

вой частотой биения в системе, состоящей из двух электрических контуров, связанных слабой емкостной связью, и угловой частотой свободных колебаний в контуре, состоящем из емкости C и индуктивности L , существует простая связь. Таким образом, изменяя величины L , C и C_{12} можно изучать процесс обмена энергией между двумя электрическими контурами, связанными слабой емкостной связью, добываясь минимального значения $\omega_{\text{ОБМ}} = \omega$ биений, что является важной практической задачей в приборостроении.

Поскольку система двух связанных контуров имеет две нормальные частоты, то при подключении внешней ЭДС она должна иметь две резонансные частоты. Резонанс наступает, когда частота внешней ЭДС будет близка к нормальной частоте системы. Подключаем последовательно к левому контуру ПИП — генератор переменного тока (см. рисунок 2), и, используя второе правило Кирхгофа, получим выражения для двух резонансных частот

$$\omega_{\text{РЕЗ},1} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \omega_{\text{РЕЗ},2} = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{2C}{C_{12}}}. \quad (18)$$

Если сравнить (18) для резонансных частот с выражениями для ω^+ и ω^- нормальных частот, то можно сделать важный вывод: резонансные частоты совпадают с нормальными частотами системы. При этом для двух одинаковых контуров с емкостной связью первая резонансная частота совпадает не только с первой нормальной, но и с собственной частотой одиночного колебательного контура ω_0 .

Наряду с емкостной связью в электрической цепи ВЭМП возможна индуктивная связь контуров посредством общего магнитного потока. В этом случае, с учетом материальных физических характеристик конической спиральной пружины, можно написать уравнение ее движения в виде [16]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\sigma\delta\dot{x} + \omega_0^2 x &= \\ &= u(1) \cdot \left\{ \frac{I_m^2}{2} \cdot H \cdot \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \right\}, \quad (19) \\ H &= \left(\sum \frac{dL_{0w}}{dr_{0w}} + 2 \sum \sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \\ &+ \left(\sum K_{Lw} + 2 \sum \sum K_{Mw,n} \right), \end{aligned}$$

где x — смещения, м;

μ , δ — коэффициенты трения и демпфирования;

$u(1)$ — скорость колебаний пружины, м/с;

r_{0w} — радиусы сжатой и растянутой спирали, м;

w — число витков;

I_m — амплитуда силы тока;

L_{0w} — индуктивность спирали, Гн;

M_{0w} — электромеханический момент спирали, Н·м [2].

Решение данного уравнения для упругих колебаний находится как

$$x(r) = \frac{u_w(1)}{M_{\text{пп}}\omega_0^2} \cdot \frac{I_m^2}{4Q} \cdot H \cdot \cos(2\omega t + \varphi_2), \quad (20)$$

здесь приведенная масса системы равна

$$M_{\text{пп}} = 4\pi^2 M \sum_{w=1}^N f_w^2(\alpha) + \sum_{w=1}^N m_w f_w^2(\alpha), \quad (21)$$

где $\gamma_w = \frac{r_w}{R_1}$ — относительный радиус;

R_1 — радиус первого витка, м;

$l_0 = \omega_0 \sqrt{\rho k} \cdot R_1$ — витковый коэффициент [5];

$$\alpha = l_0 \gamma_w;$$

m_w — масса w -го витка, кг;

$$Q = \sqrt{(1 - 4q^2) + 16D^2 q^2};$$

$D = \frac{\sigma\delta}{\omega_0}$ — относительная степень успокоения (демпфирования);

M — физическая масса спирали, кг;

N — число витков;

$k = (1 - \mu^2)/E$ — приведенный модуль упругости [16].

Решая неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка (19), получим формулу для расчета собственной частоты чувствительного элемента упругой системы ВЭМП [12, 16]

$$\omega_0^2 = \frac{C_1}{M_{\text{пп}}} = \frac{hb}{2\pi^2 R_1 k} \cdot \frac{B}{C}. \quad (22)$$

Здесь введены обозначения:

$$B = \sum_{w=1}^N \left[l_0 \cdot \frac{J_0(\alpha) + AN_0(\alpha)}{J_1(\beta) + AN_1(\beta)} - \frac{1-\mu^2}{\gamma_w} f_w(\alpha) \right],$$

$$C = 4\pi^2 M \sum_{w=1}^N f_w^2(\alpha) + \sum_{w=1}^N m_w f_w^2(\alpha),$$

где $J_0(\alpha), J_1(\beta), N_0(\alpha), N_1(\beta)$ — функции Бесселя первого и второго рода;

$$\beta = \frac{l_0 R_0}{R_1}.$$

При этом приведенная жесткость упругой системы ВЭМП будет равна

$$C_1 = \frac{hb}{2\pi^2 R_1 k} \cdot \frac{B}{C} \cdot f_w(\alpha), \quad (23)$$

где h, b — размеры поперечного сечения пружины;

R_0 — наружный радиус конической спирали.

Тогда величина контролируемого ускорения будет иметь вид:

$$A_{\text{ВЫХ}} = q^2 \cdot u_w(1) \frac{4I_m^2}{Q} \cdot \cos(2\omega t + \varphi_0),$$

где ω — частота возмущения;

$q = \omega/\omega_0$ — относительная частота.

Исходя из закона Био-Савара — Лапласа определяем взаимосвязь силы тока (I, A) и магнитной индукции ($B, Tл$)

$$I_m = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 B_0}{\sqrt{P}},$$

$$P = \sum r_{0w}^2 + \omega^2 (\sum L_{0w} + 2 \sum \sum M_{0w,n}^2).$$

Окончательно, выходная метрологическая характеристика ВЭМП примет вид:

$$A_{\text{ВЫХ}} = \frac{\sqrt{2}}{8} u_w(1) \frac{\mu_0^2 B_0^2}{P} \cdot \frac{4q^2}{Q} \cdot A_w, \quad (24)$$

где значения постоянной A_w материальной физической величины для спиральной пружины круглого (1 образец) и прямоугольного (2 образец) сечений рассчитываются и уточняются из эксперимента [14–16].

Экспериментальная часть

На рисунке 5, a, b приведены огибающие (сплошные линии) экспериментальных осциллограмм производных тока для двух образцов исполнения материальных параметров спиральных ВЭМП, работающих на емкостную нагрузку. Производная тока выбрана как величина, характеризующая процессы в ПИП, и как часто измеряемая величина в подобных экспериментах. Производные тока и времени представлены на рисунке 5 в безразмерном виде.

Оба варианта исполнения ВЭМП имеют одинаковую конструкцию и геометрические параметры соленоида. Оба варианта ВЭМП содержат соленоид диаметром 90 мм и имеют по 9 витков изолированного провода. Варианты исполнения электрической цепи различались между собой только толщиной изоляции провода

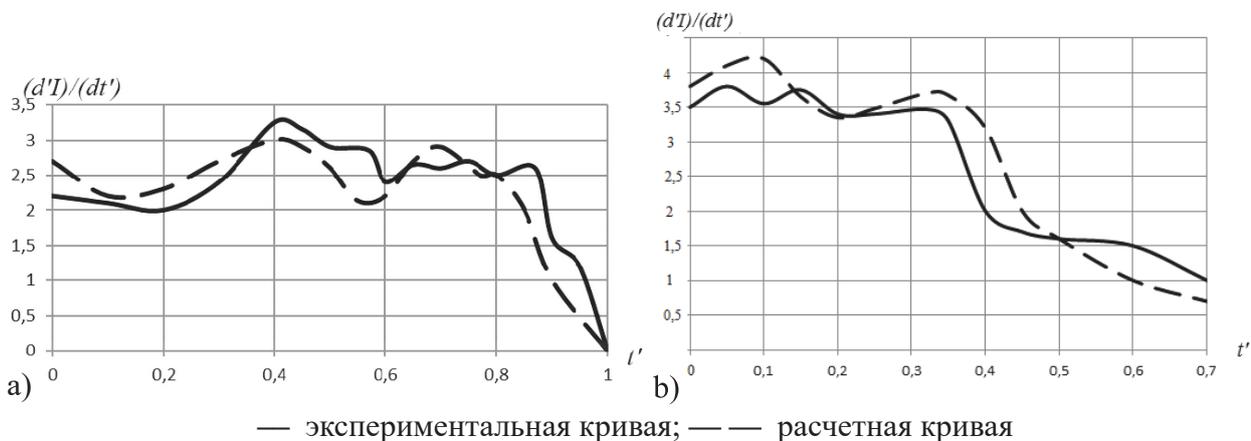


Рисунок 5. Зависимость амплитуды производной тока от времени для ВЭМП первого и второго образцов исполнения

Figure 5. Dependence of the amplitude of the current derivative on time for the VEMT of the first and second samples of execution

соленоида и начальным напряжением конденсатора. Фторопластовая изоляция в ВЭМП первого варианта (рисунок 5, *a*) пробивалась в среднем при импульсном (время действия порядка микросекунды) напряжении $3,5 \cdot 10^3$ В. Фторопластовая изоляция второго варианта ВЭМП (рисунок 4, *b*) пробивалась при импульсном напряжении $28 \cdot 10^3$ В. В начальный момент времени ($t = 0, c$) конденсатор ВЭМП первого варианта был заряжен до напряжения $16 \cdot 10^3$ В, а конденсатор второго варианта — до напряжения $30 \cdot 10^3$ В. На тех же рисунках приведены огибающие (пунктирные линии) зависимости производной тока от времени, рассчитанные по формулам (20)–(24).

Из сравнения расчетных и экспериментальных данных огибающих видно, что предложенная математическая модель качественно интерпретирует вибрационный процесс при эксплуатации реального ВЭМП. Отличие экспериментальных огибающих осциллограмм производной тока от расчетных (см. рисунок 5, *a, b*) на

конечных участках кривых может быть объяснено наличием массивного фланца, к которому крепятся лайнер и соленоид. Наличие близко расположенного фланца способно исказить картину замыкания последних витков соленоида [11, 16].

На рисунке 6 представлены кривые выходного электрического сигнала ВЭМП от частоты входного воздействия при различных степенях успокоения D в относительных единицах измерения. Коэффициент демпфирования есть безразмерная величина, описывающая затухание колебаний в электромеханической системе со временем после возмущения.

Кривые рисунка 6 при различных значениях D показывают, что с уменьшением степени успокоения D возрастает крутизна преобразовательной характеристики ВЭМП-датчика со спиральным чувствительным элементом, а при $D \rightarrow 0$ она максимальна.

На рисунке 7 представлены преобразовательные кривые ВЭМП для двух образцов материалов спиралей.

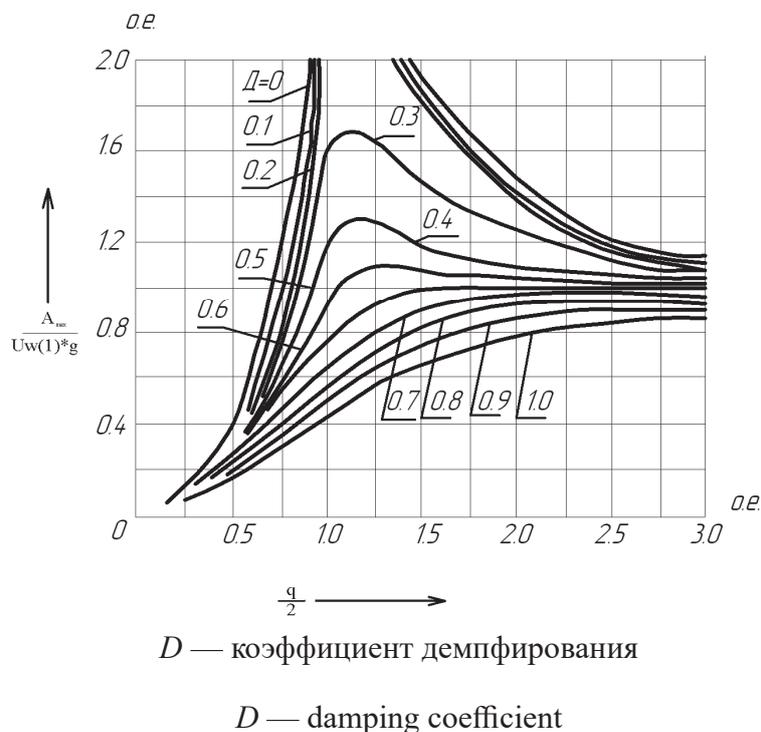


Рисунок 6. Выходной сигнал ВЭМП

Figure 6. VEMT output signal

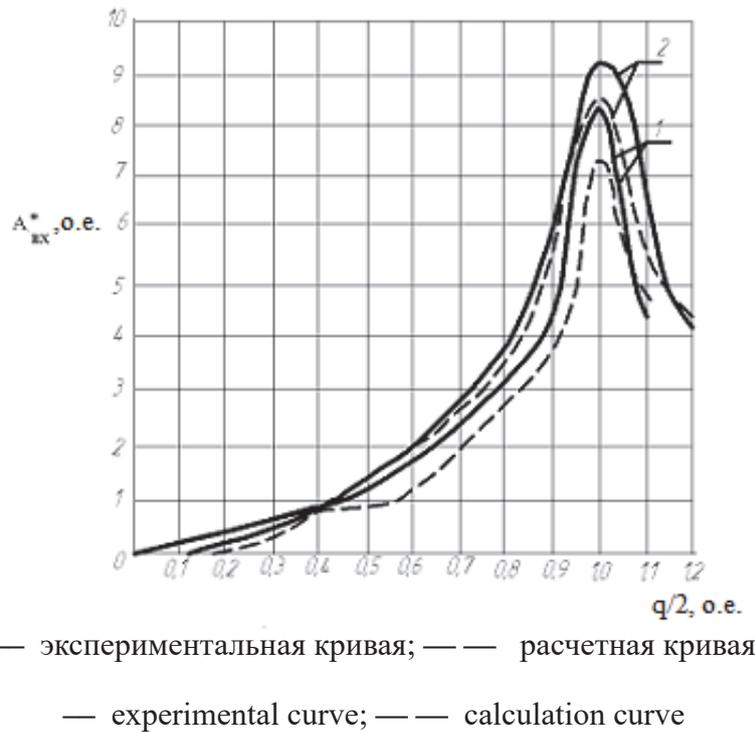


Рисунок 7. Преобразовательные характеристики ВЭМП

Figure 7. Conversion characteristics of VEMT

Как видно из рисунка 7, преобразовательные функции ВЭМП могут отличаться от расчетных на 4 %, что необходимо учитывать при проектировании и тестировании информационно-измерительных систем, используемых для исследований и контроля объектов, подвергнутых вибрации [17–20].

При этом следует отметить, что использование математической модели, аналогичной рассмотренной в настоящей статье, но не учитывающей наличие электрической изоляции проводов, дает отгибающие производной тока, имеющие не более одного экстремума, что противоречит наблюдаемым в экспериментах картинам. Эта особенность модели, не учитывающая наличие изоляции проводов соленоида, не может быть скомпенсирована введением эмпирических дополнительных коэффициентов [19, 20].

Полученные соотношения дают возможность провести анализ влияния всех параметров ВЭМП по отдельности и в их взаимосвязи на его преобразовательную

характеристику, а также рассчитывать ВЭМП как систему взаимосвязанных элементов в автоматических системах управления.

Выводы

1. Разработана оригинальная конструкция ВЭМП с высокой чувствительностью, крутизной преобразовательной характеристики и с возможностью его регулирования.

2. Создана математическая модель данной конструкции, которая на основе принципиально новых концептуальных подходов позволяет вывести аналитические зависимости, в соответствии с которыми, корректируя определенные параметры ВЭМП, можно получить максимальные значения частот биений, соответствующих избирательности ВЭМП.

3. Данная разработка является оригинальной и может найти свое применение в приборостроении и машиностроении благодаря своим специфическим метрологическим характеристикам.

Список источников

1. Алейников А.Ф., Гридчин В.А., Цапенко М.П. Датчики. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 176 с.
2. Янгиров И.Ф. Датчик перемещений и ускорений // Изобретатели машиностроению. 2002. № 1. С. 1-8.
3. Жданов А.С. Влияние поперечной чувствительности пьезоакселерометров на точность измерения вибрации // Приборы. 2017. № 4 (202). С. 1-6.
4. Каримли Т. И. Двухканальный пьезоэлектрический датчик вибрации и линейного ускорения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. № 1(52). С. 69-74.
5. Девятисильный А.С. Измерение линейных ускорений с использованием оптического излучения // Измерительная техника. 2004. № 10. С. 31-32.
6. Сафиуллин Р.А., Галеев Р.Ф., Мухаметзянов И.А. Инженерный расчёт характеристик электромеханического преобразователя с композитным вторичным элементом // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: матер. IX Междунар. науч.-техн. конф. Благовещенск: РИО АмГУ, 2019. С. 71-76.
7. Terlecka G., Vilumsone A., Blums J., Gornevs I. The Structure of the Electromechanical Converter and Its Integration in Apparel // Scientific Journal of Riga Technical University. 2011. Vol. 6. P. 123-128.
8. Сафиуллин Р.А. Численный расчёт характеристик композитного электромеханического датчика вибраций // Техника и технология: новые перспективы развития: матер. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. М.: Изд-во «Спутник+», 2016. С. 23-31.
9. Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В. Методика инженерного расчёта электропружинного привода // Электротехнические комплексы и системы: матер. Всеросс. науч.-практ. конф., посвящённой 110-летию А.М. Бамдаса. Уфа: РИК УГАТУ, 2015. С. 278-284.
10. Safiullin R.A. Vibration Diagnostics of Induction Motors // Proceedings of 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS2021), Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, November 16-18, 2021. 2021. P. 228-232.
11. Третьяков Д.В. Влияние изоляции проводов спирального магнитокумулятивного генератора на его функционирование // Электричество. 2001. № 6. С. 49-55.
12. Бычков Ю.А. Справочник по основам теоретической электротехники: учеб. пособие. СПб.: Изд-во «Лань», 2012. 368 с.
13. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А., Максудов Д.В. Пружинный преобразователь линейных ускорений // Технология машиностроения. 2021. № 1. С. 43-48.
14. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for Processing Signals and Data from Electrical Machine // 2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020), National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Russia, March 12-14, 2020. 2020. P. 1-5.
15. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: В 3 т. 4-е изд. СПб.: Питер, 2003. Т. 1. 463 с.
16. Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф., Мухаметшин А.В. Модель спирального электромеханического преобразователя с учетом основных механических и электрических параметров // Технология машиностроения. 2020. № 11. С. 64-67.
17. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A. e.a. High-Efficiency Impact Electromechanical Converter. Russian Electrical Engineering. 2011. No. 82. P. 104.
18. Cheng Y., Cui S., Song L., Chan C.C. The Study of the Operation Modes and Control Strategies of an Advanced Electromechanical Converter for Automobiles // IEEE Transactions on Magnetics. Jan. 2007. Vol. 43. No. 1. P. 430-433.
19. Kuimov D., Minkin M. The Electromechanical Converter in the Systems of Desulfurisation of Crude Oil // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2017. Vol. 132. P. 3-16.
20. Kulah H., Chae J., Yazdi N., Najafi K.A. Multi-Step Electromechanical

Converter for Micro-Capacitive Accelerometers // IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2003. Digest of Technical Papers. ISSCC. 2013. Vol. 1. P. 202-488.

References

1. Aleinikov A.F., Gridchin V.A., Tsapenko M.P. *Datchiki* [Sensors]. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2011. 176 p. [in Russian].
2. Yangirov I.F. Datchik peremeshchenii i uskoreniy [Displacement and Acceleration Sensor]. *Izobretateli mashinostroeniya — Inventors for Mechanical Engineering*, 2002, No. 1, pp. 1-8. [in Russian].
3. Zhdanov A.S. Vliyanie poperechnoi chuvstvitel'nosti p'ezoakselerometrov na tochnost' izmereniya vibratsii [Influence of Lateral Sensitivity of Piezoaccelerometers on Vibration Measurement Accuracy]. *Pribory — Pribory*, 2017, No. 4 (202), pp. 1-6. [in Russian].
4. Karimli T.I. Dvukhkanal'nyi p'ezoelektricheskii datchik vibratsii i lineinogo uskoreniya [Two-Channel Piezoelectric Vibration and Linear Acceleration Sensor]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya — Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering*, 2016, No. 1 (52), pp. 69-74. [in Russian].
5. Devyatisil'nyi A.S. Izmerenie lineinykh uskoreniy s ispol'zovaniem opticheskogo izlucheniya [Measurement of Linear Accelerations Using Optical Radiation]. *Izmeritel'naya tekhnika — Measuring Equipment*, 2004, No. 10, pp. 31-32. [in Russian].
6. Safiullin R.A., Galeev R.F., Mukhametzyanov I.A. Inzhenernyi raschet kharakteristik elektromekhanicheskogo preobrazovatelya s kompozitnym vtorichnym elementom [Engineering Calculation of the Characteristics of an Electromechanical Converter with a Composite Secondary Element]. *Materialy IX mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference «Energetika: Management, Quality and Efficiency of Energy Resources Use»]. Blagoveshchensk, RIO AmGU, 2019, pp. 71-76. [in Russian].
7. Terlecka G., Vilumsone A., Blums J., Gornevs I. The Structure of the Electromechanical Converter and Its Integration in Apparel. *Scientific Journal of Riga Technical University*, 2011, Vol. 6, pp. 123-128.
8. Safiullin R.A. Chislenniye raschet kharakteristik kompozitnogo elektromekhanicheskogo datchika vibratsii [Numerical Calculation of the Characteristics of a Composite Electromechanical Vibration Sensor]. *XXIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Tekhnika i tekhnologiya: novye perspektivy razvitiya»* [XXIII International Scientific and Practical Conference «Engineering and Technology: New Prospects for Development»]. Moscow: Sputnik+ Publ., 2016, pp. 23-31. [in Russian].
9. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Maksudov D.V. Metodika inzhenernogo rascheta elektropuzhinnogo privoda [Technique for Engineering Calculation of an Electric Spring Drive]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy», posvyashchennoi 110-letiyu A.M. Bamdasa* [Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Electrotechnical Complexes and Systems» Dedicated to the 110th Anniversary of A.M. Bamdas]. Ufa, RIK UGATU, 2015, pp. 278-284. [in Russian].
10. Safiullin R.A. Vibration Diagnostics of Induction Motors. Proceedings of 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS2021), Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, November 16-18, 2021. 2021, pp. 228-232.
11. Tret'yakov D.V. Vliyanie izolyatsii provodov spiral'nogo magnitokumulyativnogo generatora na ego funktsionirovanie [Influence of Wire Insulation of a Spiral Magneto-Cumulative Generator on its Functioning]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2001, No. 6, pp. 49-55. [in Russian].
12. Bychkov Yu.A. Spravochnik po osnovam teoreticheskoi elektrotekhniki: uchebnoe posobie [Handbook on the Basics

of Theoretical Electrical Engineering: A Tutorial]. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2012. 368 p. [in Russian].

13. Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Safiullin R.A., Maksudov D.V. Pruzhinnyi preobrazovatel' lineinykh uskorenii [Spring Linear Acceleration Converter]. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Mechanical Engineering Technology*, 2021, No. 1, pp. 43-48. [in Russian].

14. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for Processing Signals and Data from Electrical Machine. 2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020), National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia, March 12-14, 2020. 2020, pp. 1-5.

15. Demirchyan K.C. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik dlya vuzov: V 3 t.* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Textbook for Universities: In 3 Vol.]. 4-e izd. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2003. Vol. 1. 463 p. [in Russian].

16. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Mukhametshin A.V. Model' spiral'nogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya s uchetom osnovnykh mekhanicheskikh i elektricheskikh parametrov [Model of a

Spiral Electromechanical Converter Taking into Account the Main Mechanical and Electrical Parameters]. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Mechanical Engineering Technology*, 2020, No. 11, pp. 64-67. [in Russian].

17. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A. e.a. High-Efficiency Impact Electromechanical Converter. *Russian Electrical Engineering*, 2011, No. 82, pp. 104.

18. Cheng Y., Cui S., Song L., Chan C.C. The Study of the Operation Modes and Control Strategies of an Advanced Electromechanical Converter for Automobiles. *IEEE Transactions on Magnetics*, Jan. 2007, Vol. 43, No. 1, pp. 430-433.

19. Kuimov D., Minkin M. The Electromechanical Converter in the Systems of Desulfurisation of Crude Oil. MATEC Web of Conferences. *EDP Sciences*, 2017, Vol. 132, pp. 3-16.

20. Kulah H., Chae J., Yazdi N., Najafi K.A. Multi-Step Electromechanical Converter for Micro-Capacitive Accelerometers. IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2003. Digest of Technical Papers. *ISSCC*, 2003, Vol. 1, pp. 202-488.



Наталья Николаевна Алаева
Natalya N. Alaeva

*кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизации
и информационных технологий,
Альметьевский государственный
нефтяной институт,
Альметьевск, Россия*



Ирина Петровна Ситдикова
Irina P. Sitdikova

*кандидат технических наук, доцент,
заведующая кафедрой автоматизации
и информационных технологий,
Альметьевский государственный
нефтяной институт,
Альметьевск, Россия*

УДК 681.2:550.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-63-71

К ВОПРОСУ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДОБЫВАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Актуальность

В статье рассмотрена проблема непрерывного контроля технологических параметров для эффективного управления нефтяными месторождениями при снижении материальных и экономических затрат.

Цель исследования

Разработать измерительный комплекс для непрерывного контроля основных параметров добываемой продукции (обводненность и дебит жидкости) нефтяных скважин непосредственно внутри колонны насосно-компрессорных труб.

Методы исследования

В основе метода контроля параметров потока водонефтяной смеси в режиме реального времени предлагаемым комплексом лежит косвенный способ определения характеристик среды, протекающей через верхний участок подъемника в виде насосно-компрессорных труб, с помощью двух методов: контроля диэлектрической проницаемости среды с использованием емкостного датчика и контроля ее плотности с применением дифференциального манометра. В работе представлены чертеж измерительного комплекса, общий вид экспериментального стенда и структурная схема измерительного преобразователя, а также результаты исследований. Измерения выполнялись с помощью электронной схемы, состоящей из аналого-цифровых преобразователей диэлектрической проницаемости среды, подключенной к компьютеру для обработки и визуализации полученных данных с помощью программы LabVIEW. Результаты преобразования измерений процентного содержания воды в водомасляной смеси использовались в алгоритмах получения значений влагосодержания и скорости перемещения среды.

Результаты

В результате исследований выявлено, что разработанный измерительный комплекс обладает приемлемой точностью измерений объемного расхода жидкости. Использование алгоритмов получения значений влагосодержания и скорости пере-

мещения среды обеспечивает требуемую точность и скорость получения результатов измерений, необходимых для практического применения. Простота практической реализации алгоритма создает условия для значительного снижения себестоимости внедрения на действующих месторождениях нефти. Таким образом, разработанный измерительный комплекс для нефтяных скважин позволит осуществлять непрерывный мониторинг параметров добычи в целях организации системы автоматического управления месторождением.

Ключевые слова: нефтесодержащая скважина, водонефтяная смесь, обводненность, дебит, измерительный комплекс, контроль параметров

ON CONTINUOUS MONITORING OF OIL WELL PRODUCTION PARAMETERS

Relevance

When developing alternating current test voltage sources to assess the quality of insulationThe article considers the problem of continuous control of technological parameters for effective management of oil fields while reducing material and economic costs.

Aims of research

To develop a measuring complex for non-stop control of main parameters of the extract products (water content and flow rate) of oil producing wells directly in a column of pumping-compressor pipes.

Research methods

The method of monitoring the parameters of the flow of oil-water mixture in real time by the proposed complex is based on an indirect method for determining the characteristics of the medium flowing through the upper section of the lift in the form of tubing, using two methods: monitoring the permittivity of the medium using capacitive sensor and monitoring its density a been used differential pressure gauge. In this work the drawing of a measuring complex, a general view of the experimental stand and the structural scheme of the measuring transducer and also research results are submitted. Measurements were carried out by means of the electronic circuit consisting of analog-to-digital converters of dielectric permittivity of the compound connected to the computer for received data processing and visualization by means of the LabVIEW program. Results of conversion of measurements of percentage of water in water oil mix were used in algorithms of obtaining values of moisture content and traverse speed of the compound.

Results

As a result of researches it is revealed that the developed measuring complex has the acceptable accuracy of measurements of a volume flow of liquid. Use of algorithms of obtaining values of moisture content and traverse speed of the compound provides the required accuracy and speed of obtaining results of the measurements necessary for practical application. Simplicity of its implementation creates conditions for considerable decrease in cost value of implementation on the operating oil fields. Thus, the developed measuring complex for oil wells will allow to carry out non-stop monitoring of parameters of production for the organization an oil field automatic control system.

Keywords: oil-producing well, oil-water mixture, water content, flow rate, measuring complex, parameter control

Введение

Одной из актуальных проблем нефтяной отрасли России является непрерывный контроль технологических параметров для эффективного управления

нефтяными месторождениями при снижении материальных и экономических затрат.

Существуют различные способы измерения дебита и обводненности добывае-

мой продукции, например, применение автоматизированных групповых замерных установок типа «Спутник» или индивидуальных расходомеров и влагомеров различных типов и модификаций [1–3]. Все существующие способы характеризуются недостатками, связанными с погрешностью или невозможностью оперативного определения параметров добываемой продукции [4].

При использовании непрерывного контроля технологических параметров в скважине применяется, как правило, внутрискважинное оборудование, обеспечивающее сбор и передачу на поверхность данных о параметрах добычи (дебит и обводненность добываемой продукции, значения давлений в скважине и прочие показатели) в целях дальнейшего управления режимом работы скважины. При установке такого оборудования на добывающих скважинах контроль должен быть оперативным и непрерывным, с функцией передачи информации на поверхность в режиме реального времени без прерывания процесса нормального функционирования добывающей скважины [5–8]. Существующие современные решения таких задач пока ограничены.

Постановка задачи

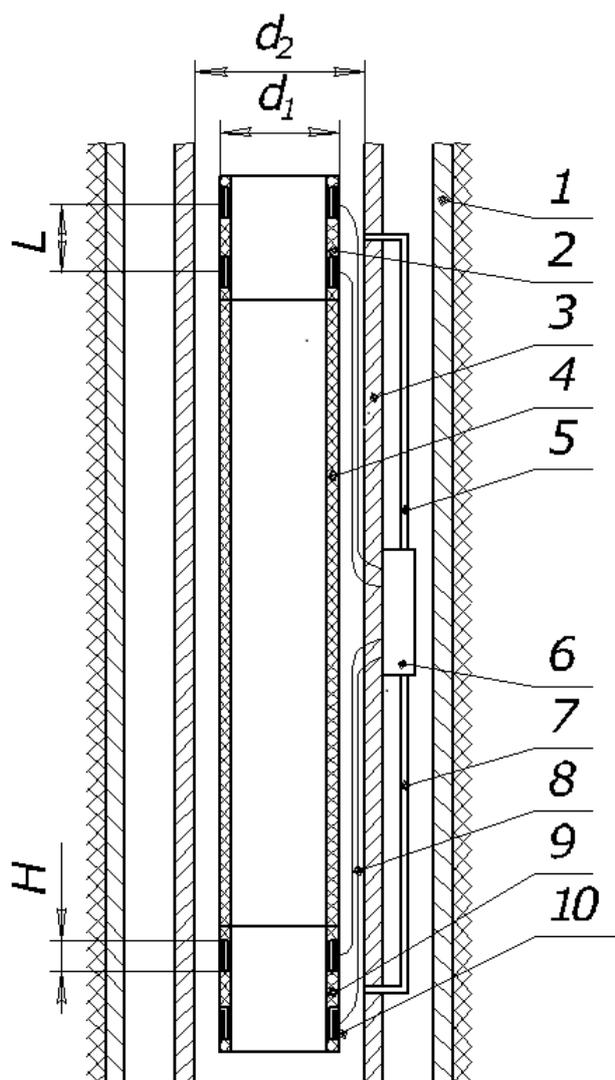
Применяемые на нефтяных месторождениях системы для контроля параметров добываемой продукции из экономических соображений должны быть максимально упрощены, при этом обеспечивая непрерывный мониторинг режима работы скважин и получая максимальное количество информации при минимуме непосредственно измеряемых параметров.

На рисунке 1 представлена схема разработанного измерительного комплекса для непрерывного контроля параметров добываемой продукции [9]. Установка самого прибора предполагается в верхней части колонны насосно-компрессорных

труб (НКТ) с учетом возможности установки в скважину, оснащенную штанговым глубинным насосом (ШГН). Центральная часть прибора выполняется полый, для возможности хода полированного штока.

Измерительный комплекс содержит скважинный прибор, состоящий из четырех изолированных друг от друга электродов (емкостных датчиков) 10, установленных на диэлектрическом основании 4 и образующих с НКТ 3 внутренние и внешние обкладки конденсаторов. Измерительные электроды (внутренние обкладки конденсаторов) 10 подключены к входам специализированных аналого-цифровых преобразователей емкости в код, находящихся в блоке электроники 6, а НКТ 3 (внешние обкладки конденсаторов) подключены к общему выводу схемы (земля).

В основе метода контроля параметров потока водонефтяной смеси в режиме реального времени предлагаемым комплексом лежит косвенный способ определения характеристик среды, протекающей через верхний участок подъемника в виде НКТ, с помощью двух методов: контроля диэлектрической проницаемости среды с использованием емкостного датчика и контроля ее плотности с применением дифференциального манометра. При этом наиболее вероятной структурой потока среды для данного участка НКТ является пробковая, когда течение представляет собой чередующиеся участки свободного нефтяного газа и водонефтяной смеси. При этом скорости перемещения воды и нефти в последнем одинаковы по определению (участок жидкости ограничен с обеих сторон пробками газа). Датчики в этом случае четко фиксируют границы структурной неоднородности потока среды, что позволяет определить временные интервалы газовых и жидкостных пробок с тем, чтобы соответствующей обработкой в контроллере



1 — обсадная колонна; 2, 9 — блоки емкостных датчиков; 3 — НКТ; 4 — основание; 5, 7 — капилляры подключения к дифманометру; 6 — блок электроники (АЦП, дифманометр, контроллер); 8 — провода к датчикам; 10 — емкостные датчики (4 шт.)

1 — casing string; 2, 9 — blocks of capacitive sensors; 3 — tubing; 4 — base; 5, 7 — capillaries connected to the diffmanometer; 6 — electronics unit (ADC, diffmanometer, controller); 8 — wires to sensors; 10 — capacitive sensors (4 pcs.)

Рисунок 1. Схема измерительного комплекса для непрерывного контроля параметров добываемой продукции

Figure 1. Diagram of the measuring complex for continuous monitoring of the parameters of the extracted products

перейти к оценке статических и динамических характеристик среды.

Емкостный датчик представляет собой условный электрический конденсатор, одной из обкладок которого являются электроды, расположенные на корпусе прибора, вторая обкладка — труба НКТ, а диэлектриком выступает измеряемая жидкость. Емкость такого цилиндрического конденсатора может быть определена по формуле:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_x H}{\ln(d_2 / d_1)}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ — электрическая постоянная;

ϵ_x — относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство ($\epsilon_x = 2,2$

для нефти, $\epsilon_x = 81$ для воды, $\epsilon_x = 1$ для воздуха);

H — высота изолированных электродов;

d_1, d_2 — соответственно наружный диаметр электрода и внутренний диаметр НКТ.

Нефтяная эмульсия, поступающая в скважину и содержащая в своем составе воду, протекая сквозь скважинный прибор, повлечет изменение выходного сигнала емкостных датчиков. Изменение диэлектрической проницаемости среды, зависящей от процентного содержания воды и нефти, влечет за собой изменение выходного сигнала емкостных датчиков. Сигнал с измерительных электродов поступает в блок электроники 6 на вход специализированных преобразователей

емкости в цифровой код $CDC1$ и $CDC2$. Полученная информация поступает на вход контроллера, в котором результаты преобразования измерений диэлектрической проницаемости используются в алгоритмах получения значений процентной обводненности жидкости в стволе скважины и скорости перемещения среды.

Алгоритм определения значения скорости перемещения среды основан на вычислении взаимной корреляционной функции двух сигналов с емкостных датчиков $U_1(C1, t)$ с выхода $CDC1$ и $U_2(C2, t)$ с выхода $CDC2$, расположенных на некотором расстоянии друг от друга:

$$R(\tau) \cong \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_1(nT)U_2(nT - \tau). \quad (2)$$

Другими словами, вычисление $R(\tau)$ сводится к умножению двух отсчетов функций $U_1(nT)$ и $U_2(nT - \tau)$, смещенных по времени на τ , во всех N точках промежутка времени nT (n — текущий номер точки, $T = const$ — промежуток времени между двумя соседними произведениями), суммированием N произведений и делением суммы на N . Вычисление $R(\tau)$ производится при различных τ с поиском такого значения τ_{max} , при котором $R(\tau)$ максимально. Полученное при этом τ_{max} — искомая величина.

Скорость движения среды определяется формулой:

$$V = \frac{L}{\tau_{max}}, \quad (3)$$

где L — расстояние между датчиками;

τ_{max} соответствует $R(\tau) = R(\tau)_{max}$.

Для повышения точности определения состава протекающей в НКТ жидкости дополнительно осуществляются измерения плотности жидкости гравитационным методом с помощью дифференциального манометра. Для его подключения выполняются врезки в трубу на известном расстоянии друг от друга. Обычно плотности компонентов смеси (нефти и

воды) известны, тогда влагосодержание можно определить аналитическим путем:

$$W = \frac{(\rho_{см} - \rho_n)}{(\rho_g - \rho_n)}, \quad (4)$$

$$\rho_{см} = \frac{\Delta P}{g \cdot L}, \quad (5)$$

где $\rho_{см}$ — плотность смеси, измеряемая по дифференциальному давлению ΔP ;

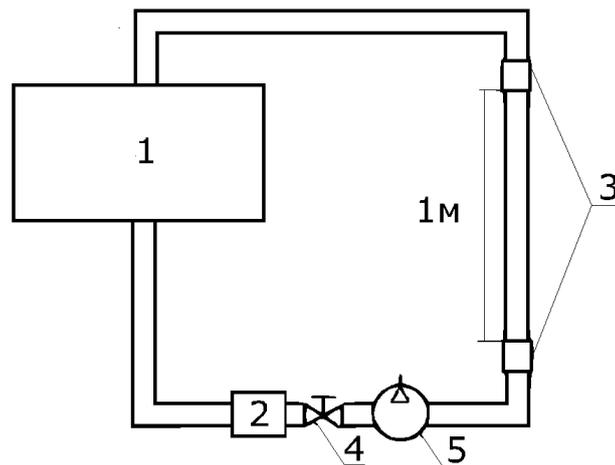
ρ_g, ρ_n — плотности воды и нефти, определяемые лабораторным методом по каждой скважине.

Программное обеспечение контроллера позволит получить обводненность жидкости емкостным и гравитационным способами, скорость движения среды и ее компонентов, объемные и массовые расходы нефти, воды и газа. Кроме того, полученные двумя методами значения водосодержания в водонефтяной смеси позволят вести самодиагностику оборудования по расхождениям в результатах измерений [10].

Средняя относительная погрешность при измерении дебита жидкости групповыми замерными установками составляет 12–18 % и более. Это может привести к некорректному выбору режимов работы скважины и системы управления процессом нефтедобычи. Авторами предлагается оценить относительную погрешность измерения расхода жидкости, не превышающую 10 %, предлагаемым устройством для дальнейшего применения его в системах управления процессом нефтедобычи.

Экспериментальная часть

Для проверки работоспособности принципов измерения предлагаемого устройства был модифицирован исследовательский лабораторный стенд (рисунок 2) и выполнены измерения при различных скоростях потока двухфазной жидкости (вода, трансформаторное масло). Для сравнения полученных данных измерительным прибором использо-



1 — емкость; 2 — насос; 3 — емкостные датчики; 4 — кран с регулировкой;
5 — компрессор

1 — tank; 2 — pump; 3 — capacitive sensors; 4 — adjustable crane; 5 — compressor

Рисунок 2. Экспериментальный стенд

Figure 2. Experimental stand

вался образцовый кориолисовый расходомер Yokogawa RotaMASS RCCT36 массового и объёмного типа. Водомасляная жидкость циркулирует через исследуемый измерительный прибор с помощью насоса, оборудованного частотным преобразователем для возможности регулирования расхода жидкости.

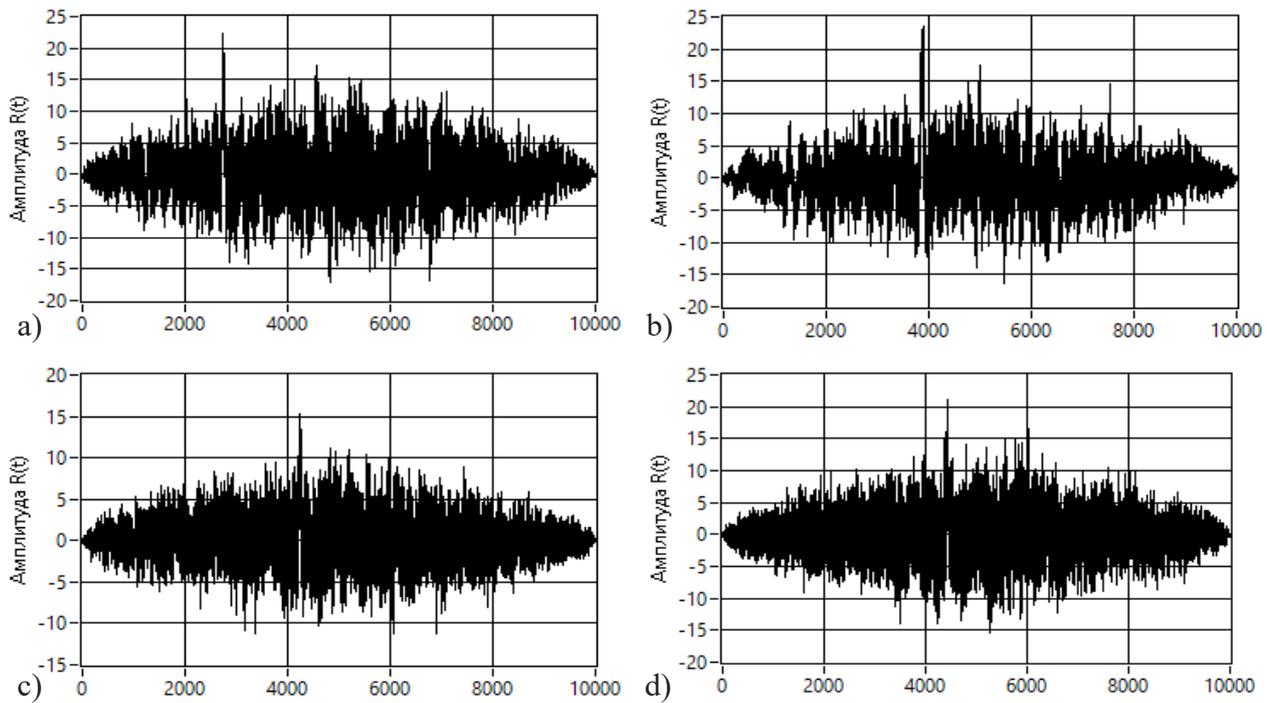
Жидкость, протекая между электродами и металлическим корпусом прибора, создает изменения значений емкости в образованных конденсаторах, которые затем регистрируются емкостными преобразователями. В качестве вторичного преобразователя емкостных датчиков была применена микросхема преобразователя емкости в код *LDC1000*. Принцип работы микросхемы *LDC1000* основан на измерении резонансной частоты *LC*-контура, в данном случае образованного из образцовой катушки индуктивности и конденсатора — емкостного датчика. На основе данной микросхемы была собрана электрическая схема преобразователя и размещена в корпус.

Платы преобразователей подключены к *USB*-концентратору, а на коммутационной макетной плате размещены образцо-

вые катушки индуктивности и соединительные провода. Управляющая программа создана при помощи программы *LabVIEW*. Визуализация и расчеты взаимной корреляции проводились на основе библиотек программы.

Диэлектрическая проницаемость жидкости, состоящей в основном из воды и нефти, в силу своей неоднородности сильно влияет на емкость датчиков. Получив взаимную корреляцию кривых по двум разнесенным между собой емкостным датчикам, определили время задержки τ , позволяющее при известных расстояниях между датчиками определить скорость движения водонефтяной смеси по формуле (2).

На рисунке 3 представлены результаты исследований, полученных в программе *LabVIEW*, при различных значениях расхода. По графикам видно, что каждому расходу жидкости соответствует значение функции взаимной корреляции, при котором она имеет максимальное значение. Проведя перпендикуляр из максимальной точки графика на ось абсцисс находится значение τ_{\max} . Результаты экспериментов представлены в таблице 1.



Значения расхода: а) 1 л/мин; б) 2 л/мин; в) 3 л/мин; г) 4 л/мин

Flow values: a) 1 l/min; b) 2 l/min; c) 3 l/min; d) 4 l/min

Рисунок 3. Графики функций взаимной корреляции при различных значениях расхода

Figure 3. Graphs of cross-correlation functions at different flow rates

Таблица 1. Результаты экспериментов

Table 1. Experimental results

№ эксп.	Образцовый расходомер RotaMASS RCCT36, л/мин	Исследуемый прибор			Относительная погрешность, %
		Объемный расход, л/мин	Скорость перемещения среды по (2), мм/с	Время задержки τ , у.е.	
1	0,98	1	53	2254	2,18
2	2,04	2,02	108	1116	-0,85
3	3,06	2,99	159	755	-2,29
4	3,94	3,04	215	559	2,48

Выводы

В результате исследований выявлено, что средняя относительная погрешность измерений объемного расхода жидкости предлагаемым устройством составила 1,95 % (не более 10 %) в отличие от измерений групповыми замерными установками. Использование алгоритмов получения значений влагосодержания и скорости перемещения среды обеспечивает требуемые точность и скорость получе-

ния результатов измерений, необходимые для практического применения. Простота практической реализации алгоритмов создает условия для значительного снижения себестоимости внедрения на действующих месторождениях нефти. Исходя из вышеизложенного, рекомендуем применять предлагаемое устройство для непрерывного мониторинга параметров в системах управления процессом добычи нефти для повышения

эффективности эксплуатации месторождений.

Основные формулы, представленные в работе, справедливы при отсутствии газа. Однако в верхней части колонны НКТ, куда предлагается установить устрой-

ство, присутствует попутный нефтяной газ. Перспективой дальнейших исследований является испытание предлагаемого устройства для измерения трехфазной жидкости.

Список литературы

1. Пат. 2568662 РФ, МПК Е 21 В 49/08. Способ определения содержания воды в водонефтяной смеси в стволе скважины и устройство для его осуществления / Ю.Б. Томус, Н.Н. Алаева, Р.Р. Ахметзянов. 2014111213/03, Заявлено 24.03.2014; Оpubл. 20.11.2015.

2. Djuraev U., Jufar Sh. R., Vasant P. A Review on Conceptual and Practical Oil and Gas Reservoir Monitoring Methods // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 152. P. 586-601.

3. Сабиров А.А. Новые разработки в технике и технологии добычи нефти // *Инженерная практика: Производственно-технический нефтегазовый журнал*. 2017. № 01-02.

4. Сафонов А.В. Технология повышения точности измерений массы и объема углеводородных жидкостей и сжиженных газов // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2021. № 10 (579). С. 6-13.

5. Ермолкин О.В., Великанов Д.Н., Попова Я.Д., Храбров И.Ю., Горохов А.В. К решению проблемы регистрации примесей в многофазном потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2020. № 4 (561). С. 41-49.

6. Ермолкин О.В., Гавшин М.А., Попова Я.Д., Лотош А.Н. Информационно-измерительная система оперативного контроля многофазных потоков продукции скважин // *Приборы*. 2018. № 7 (217). С. 13-20.

7. Соловьев И.Г. и др. Модель переходных процессов в скважине с частотно-регулируемым электроцентробежным насосом // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 1. С. 110-120.

8. Aliev T.A., Rzayev A.H., Guluyev G.A., Alizada T.A., Rzayeva N.E. Robust Technology and System for Management of Sucker Rod Pumping Units in Oil Wells // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. URL: <http://www.sciencedirect.com/> (дата обращения: 19.10.2021).

9. Пат. 150243 РФ, МПК Е 21 В 47/00. Комплекс для контроля влагосодержания и скорости перемещения среды в действующих нефтяных скважинах / Н.Н. Алаева, Ю.Б. Томус, К.М. Шайхлисламов. № 2014135098/03. Заявлено 27.08.2014, опубл. 10.02.2015.

10. Шайхлисламов К.М., Алаева Н.Н., Томус Ю.Б. Измерительный комплекс для непрерывного контроля параметров добываемой продукции нефтяных скважин // *Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан / Альметьевский государственный нефтяной институт*. Альметьевск, 2016. С. 289-291.

References

1. Tomus Yu.B., Alaeva N.N., Akhmetzyanov R.R. *Sposob opredeleniya sodержaniya vody v vodoneftyanoi smesi v stvole skvazhiny i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for Determining the Water Content in an Oil-Water Mixture in a Borehole and a Device for Its Implementation]. Patent RF, No. 2568662, 2015. [in Russian].

2. Djuraev U., Jufar Sh. R., Vasant P. A Review on Conceptual and Practical Oil and Gas Reservoir Monitoring Methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, Vol. 152, pp. 586-601.

3. Sabirov A.A. *Novye razrabotki v tekhnike i tekhnologii dobychi nefiti* [New Developments in the Technique and

Technology of Oil Production]. *Inzhenernaya praktika: Proizvodstvenno-tekhnicheskii neftegazovyi zhurnal — Engineering Practice: Production and Technical Oil and Gas Journal*, 2017, No. 01-02. [in Russian].

4. Safonov A.V. Tekhnologiya povysheniya tochnosti izmerenii massy i ob'ema uglevodorodnykh zhidkosti i szhizhennykh gazov [A Technology for Improving the Accuracy of Mass and Volume Measurements of Hydrocarbon Liquids and Liquefied Gases]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti — Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry*, 2021, No. 10 (579), pp. 6-13. [in Russian].

5. Ermolkin O.V., Velikanov D.N., Popova Ya.D., Khrabrov I.Yu., Gorokhov A.V. K resheniyu problemy registratsii primesei v mnogofaznom potoke produktsii gazovykh i gazokondensatnykh skvazhin [To Solving the Problem of Registration of Inclusions in the Product Multiphase Flow of Gas and Gas-Condensate Wells]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti — Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry*, 2020, No. 4 (561), pp. 41-49. [in Russian].

6. Ermolkin O.V., Gavshin M.A., Popova Ya.D., Lotosh A.N. Informatsionno-izmeritel'naya sistema operativnogo kontrolya mnogofaznykh potokov produktsii skvazhin [Information and Measurement System for Operational Control of Multiphase Flows of Well Products]. *Pribory — Pribory*, 2018, No. 7 (217), pp. 13-20. [in Russian].

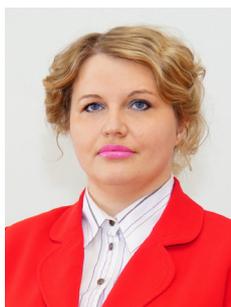
7. Solov'ev I.G. e.a. Model' perekhodnykh protsessov v skvazhine s chastotno-reguliruemym elektrotsentrobezhnym nasosom [Transient Processes Model of a Well

with Frequency Regulated Electric Submersible Pump]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, Vol. 330, No. 1, pp. 110-120. [in Russian].

8. Aliev T.A., Rzayev A.H., Guluyev G.A., Alizada T.A., Rzayeva N.E. Robust Technology and System for Management of Sucker Rod Pumping Units in Oil Wells. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018. URL: <http://www.sciencedirect.com/> (accessed 19.10.2021).

9. Alaeva N.N., Tomus Yu.B., Shaikhislamov K.M. Kompleks dlya kontrolya vlagosoderzhaniya i skorosti peremeshcheniya sredy v deistvuyushchikh neftyanykh skvazhinakh [A Complex for Monitoring the Moisture Content and the Speed of Movement of the Medium in Operating Oil Wells]. Patent RF, No. 150243, 2015. [in Russian].

10. Shaikhislamov K.M., Alaeva N.N., Tomus Yu.B. Izmeritel'nyi kompleks dlya nepreryvnogo kontrolya parametrov dobyvaemoi produktsii neftyanykh skvazhin [A Complex for Monitoring the Moisture Content and the Speed of Movement of the Medium in Operating Oil Wells]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 60-letiyu vysshogo neftegazovogo obrazovaniya v Respublike Tatarstan, Al'met'evskii gosudarstvennyi neftyanoi institute* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 60th Anniversary of Higher Oil and Gas Education in the Republic of Tatarstan, Almet'yevsk State Oil Institute.]. Al'met'evsk, 2016, pp. 289-291. [in Russian].



Алина Александровна Зайцева
Alina A. Zaytseva

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электронная
инженерия» факультета авионики,
энергетики и инфокоммуникаций,
Уфимский государственный
авиационный технический
университет, Уфа, Россия*



Евгений Александрович Лихачев
Evgeny A. Likhachev

*старший преподаватель кафедры
«Электронная инженерия»
факультета авионики, энергетики
и инфокоммуникаций,
Уфимский государственный
авиационный технический
университет, Уфа, Россия*



Николай Олегович Дудаев
Nikolay O. Dudaev

*студент кафедры «Электронная
инженерия» факультета авионики,
энергетики и инфокоммуникаций,
Уфимский государственный
авиационный технический
университет, филиал,
Кумертау, Россия*



Константин Викторович Щербаков
Konstantin V. Shcherbakov

*студент кафедры «Электронная
инженерия» факультета авионики,
энергетики и инфокоммуникаций,
Уфимский государственный
авиационный технический
университет, филиал,
Кумертау, Россия*

УДК 629.7

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-72-81

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЕРТОЛЕТА

Актуальность

Бортовые вычислительные комплексы (БВК) современных летательных аппаратов (ЛА) имеют системно-ориентированную децентрализованную структурную организацию. Децентрализованный принцип предусматривает, что БВК строится в виде определенной совокупности подсистем, между которыми осуществлено функциональное распределение задач. При этом каждая из специализированных подсистем выполняет свою функциональную задачу, обмениваясь при необходимости информа-

цией с другими подсистемами по соответствующим каналам передачи информации. Однако по мере усложнения функциональных задач и увеличения их количества децентрализованный принцип построения бортовых систем в значительной степени исчерпал свои возможности. В первую очередь, это касается таких перспективных разработок, как проект создания высокоскоростного вертолета. Реализация концепции перспективного скоростного вертолета требует разработки высокопроизводительного бортового информационно-управляющего комплекса, способного выполнять разнообразные функции с целью обеспечения высокой скорости и большой дальности полета, а также возможности посадки на неподготовленные площадки.

Цель исследования

Цель исследования заключается в повышении производительности бортового вычислительного комплекса за счет формирования открытой архитектуры на основе совмещения COST-продуктов, планирования вычислительных процессов и выбора оптимальной структурной организации аппаратной части.

Задачи исследовательского проекта:

1. создание высокопроизводительного информационно-управляющего комплекса на базе открытых архитектур и на базе интегрированной модульной авионики;
2. использование метода оптимизации данного комплекса для выбора оптимально возможного решения задач для высокоскоростного перспективного вертолета.

Методы исследования

Подробно прорабатывается метод обобщенных рангов. Ранжирование производится по четырем критериям: суммарный объем изделия, масса изделия, доступность изделия и оценка эффективности работы изделия.

Результаты

Научная новизна данного исследовательского проекта заключается в решении проблем, связанных с формализацией процедуры выбора оптимальной конфигурации бортового информационно-управляющего комплекса, основанной на рациональном сочетании методики формирования множества допустимых вариантов бортовой аппаратуры, отвечающих современной концепции модульной авионики, и принципов эвристической оптимизации на базе векторной оптимизации.

Предложенные в работе методы позволяют повысить качество выполнения поставленных задач перед высокоскоростными вертолетами за счет внедрения высокоскоростного бортового информационно-управляющего комплекса, соответствующего оптимальным требованиям для выполнения тактико-технических характеристик боевой машины, в котором используется оптимальные COTS модули на базе интегральной модульной авионики. Внедрение результатов исследовательского проекта в разработку перспективных высокоскоростных вертолетов позволит, по оценкам, повысить выполнение поставленных задач перед боевой машиной на 5–10 %.

Ключевые слова: бортовые вычислительные комплексы, перспективный высокоскоростной вертолёт, микропроцессорная техника, COTS-продукт, открытые архитектуры

HIGH PERFORMANCE INFORMATION AND CONTROL COMPLEX FOR PERSPECTIVE HIGH-SPEED HELICOPTER

Relevance

Onboard computing systems (OCS) of modern aircraft (AC) have a system-oriented decentralized structural organization. The decentralized principle provides that the OCS is built in the form of a certain set of subsystems, between which the functional distribution of tasks is carried out. In this case, each of the specialized subsystems performs its functional task, exchanging, if necessary, information with other subsystems through the corresponding information transmission channels. However, as the functional tasks become more complex

and their number increases, the decentralized principle of building on-board systems has largely exhausted its capabilities. First of all, this concerns such promising developments as the project to create a high-speed helicopter. The implementation of the concept of a promising high-speed helicopter requires the development of a high-performance on-board information and control complex capable of performing various functions in order to ensure high speed and long flight range, as well as the possibility of landing on unprepared sites.

Aim of research

The aim of research is to increase the performance of the on-board computer complex by forming an open architecture based on combining COTS products, planning computing processes and choosing the optimal structural organization of the hardware.

The objectives of the research project:

1. creation of a high-performance information and control complex based on open architectures and on the basis of integrated modular avionics;
2. using the optimization method of this complex to select the optimal possible solution to problems for a high-speed promising helicopter.

Methods of research

Method of generalized ranks is being worked out in detail. Ranking is made according to four criteria: total product volume, product weight, product availability, and product performance evaluation.

Results

The scientific novelty of this research project lies in solving problems associated with the formalization of procedures for the optimal configuration of the onboard information and control complex, based on the choice of methods for forming a set of acceptable options for onboard equipment that meet the modern concept of modular avionics, and the principles of heuristic optimization of the vector optimization base.

The methods proposed in the work make it possible to improve the quality of the tasks assigned to high-speed helicopters by introducing a high-speed on-board information and control complex that meets the optimal requirements for performing the tactical and technical characteristics of a combat vehicle, which uses optimal COTS modules used on the basis of integral modular avionics. The introduction of the results of the research project into the development of promising high-speed helicopters will, according to estimates, increase the performance of the assigned tasks in front of the combat vehicle by 5–10 %.

Keywords: on-board computing systems, promising high-speed helicopter, microprocessor technology, COTS product, open architectures

Алгоритм оптимизации аппаратного состава высокопроизводительного бортового информационно- управляющего комплекса

Первое условие в сформулированной задаче оптимизации определяет ограничения, в рамках которых должна решаться оптимизационная задача. А второе — специфику выбора варианта, отвечающего заданным требованиям к тактико-техническим характеристикам разрабатываемых устройств [1–5]. К числу таких характеристик относятся:

- суммарный объём изделия (*Volume*);
- масса изделия (*Mass*);

- доступность (*Availability*);
- оценка эффективности работы (*Rating*).

В качестве оценки эффективности работы предлагается использовать экспертные оценки способности данного набора устройств выполнять требуемые функции, заданные на универсальной столбальной шкале.

В данном конкретном примере было сформировано десять вариантов аппаратного состава для высокопроизводительного бортового информационно-управляющего комплекса, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1. Варианты аппаратного состава информационно-измерительного и управляющего комплекса**Table 1.** Variants of the hardware composition of the information-measuring and control complex

<i>Вариант 1</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	МФИ 10-6М
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	МФПУ-Авиаприбор
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	ВСВ-95-1В
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	ИНС– 2000
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	ТТА-12S
Системы предотвращения столкновений в воздухе	ПУ ОСА-С
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	МРЛС «Дуэт»
Радиотехническое оборудование ближней навигации	А-380МКЭ
Системы управления радиосредствами	МИКРОН
<i>Вариант 2</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	МФИ-ЖК-2
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	МФПУ-ЭЛАРА
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	КАБРИС-31
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	БПСН-2-03
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	Т ² CAS (TAWS)
Системы предотвращения столкновений в воздухе	TCAS-4000
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	КОНТУР-10СВ
Радиотехническое оборудование ближней навигации	РСБН-85В
Системы управления радиосредствами	«ШИРОТА–У»
<i>Вариант 3</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	TDS-10LH/TDS-10LL
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	Primus 2000
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	АБРИС
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	АН-2100 Super AHRS
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	ТТА-12S
Системы предотвращения столкновений в воздухе	ТЗCAS
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	RDR 4000
Радиотехническое оборудование ближней навигации	АН/ARN-147 (V)
Системы управления радиосредствами	Primus HF-1050
<i>Вариант 4</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	МФИ 10-6М
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	Primus 2000
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	КАБРИС-31
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	ИНС– 2000
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	ТТА-12S
Системы предотвращения столкновений в воздухе	ПУ ОСА-С
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	КОНТУР-10СВ
Радиотехническое оборудование ближней навигации	А-380МКЭ
Системы управления радиосредствами	Primus HF-1050
<i>Вариант 5</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	TDS-10LH/TDS-10LL
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	Primus 2000
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	AMS-5000
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	АН-2100 Super AHRS
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	Т ² CAS (TAWS)
Системы предотвращения столкновений в воздухе	TCAS-3000SP TM
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	RDR 4000

Радиотехническое оборудование ближней навигации	AN/ARN-147 (V)
Системы управления радиосредствами	Primus HF-1050
<i>Вариант 6</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	TDS-10LH/TDS-10LL
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	МФПУ-ЭЛАРА
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	BCB-95-1B
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	АН-2100 Super AHRS
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	ТТА-12S
Системы предотвращения столкновений в воздухе	ПУ ОСА-С
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	КОНТУР-10СВ
Радиотехническое оборудование ближней навигации	РСБН-85В
Системы управления радиосредствами	«ШИРОТА-У»
<i>Вариант 7</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	МФИ 10-6М
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	МФПУ-Авиаприбор
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	АБРИС
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	БПСН-2-03
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	ТТА-12Н
Системы предотвращения столкновений в воздухе	ТЗСАС
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	КОНТУР-10СВ
Радиотехническое оборудование ближней навигации	А-380МКЭ
Системы управления радиосредствами	МИКРОН
<i>Вариант 8</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	TDS-10LH/TDS-10LL
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	МФПУ-Авиаприбор
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	BCB-95-1B
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	БПСН-2-03
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	ТТА-12S
Системы предотвращения столкновений в воздухе	ТЗСАС
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	RDR 4000
Радиотехническое оборудование ближней навигации	А-380МКЭ
Системы управления радиосредствами	МИКРОН
<i>Вариант 9</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	МФИ 10-6М
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	МФПУ-ЭЛАРА
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	АБРИС
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	АН-2100 Super AHRS
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	ТТА-12Н
Системы предотвращения столкновений в воздухе	ПУ ОСА-С
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	КОНТУР-10СВ
Радиотехническое оборудование ближней навигации	РСБН-85В
Системы управления радиосредствами	«ШИРОТА-У»
<i>Вариант 10</i>	
Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	МФИ-ЖК-2
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	МФПУ-1
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	АБРИС
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	БПСН-2-03
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	T ² CAS (TAWS)
Системы предотвращения столкновений в воздухе	TCAS-3000SP™
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	RDR 4000
Радиотехническое оборудование ближней навигации	AN/ARN-147 (V)
Системы управления радиосредствами	Primus HF-1050

Ранжирование начнем с расчета суммарных характеристик для каждого варианта.

$$Sum_Mass_j = \sum_{k=1}^M Mass_k ; \quad (1)$$

$$Sum_Volume_j = \sum_{k=1}^M Volume_k ; \quad (2)$$

$$Sum_Availability_j = \sum_{k=1}^M Availability_k ; \quad (3)$$

$$Sum_Rating_j = \sum_{k=1}^M Rating_k , (j = \overline{1, R}), \quad (4)$$

где M — число функциональных групп используемого оборудования;

R — число сформированных вариантов аппаратного облика.

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Проведем сортировку вариантов по каждому из выбранных критериев. Результаты ранжирования по критерию эффективности приведены в таблице 3.

Вариант 3 и 5 оказались лучшими по выбранному показателю. Но данные варианты не являются безусловно лучшими, так как уступают остальным вариантам по объёму, доступности и массе. Поэтому проведем сортировку по оставшимся критериям (таблицы 4–6).

Таблица 2. Суммарные характеристики аппаратуры

Table 2. Overall characteristics of the equipment

Вариант	Объем, дм ³	Масса, кг	Доступность, %	Оценка эффективности
1	79,688	152,4	98	755
2	50,918	100,68	90	755
3	74,204	70,3	89	810
4	80,863	118,1	95	770
5	74,844	72,48	84	810
6	71,034	103,3	98	755
7	57,418	123	99	740
8	48,154	116,9	97	750
9	76,848	103,9	98	760
10	51,922	66,08	86	800

Таблица 3. Ранжирование по оценке эффективности работы

Table 3. Ranking for performance evaluation

Ранг	Вариант	Объем, дм ³	Масса, кг	Доступность, %	Оценка эффективности
1	7	57,418	123	99	740
2	8	48,154	116,9	97	750
3	1	79,688	152,4	98	755
4	2	50,918	100,68	90	755
5	6	71,034	103,3	98	755
6	9	76,848	103,9	98	760
7	4	80,863	118,1	95	770
8	10	51,922	66,08	86	800
9	3	74,204	70,3	89	810
10	5	74,844	72,48	84	810

Таблица 4. Ранжирование по массе**Table 4** Ranking by mass

Ранг	Вариант	Объем, м ³	Масса, кг	Доступность, %	Оценка эффективности
1	1	79,688	152,4	98	755
2	7	57,418	123	99	740
3	4	80,863	118,1	95	770
4	8	48,154	116,9	97	750
5	9	76,848	103,9	98	760
6	6	71,034	103,3	98	755
7	2	50,918	100,68	90	755
8	5	74,844	72,48	84	810
9	3	74,204	70,3	89	810
10	10	51,922	66,08	86	800

Таблица 5. Ранжирование по объему**Table 5.** Ranking by volume

Ранг	Вариант	Объем, дм ³	Масса, кг	Доступность, %	Оценка эффективности
1	4	80,863	118,1	95	770
2	1	79,688	152,4	98	755
3	9	76,848	103,9	98	760
4	5	74,844	72,48	84	810
5	3	74,204	70,3	89	810
6	6	71,034	103,3	98	755
7	7	57,418	123	99	740
8	10	51,922	66,08	86	800
9	2	50,918	100,68	90	755
10	8	48,154	116,9	97	750

Таблица 6. Ранжирование по доступности**Table 6.** Ranking by availability

Ранг	Вариант	Объем, дм ³	Масса, кг	Доступность, %	Оценка эффективности
1	5	74,844	72,48	84	810
2	10	51,922	66,08	86	800
3	3	74,204	70,3	89	810
4	2	50,918	100,68	90	755
5	4	80,863	118,1	95	770
6	8	48,154	116,9	97	750
7	1	79,688	152,4	98	755
8	6	71,034	103,3	98	755
9	9	76,848	103,9	98	760
10	7	57,418	123	99	740

Присвоим каждому варианту ранги согласно его положению в предыдущих таблицах (таблица 7). На основе полученных данных для каждого варианта найдем суммарные ранги.

$$Sum_Rank_j = Rank_Massa_j + Rank_Objem_j + Rank_Price_j + Rank_Ozenka_j, \quad (j=1, \bar{R}). \quad (5)$$

Выбор оптимальной проектной альтернативы из множества допустимых вариантов осуществляется следующим образом:

$$r = \arg \max_j Sum_Rank_j, \quad (j=1, \bar{R}). \quad (6)$$

Таким образом, находим, что оптимальным вариантом аппаратного состава

информационно-измерительного и управляющего комплекса является вариант 10 (таблица 8).

Данный способ формирования аппаратного состава бортового информационно-управляющего комплекса базе компонент высокой степени готовности позволяет устранить ряд проблем, которые возникают при оптимизации технических, эксплуатационных и экономических показателей, с помощью использования метода обобщенных рангов, обеспечивающего получение объективно обоснованных компромиссных решений.

Таблица 7. Суммарный ранг

Table 7. Total rank

№ варианта	Ранг массы	Ранг объема	Ранг доступности	Ранг оценки эффективности	Суммарный ранг
1	1	2	7	3	13
2	7	9	4	4	24
3	9	5	3	9	26
4	3	1	5	7	16
5	8	4	1	10	23
6	6	6	8	5	25
7	2	7	10	1	20
8	4	10	6	2	22
9	5	3	9	6	23
10	10	8	2	8	28

Таблица 8. Оптимальный состав аппаратуры информационно-управляющего комплекса

Table 8. Optimal composition of the information and control complex equipment

Электронная система индикации (ЭСИ) вертолета	МФИ-ЖК-2
Многофункциональный пульт управления (МФПУ)	МФПУ-1
Вычислительная система управления полетом (ВСУП)	АБРИС
Бесплатформенная инерциальная система (БИНС)	БПСН-2-03
Система предупреждения близости земли (СППЗ)	T ² CAS (TAWS)
Системы предотвращения столкновений в воздухе	TCAS-3000SP TM
Бортовые метеонавигационные радиолокаторы	RDR 4000
Радиотехническое оборудование ближней навигации	AN/ARN-147 (V)
Системы управления радиосредствами	Primus HF-1050

Выводы

В ходе проведения исследовательского проекта был разработан образец высокопроизводительного бортового информационно-управляющего комплекса для перспективного высокоскоростного вертолета на базе использования открытых архитектур, таких как COST–продукты. При выборе оптимальных авиационных приборов для высокопроизводительного бортового информационно-управляющего комплекса также учитывались такие характеристики, как: объем, массогаба-

ритность, конструктивные особенности, ценовую политику, эффективность работы приборов. При выборе оптимальных приборов основывались на таких алгоритмах, как ранжирование при оптимизации, векторная оптимизация по принципу Парето.

Внедрение результатов исследовательского проекта в разработку перспективных высокоскоростных вертолетов позволит, по оценкам, повысить выполнение поставленных задач перед боевой машиной на 5–10 %.

Список источников

1. Наука и техника [Электронный ресурс]. URL: <https://naukatehnika.com/kamov-vklyuchaetsya-v-gonku-skorostnyix-vertoletov.html> (дата обращения: 12.04.2019).
2. Сверхскоростные вертолеты, винтокрылы, конвертопланы [Электронный ресурс]. URL: <https://aftershock.news/?q=node/372516&full> (дата обращения: 12.04.2019).
3. Большая военная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: http://zonwar.ru/news3/news_579_Sikorsky_X2.html (дата обращения: 15.04.2019).
4. Заседание по теме «Бортовое радиоэлектронное оборудование вертолетных комплексов. Существующие проблемы. Основные требования к БРЭО модернизируемых и перспективных вертолетов». Текст доклада. М., 2013. Докладчик: А. Бельский, заместитель Генерального конструктора, ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля».
5. Жаринов О.О., Видин Б.В., Шек-Иовсеянц Р.А. Принципы построения крейта бортовой многопроцессорной вычислительной системы для авионики пятого поколения // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 4(68). С. 21-27.

References

1. *Nauka i tekhnika* [Science and Technology] [Electronic Resource]. URL: <https://naukatehnika.com/kamov-vklyuchaetsya-v-gonku-skorostnyix-vertoletov.html> (accessed 12.04.2019). [in Russian].
2. *Sverkhskorostnye vertolety, vintokryly, konvertoplany* [Super-High-Speed Helicopters, Rotorcraft, Convertiplanes] [Electronic Resource]. URL: <https://aftershock.news/?q=node/372516&full> (accessed 12.04.2019). [in Russian].
3. *Bol'shaya voennaya entsiklopediya* [Big Military Encyclopedia] [Electronic Resource]. URL: http://zonwar.ru/news3/news_579_Sikorsky_X2.html (accessed 15.04.2019). [in Russian].
4. *Zasedanie po teme «Bortovoe radioelektronnoe oborudovanie vertoletnykh kompleksov. Sushchestvuyushchie problemy. Osnovnye trebovaniya k BREO moderniziruemym i perspektivnykh vertoletov».* *Tekst doklada. Dokladchik: A. Bel'skii, zamestitel' General'nogo konstruktora, OJSC «MVZ im. M.L. Milya»* [Meeting on the Topic «On-Board Radio-Electronic Equipment of Helicopter Complexes. Existing Problems. Basic Requirements for the Avionics of Upgraded and Advanced Helicopters». Report Text. Speaker: A. Belsky, Deputy General Designer, OJSC

Moscow Helicopter Plant named for M.L. Mile]. Moscow, 2013. [in Russian].

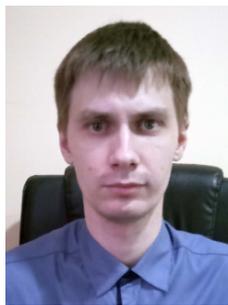
5. Zharinov O.O., Vidin B.V., Shek-Iovsepyants R.A. Printsipy postroeniya kreita bortovoi mnogoprotsessornoi vychislitel'noi sistemy dlya avioniki pyatogo pokoleniya [Principles of Building a Crate of an Onboard Multiprocessor Computer System for Fifth-Generation Avionics].

Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki — Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2010, No. 4(68), pp. 21-27. [in Russian].



***Рустам Нуриманович
Хамитов***
Rustem N. Hamitov

*доктор технических наук,
профессор кафедры
электрической техники,
Омский государственный
университет,
Омск, Россия*



***Павел Витальевич
Зыкин***
Pavel V. Zykin

*аспирант кафедры
электроэнергетики,
Тюменский
индустриальный
университет,
Тюмень, Россия*



***Александр Савельевич
Глазырин***
Alexander S. Glazyrin

*доктор технических наук,
профессор отделения
электроэнергетики
и электротехники
Инженерной школы
энергетики,
Национальный
исследовательский
Томский политехнический
университет,
Томск, Россия*

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-82-91

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧИ ТОКАРНОГО СТАНКА С ЧПУ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Актуальность

В рамках исследования при помощи программного пакета MATLAB разработана система управления для привода подачи токарного станка с ЧПУ на основе нечеткой логики. Разработка выполнена на основе экспериментально определенной (как теоретически, так и эмпирически) совместно используемой функции принадлежности (включающей в себя построенные на едином основании функции Гаусса и сигмоидальные функции). Это позволяет избежать появления застойных зон, где регулятор не реагирует на изменение входящих параметров объекта управления. Полученные результаты показали эффективность разработки, которая выражается в экономичном использовании ресурса синхронного электродвигателя. Экономичность достигается за счет предусмотренного в системе управления датчика шероховатости обрабатываемой поверхности. В результате проектирования системы управления получена возможность регулировать показатели скорости вращения электродвигателя и качества обрабатываемой поверхности детали. Стоит отметить, что в основе регулирования заложена эмпирическая зависимость шероховатости обработанной поверхности детали от радиуса при вершине резца и подачи. Слаженность и последовательность функционирования составных частей системы, позволяющих осуществлять регулирование нечетких значений параметров электродвигателя, обеспечиваются за счет разработанной передаточной функции шарико-винтовой пары. Для совместного использования двух компонентов системы математически выведена передаточная

функция, правильность ее расчетов подтверждена графически. Для функционирования системы управления электродвигателем токарного станка с ЧПУ на базе нечеткой логики разработан блок нечетких правил. Функционал блока предусматривает стабилизацию скорости вращения электродвигателя в случае возникновения трех основных ситуаций: при увеличении показателя от нормы, при его несоответствии в меньшую сторону и при полном соответствии. Его работа налажена таким образом, чтобы за счет предварительно указанных условий выявлять несоответствия нечетких значений совокупности параметров. В целом стоит отметить, что эффективность полученной разработки подтверждена экспериментально, результаты проведенного эксперимента позволяют утверждать, что система управления электродвигателем функционирует исправно и эффективна всех этапах работы электропривода.

Цель исследования

Разработать модель системы управления на нечеткой логике для привода продольной подачи токарного станка с ЧПУ.

Сформировать блок правил нечеткой системы управления способствующий осуществлению ее работы на всей поверхности нечеткого множества без застойных зон.

Методы исследования

В рамках исследования при помощи пакета MATLAB разработана модель нечеткой системы управления, результаты показали, что разработка функционирует на всей поверхности нечеткого множества, без застойных зон.

Сформирован блок правил нечеткого регулятора. Это способствует работе системы управления на всей поверхности отклика, то есть возможности осуществлять регулирование показателей синхронного электродвигателя на всех этапах реализации технологического процесса обработки детали.

Результаты

В рамках исследования разработана система управления на нечеткой логике для привода продольной подачи токарного станка с ЧПУ.

В основе системы лежат совместно используемые функции принадлежности, построенные на едином основании.

Разработаны ряд математически сформулированных передаточных функций, обеспечивающих корректировку скорости вращения синхронного двигателя, слаженную передачу полученных данных на последующие блоки системы управления для дальнейшего регулирования скорости вращения режущего инструмента.

Для обеспечения функционирования системы управления разработан блок нечетких правил, который состоит из трех направлений регулирования, работа по которым автоматически определяется системой управления на основании данных о несоответствии параметров, полученные от специально предусмотренного датчика шероховатости поверхности обрабатываемой детали.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, фазсификация, функции принадлежности, поверхность отклика, база правил, передаточная функции, шероховатость поверхности

DEVELOPMENT OF FUZZY CNC LATHE DRIVE CONTROL SYSTEM BASED ON SHARED ACCESSORY FUNCTIONS

Relevance

As part of the study, a control system for driving the supply of a CNC lathe based on fuzzy logic was developed using the MATLAB software package. The development is carried out on the basis of experimentally defined (both theoretically and empirically) shared functions of belonging (including Gauss functions and sigmoidal functions built on a single basis). This avoids the appearance of stagnant zones where the regulator does not

respond to changes in the incoming parameters of the control object. The results obtained showed the development efficiency, which is expressed by the economical use of the synchronous motor life. Economy is achieved due to surface roughness sensor provided in control system. As a result of the design of the control system, it is possible to adjust the speed of rotation of the motor, and the quality of the machined surface of the part. It is worth noting that the regulation is based on the empirical dependence of the roughness of the processed surface of the part on the radius at the tip of the cutter and the supply. Coherence and sequence of functioning of system components allowing for control of fuzzy values of electric motor parameters is ensured by developed transfer function of ball-screw pair. To share the two components of the system, the transfer function is mathematically derived, the correctness of its calculations is confirmed graphically. For the operation of the CNC lathe motor control system based on fuzzy logic, a fuzzy rule unit has been developed. The unit functionality provides for stabilization of the motor rotation speed in case of three main situations: with an increase in the indicator from the norm, with its mismatch to the lower side and with full compliance. Its operation is arranged in such a way that due to the previously specified conditions it is possible to detect inconsistencies of fuzzy values of the set of parameters. In general, it is worth noting that the effectiveness of the resulting development was confirmed experimentally, the results of the experiment make it possible to assert that the electric motor control system functions properly and is effective at all stages of the electric drive operation.

Aim of research

Develop a fuzzy logic control system model to drive the longitudinal feed of the CNC lathe.

To form a rule block of a fuzzy control system that facilitates its operation on the entire surface of a fuzzy set without stagnant zones.

Research methods

As part of the study, a model of a fuzzy control system was developed using the MATLAB package, the results showed that the development functions on the entire surface of a fuzzy set, without stagnant zones. Fuzzy regulator rule block is formed. This facilitates the operation of the control system on the entire response surface, that is, the ability to control the synchronous motor performance at all stages of the part processing process.

Results

As part of the study, a fuzzy logic control system was developed to drive the longitudinal supply of the CNC lathe.

The system is based on shared membership functions built on a single basis.

A number of mathematically formulated transfer functions have been developed, which provide correction of the rotation speed of the synchronous motor, consistent transmission of the obtained data to subsequent control system units for further control of the rotation speed of the cutting tool.

To ensure the operation of the control system, a fuzzy rule unit has been developed, which consists of three control directions, the operation of which is automatically determined by the control system based on data on non-conformity of parameters obtained from a specially provided surface roughness sensor of the machined part.

Keywords: fuzzy regulator, phasification, belonging functions, response surface, rule base, transfer function, surface roughness

Введение

В условиях современного развития электроэнергетики наблюдается высокий темп развития нечеткой логики для обе-

спечения управления за ключевыми процессами.

В большинстве случаев технология нечеткого регулирования применяется для

синтеза систем управления при недостаточной информации об объекте управления, неточном или неполном описании решаемой проблемы, поскольку не требует для синтеза регуляторов модели объектов управления [1].

Стоит отметить тот факт, что применение нечеткой логики является эффективным как при проектировании нестационарных систем управления, так и для случаев, когда в системе управления требуется уделять особое внимание различным режимам работы [2].

Ключевое направление деятельности на начальном этапе проектирования системы управления на базе нечеткой логики — это выбор функции принадлежности.

В нечеткой логике для задания функции принадлежности, которые задаются пользователем, используют ряд типовых форм для решения задач по построению систем экспертной оценки, разработке регуляторов, систем автоматического регулирования (САУ). Разработка САУ обусловлена, с одной стороны, необходимостью повышения качества управления при минимальных затратах на создание и эксплуатацию систем, а с другой стороны, усложнением структуры объекта управления, функций, выполняемых им, и, как следствие, увеличением факторов неопределенности, которые необходимо учитывать для управления объектом [3].

В широком смысле, автоматизированные регуляторы на нечеткой логике активно применяются в нелинейных системах или в системах с нелинейными внешними воздействиями, в системах с большим временем задержки [4].

Ключевой задачей, лежащей в основе системы управления электроприводом на основе нечеткой логики, является определение наиболее подходящей из основных функций принадлежности.

Процесс подбора функции принадлежности позволяет как аналитически, так и

графически оценить, насколько точно и в полном объеме будет выполняться контроль и регулирование работы электропривода.

Немаловажными составляющими в процессе проектирования являются проработка алгоритма работы системы управления электроприводом на нечеткой логике, формирование основных составляющих модели. Для этого на начальных этапах прорабатывается перечень параметров электродвигателя, которые спроектированная система управления должна регулировать.

Для обеспечения совместного последовательного функционирования основных блоков системы управления требуется проработать с математической точки зрения передаточные функции, оценить корректность их функционирования не только в эмпирическом, но и в графическом виде.

Актуальным вопросом в процессе проектирования системы управления электроприводом является разработка базы правил, по которым автоматизированной системой управления будет выполняться корректировка параметров нечеткого множества.

В целом выполнение выше перечисленных условий позволит разработать скоростную, эффективную систему управления для привода продольной подачи токарного станка с ЧПУ на нечеткой логике.

Анализ эффективности совместно используемых функций принадлежности

Проектирование системы управления — многокомпонентный процесс. На начальном этапе работы требуется определить наиболее эффективную функцию принадлежности, сформулировать и эмпирически проверить передаточные функции, способствующие функционированию системы управления.

Важно наладить работу системы управления таким образом, чтобы алгоритмы ее работы исправно функционировали при высокой динамике реализации технологических процессов, а эффект выразился в экономичном использовании ресурса электродвигателя.

Опираясь на заключения, сформулированные в источнике [5], выявим, что в основе системы управления продольной подачи токарного станка с ЧПУ на нечеткой логике наиболее целесообразно применить совместно используемые функции принадлежности.

Графически поверхность отклика представлена на рисунке 1.

Оценивая результаты построения, а также анализируя выводы, полученные в источнике [5], можно сделать вывод, что полученная разработка способна функционировать без сбоев на всех этапах технологического процесса обработки детали.

Разработка нечеткой системы управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ

Обработка детали резанием сопровождается комплексом взаимодействующих на процесс явлений.

К подобным следует отнести механические, термические, тепловые и прочие явления.

Параметры, которые позволяют количественно оценивать данные факторы токарной обработки, недоступны для измерений. Для разрешения подобных случаев целесообразно разработать систему управления электроприводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на базе нечеткой логики.

Применение подобного рода систем управления способствует оптимизации процессов ресурсосбережения, применяемых в процессе работы электроприводов. Важным направлением является повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции за счет повышения качества обработки поверхностей выпускаемых деталей.

Первоначальным важным этапом работы является подбор наиболее эффективного по своим техническим характеристикам синхронного электропривода. Общая кинематическая схема представлена на рисунке 2.

Проведенный анализ технических характеристик показал, что целесо-

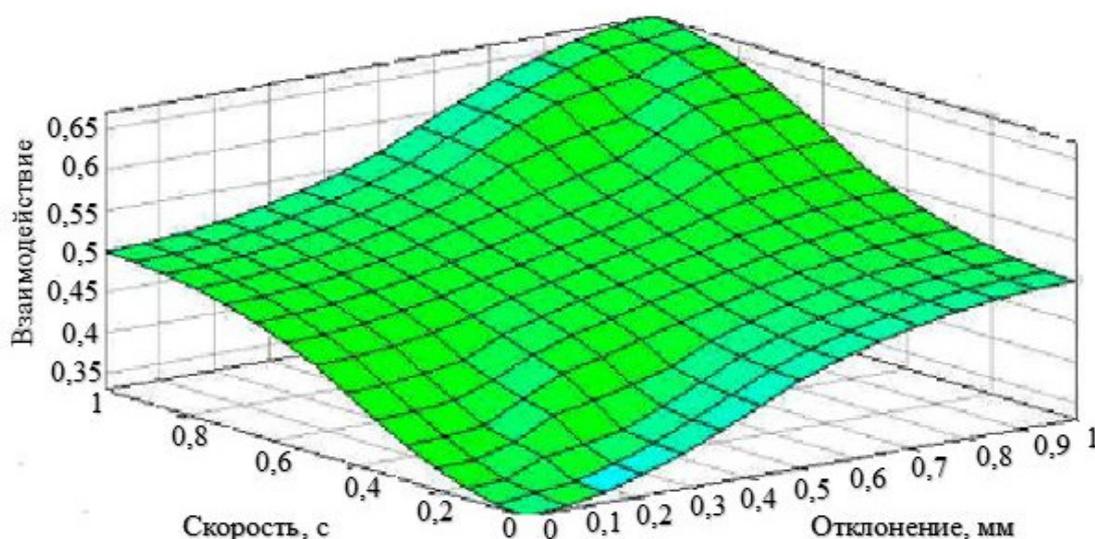


Рисунок 1. Поверхность отклика на совместно используемые сигмоидальные функции принадлежности

Figure 1. Surface response to shared sigmoidal accessory functions

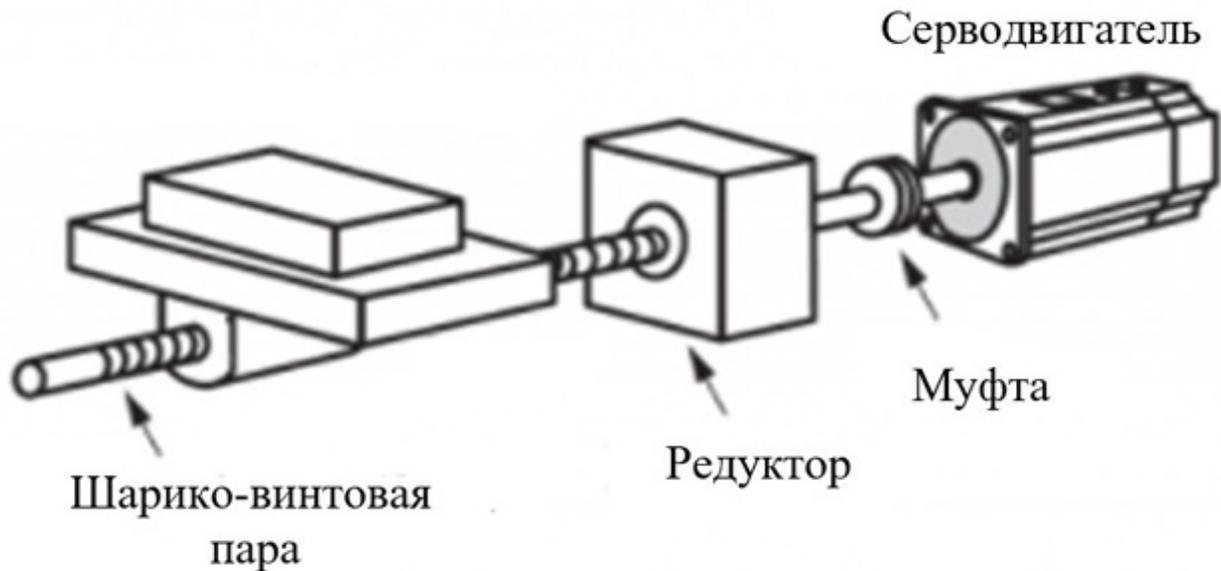


Рисунок 2. Кинематическая схема синхронного двигателя

Figure 2. Kinematic diagram of synchronous motor

образно применить синхронный электродвигатель А9-54-ЕН/4096.

Функционирование системы управления обеспечивается на основании численных значений параметров выбранного электродвигателя, которые представлены в таблице 1. Представленные данные числовых параметров позволят выполнять автоматический расчет передаточных функций. Их наличие обеспечит регулирование выявленных несоответствий ско-

рости вращения синхронного электродвигателя на любом этапе реализации технологического процесса обработки детали.

Полученные результаты расчетов позволяют выполнить проектирование разработки. Принципиальная схема системы управления продольной подачи токарного станка с ЧПУ представлена на рисунке 3.

Таблица 1. Технические характеристики синхронного электродвигателя А9-54-30-ЕН/4096

Table 1. Synchronous motor specifications А9-54-30-ЕН/4096

Направление показателя	Единица измерения	Количественный показатель
Сопротивление обмотки	Ом	2
Момент инерции	кг · см ²	47,6
Максимальное число оборотов	об/мин	3200
Максимальный ток	А	15,2
Максимальный момент	Нм	18
Номинальное число оборотов	об/мин	3000
Номинальный ток	А	4,5
Номинальный момент	Нм	6,9
Номинальная мощность	Вт	2,1
Статический ток	А	5,8
Статический момент	Нм	9

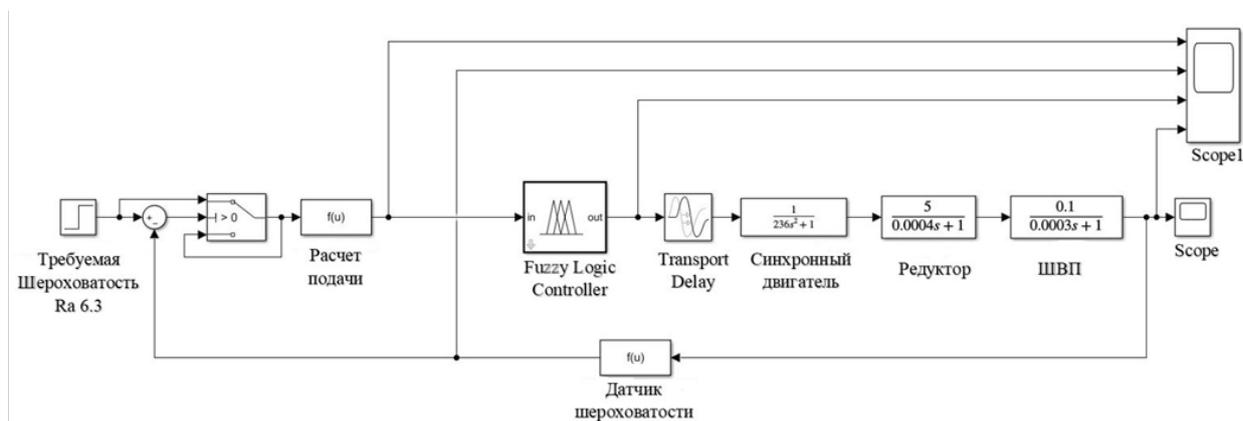


Рисунок 3. Принципиальная схема управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на базе нечеткой логики

Figure 3. NC lathe longitudinal feed drive control schematic diagram based on fuzzy logic

Представленная система регулирования позволяет обеспечить регулирование показателя скорости вращения синхронного электродвигателя, скорости режущего инструмента, а также выполнить контроль шероховатости поверхности детали на всех этапах реализации технологического процесса посредством применения нечеткой логики.

Система управления выполняет свои функции следующим образом.

Первоначально требуется задать требуемую шероховатость согласно технологическому процессу. На основании полученных данных система рассчитывает величину скорости изменения показателя шероховатости при помощи формулы:

$$Ra = \frac{43,9 \cdot S^{1,88}}{r^{0,97}}, \quad (1)$$

где Ra — средняя шероховатость обработанной поверхности, мкм;

S — подача, мм/об;

r — радиус при вершине режущей пластины резца, мм [6].

Полученная зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности от величины скорости перемещения кромки резца является основополагающей базы нечетких правил [7].

Следующий этап работы системы управления — это фазификация данных, полученных в результате расчета.

Согласно представленной на рисунке 3 схеме разработанная система посредством функционального блока «Транспортная задержка» обеспечивает задержку сигнала на заданную предварительно величину времени. Через указанный промежуток система управления начинает выполнять возложенные на нее функции, а именно выполнять процесс стабилизации показателя скорости вращения двигателя до оптимальных значений. Способствует этому передаточная функция [8]:

$$W_{mn}(p) = \frac{K_{mn}}{T_{mn} \cdot p + 1}, \quad (2)$$

где K_{mn} — коэффициент механической передачи;

T_{mn} — электромеханическая постоянная времени механической передачи.

Элемент системы управления блок «Редуктор» выполняет функции преобразовывающего устройства, обеспечивающего передачу крутящего момента с изменением его направления, скорости тяговой силы в зависимости от необходимого значения.

Результат корректировки показателя скорости вращения синхронного электродвигателя автоматически запускает процесс стабилизации работы двигателя на всех этапах технологического процесса. Далее система управления при помощи

блока «Шарико-винтовая пара» обеспечивает преобразование вращательного движения в поступательное при помощи передаточной функции (3):

$$W_{en}(p) = \frac{K_{en}}{T_{en} \cdot p + 1}, \quad (3)$$

где K_{en} — коэффициент винтовой пары;
 T_{en} — электромеханическая постоянная времени винтовой пары.

Далее после полученных результатов система управления приступает ко второму этапу проверки, контролируя качество обработанной поверхности посредством представленного в принципиальной модели блока «Датчик шероховатости». Массив поступивших в систему управления данных суммируется посредством модуля «Sum».

На завершающем этапе полученные численные результаты передаются в функциональный блок «Switch», посредством которого система управления выполняет анализ поступившей информации по шероховатости обработанной поверхности, после чего принимает решение, по какому алгоритму продолжить работу. Предусмотрено два основных варианта.

Первый вариант алгоритма работы применим в том случае, если полученные результаты корректировки качества обра-

ботки поверхности входят в поле допуска шероховатости. В таком случае данные принимаются системой управления, сигнал датчика шероховатости на дальнейшую корректировку показателя скорости вращения и перемещения режущего инструмента не подается для рассматриваемого прохода технологического процесса.

Второй вариант алгоритма работы применяется в случае, если показатели шероховатости не совпадают с требуемыми. Для устранения несоответствия датчик шероховатости подает сигнал на дальнейшую корректировку, после чего автоматически запускается алгоритм управления синхронным электродвигателем представленный в статье.

Предложенная система управления осуществляет фаззификацию и дефаззификацию массива полученных числовых данных при помощи набора нечетких правил, которые представлены в таблице 2.

Разработанная в рамках исследования система управления продольной подачи токарного станка с ЧПУ на нечеткой логике ляжет в основу дальнейшей разработки следящей системы за показателями точности и качества обработки поверхности с использованием нечеткой логики.

Таблица 2. Блок правил системы управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на базе нечеткой логики

Table 2. CNC longitudinal lathe drive control system rule block based on fuzzy logic

Формулировка нечеткого правила в MATLAB	Расшифровка нечеткого правила
If (input1 is mf1) then (output1 is mf3)	Если отклонение меньше и скорость меньше, то воздействие меньше
If (input1 is mf3) then (output1 is mf1)	Если отклонение норма и скорость норма, то воздействие норма
If (input1 is mf2) then (output1 is mf2)	Если отклонение больше и скорость больше, то воздействие больше

Выводы

В рамках проведенного исследования выполнено проектирование принципиальной схемы системы управления продольной подачей токарного станка с ЧПУ на базе нечеткой логики. Принципы работы системы построены на основе совместно используемых функций принадлежности, построенных на едином основании.

Проработан алгоритм функционирования системы управления, который строится на основании передаточных функций. Их наличие обеспечивает слаженность и последовательность функционирования составных блоков системы. Эффективность применения передаточ-

ных функций подтверждена как графически, так и эмпирически.

На завершающем этапе проработана логическая составляющая системы управления. Ее функционирование обеспечивается за счет применения блока нечетких правил, диапазон работы которых охватывает три основных варианта, которые могут возникнуть в процессе выполнения регулирования и стабилизации работы электропривода на каждом этапе реализации технологического процесса обработки детали. Сигнал на определение варианта алгоритма работы подается за счет специализированного датчика шероховатости поверхности.

Список источников

1. Земцов А.Ф., Грязнов И.Е., Поступаева С.Г. Сравнительный анализ и исследование работы классического ПИД-регулятора с «нечеткими» его разновидностями // Известия ВолГТУ. 2018. № 2. С. 32-36.

2. Копылов В.И., Муравьев Д.И., Коломыцев В.Г., Рустамханова Г.И. Исследование классических и нечетких ПИД-регуляторов для нестационарных объектов управления // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-3. С. 532-536.

3. Рутковская Д.К., Пилиньский М.К., Рутковский Л.Б. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2014. 384 с.

4. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб: Университет ИТМО, 2017. 81 с.

5. Хамитов Р.Н., Зыкин П.В. База знаний и блок правил при нечетком регулировании качества поверхности при токарной обработке // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 14–15 мая 2021 г.). 2021. С. 108-112.

6. Анухин И.В., Анухин В.И., Любомудров С.А., Мурашкин С.Л. Выбор режимов резания труднообрабатываемых

жаропрочных интерметаллидных сплавов тепловизионным методом // СТИН: научно-технический журнал. 2015. № 1. С. 16-20.

7. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики (с Изменениями № 1, 2). М.: Стандартинформ, 2018. 7 с.

8. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент. М.: Машиностроение, 2014. 520 с.

References

1. Zemtsov A.F., Gryaznov I.E., Postupaeva S.G. Sravnitel'nyi analiz i issledovanie raboty klassicheskogo PID-regulyatora s «nechetkimi» ego raznovidnostyami [Comparative Analysis and Investigation of the Work of the Classical Pid Regulator With «Fuzzi» Its]. *Izvestiya VolGTU — Izvestia Volgograd State Technical University*, 2018, No. 2, pp. 32-36. [in Russian].

2. Kopylov V.I., Murav'ev D.I., Kolomytsev V.G., Rustamkhanova G.I. Issledovanie klassicheskikh i nechetkikh PID-regulyatorov dlya nestatsionarnykh ob'ektov upravleniya [The Study of Classical and Fuzzy Pid-Controllers for Time-Dependent Control Objects]. *Fundamental'nye issledovaniya — Fundamental Research*, 2016, No. 11-3, pp. 532-536. [in Russian].

3. Rutkovskaya D.K., Piliñ'skii M.K., Rutkovskii L.B. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural Networks, Genetic Algorithms, and Fuzzy System]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2014. 384 p. [in Russian].
4. Demidova G.L., Lukichev D.V. *Regulyatory na osnove nechetkoi logiki v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi ob'ektami* [Fuzzy Logic Regulators in Technical Facility Management Systems]. Saint-Petersburg, Universitet ITMO, 2017. 81 p. [in Russian].
5. Khamitov R.N., Zykin P.V. Baza znaniy i blok pravil pri nechetkom regulirovaniy kachestva poverkhnosti pri tokarnoi obrabotke [Knowledge Base and Rule Block for Fuzzy Surface Quality Control during Turning]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye voprosy energetiki»*, Omsk, 14–15 maya 2021 g. [Materials of All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation «Topical Issues of Energy», Omsk, May 14–15, 2021]. 2021, pp. 108-112. [in Russian].
6. Anukhin I.V., Anukhin V.I., Lyubomudrov S.A., Murashkin S.L. Vybór rezhimov rezaniya trudnoobrabatyvaemykh zharoprochnykh intermetallidnykh splavov teplovizionnym metodom [Selection of Cutting Modes of Hard-to-Process Heat-Resistant Intermetallic Alloys by Thermal Imaging Method]. *STIN: nauchno-tekhnicheskii zhurnal — Russian Engineering Research*, 2015, No. 1, pp. 16-20. [in Russian].
7. GOST 2789-73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki (s Izmeneniyami № 1, 2)* [State Standard 2789-73. Surface Roughness. Parameters and Characteristics (with Changes Nos. 1,2)]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 7 p. [in Russian].
8. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A., Kirsanov S.V., Grigor'ev S.N., Skhirtladze A.G. *Rezhushchii instrument* [Cutting Tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 520 p. [in Russian].



Олег Сергеевич Коледин
Oleg S. Koledin

*аспирант кафедры «Технология нефти и газа»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*



Михаил Юрьевич Доломатов
Michail Yu. Dolomatov

*доктор химических наук, профессор,
профессор кафедры
«Технология нефти и газа»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет;
профессор кафедры физической
электроники и нанопластики, Башкирский
государственный университет,
Уфа, Россия*



**Элла Александровна
Ковалева**
Ella A. Kovaleva

*кандидат химических
наук,
доцент кафедры
«Информационные
технологии и прикладная
математика»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*



**Роберт Венерович
Гарипов**
Robert V. Garipov

*магистрант кафедры
«Технология нефти
и газа»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*



**Малик Рамилевич
Валеев**
Malik R. Valeev

*магистрант кафедры
«Технология нефти
и газа»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*

УДК 547.313

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-92-102

**МОДЕЛЬ QSPR ДЛЯ ПРОГНОЗА ОКТАНОВЫХ ЧИСЕЛ
УГЛЕВОДОРОДОВ РЯДА АЛКЕНОВ
ПО ТОПОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ
МОЛЕКУЛ**

Актуальность

Моделирование, оптимизация и проектирование процессов в технологиях нефтепереработки и органического синтеза, а также внедрение новых химико-технологических процессов с участием углеводородных систем связаны с расчетом физико-химических свойств (ФХС) жидкостей и газов. Точность играет определяющую роль в расчете процессов переработки нефти и органического синтеза, а также оптимизации реакторных процессов, фракционирующей и теплообменной аппаратуры. Несмотря на доступность баз данных ФХС поиск адекватных исходных данных занимает продолжительное время на стадии всего процесса разработки или проектирования, так как ФХС многих углеводородов остается неизвестными.

Цель исследования

Разработать Quantitative Structure-Property Relationship (QSPR) модели октановых чисел углеводородов ряда алкенов.

Методы исследования

Для прогноза октановых чисел нормальных и замещенных алкенов — компонентов бензина каталитического крекинга предложена нелинейная многомерная регрессионная модель Quantitative Structure-Property Relationship (QSPR). Объектами исследования стали 30 углеводородов ряда алкенов, отбор в базовую и тестовую выборки сделан случайным образом с использованием компьютерной базы данных физико-химических свойств. Модель связывает с октановыми числами набор дескрипторов — топологических характеристик их молекулярных графов: индекс Винера, индекс Рандича и сумма квадратов собственных значений матрицы смежности, влияющие на октановые числа и отражающие основные структурно-химические факторы, такие как протяженность и разветвленность углеродного скелета и энергетические параметры молекул.

Результаты

Адекватность моделей подтверждена статистической обработкой данных, так коэффициент детерминации модели равен 0.856. Для характеристики качества модели QSPR вычислен коэффициент множественной корреляции $r = 0.925$, что подтверждает сильную связь предложенных топологических характеристик молекул углеводородов с их октановыми числами. Для оценки статистической достоверности модели рассчитана и использована корреляционная поправка. Максимальные абсолютная и относительная ошибка для тестовой выборки октановых чисел составляют 4.0 ед. и 4.1 % соответственно. Статистическим показателем, позволяющим судить об адекватности прогнозируемых значений, об их соответствии справочным данным, является стандартная ошибка регрессии 6.5 ед. Небольшое значение стандартной ошибки регрессии по сравнению со значениями зависимой переменной подтверждает адекватность предложенной модели. Модель адекватно описывает октановые числа алкенов линейного и разветвленного строения и может быть использована для прогноза октановых чисел компонентов бензинов.

Ключевые слова: алкены, октановое число, прогнозирование, модель QSPR, топологический дескриптор, индекс Винера, индекс Рандича, собственное значение, топологическая матрица, регрессия

THE QSPR MODEL FOR PREDICTION OF OCTANE NUMBERS OF HYDROCARBONS OF A SERIES OF ALKENES BY TOPOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MOLECULES

Relevance

Modeling, optimization and design of processes in the technology of oil refining and organic synthesis, as well as the use of new chemical and technological processes involv-

ing hydrocarbon systems with the calculation of physical and chemical properties (PCS) of liquids and gases. The accuracy of calculations plays an observed role in the calculations of oil refining and organic synthesis processes, as well as approximate reactor processes, fractionation and heat exchange equipment. Despite the availability of PCS databases, the search for adequate initial data takes a long time at the stage of the entire development or design process, since the PCS of many hydrocarbons remains unknown.

Aim of research

To develop a quantitative Structure-Property Ratio (QSPR) model for octane hydrocarbons of a series of alkenes.

Research methods

To predict the octane numbers of normal and substituted alkenes — components of catalytic cracking, a nonlinear multivariate regression model Quantitative Structure-Property Relationship (QSPR) is proposed. The objects of the study were 30 hydrocarbons of a number of alkenes, selection in the basic and test samples, made randomly using computer data of physical and chemical properties. The model associates a set of descriptors with the octane numbers — the topological characteristics of their molecular graphs: the Wiener index, the Randich index and the magnitude of the quadratic dependence of bone structure, which affect the octane numbers and reflect the main structural and chemical factors, such as the length and branching of the carbon skeleton, and sensitive parameters. molecules.

Results

The adequacy of the models was confirmed by statistical data processing, so the coefficient of determining the models is 0.856. For the quality characteristics of the QSPR model, the multiple correlation coefficient $r = 0.925$ was calculated, which suggested a force relationship between the proposed topological characteristics of hydrocarbon molecules and their octane numbers. To assess the statistical stability of the model, a correlation correction was used. The maximum absolute and relative errors for octane number sampling tests are 4.0 units and 4.1 %, respectively. The statistical calculation, which makes it possible to judge the adequacy of the predicted indicators, their compliance with the reference data, is the standard regression error of 6.5 units. The small value of the standard error of the regression in comparison with the values of the dependence of the applicable adequacy of the proposed model. The model adequately uses the octane numbers of linear and branched alkenes and can be used to predict the octane numbers of gasoline components.

Keywords: alkenes, octane number, prediction, QSPR model, topological descriptor, Wiener index, Randic index, eigenvalue, topological matrix, regression

Введение

Известно, что алкены являются компонентами бензиновых фракций, образующихся в процессе каталитического крекинга высококипящих фракций вакуумной перегонки нефти. Высокооктановые бензины содержат большое количество алкенов до 25–30 %, которые повышают значение октановых чисел бензиновой фракции. Таким образом, прогнозирование октанового числа алкенов компонентов высокооктановых бензинов является актуальной задачей.

Как следует из эксперимента и теоретического изучения явления горения

топлива [1], при использовании моторного топлива с низким октановым числом может возникнуть особый режим сгорания топливно-воздушной смеси, называемый детонацией [2, 3]. При таком режиме часть смеси мгновенно самовоспламеняется, в результате чего скорость распространения пламени возрастает до 1500–2500 м/с вместо 20–30 м/с, а давление повышается скачками. Такой перепад давления создает ударную волну, которая распространяется со сверхзвуковой скоростью [4], поэтому при детонационном сгорании происходят перегрев и преждевременный износ двигателя.

Для предотвращения явления детонации необходимо применять топливо с высокой химической стойкостью в условиях камеры сгорания, то есть обладающее необходимыми антидетонационными свойствами [5, 6].

Детонационную стойкость моторных топлив принято выражать октановым числом (ОЧ). Согласно общепринятым стандартам, этот показатель численно равен содержанию изооктана в объемных процентах в эталонной смеси с *n*-гептаном, которая по детонационной стойкости эквивалентна испытываемому бензину. При этом предполагается, что процесс детонации протекает в рабочей камере стандартного одноцилиндрового двигателя.

Наряду с прямым определением существуют косвенные лабораторные способы оценки ОЧ смесей и индивидуальных углеводородов, например, специальная техника, использующая ИК спектроскопию, в частности анализатор ERASPEC [7].

В настоящее время для прогноза различных физико-химических свойств органических соединений, в том числе октанового числа можно эффективно применять модели «структура — свойство» — Quantitative Structure-Property Relationship (QSPR) [8–10]. Так, А.Т. Балабаном, а также Е.А. Смоленским и др. разработаны группы моделей [11–15], использующие топологические индексы (ТИ) и физико-химические параметры молекул для оценки октанового числа ряда алканов, алкенов и циклоалканов — компонентов моторных топлив. Несмотря на высокую эффективность таких моделей в случае с алканами погрешности значительны.

Цель данной работы — разработка QSPR модели октановых чисел углеводородов ряда алкенов.

Методика эксперимента

В качестве характеристики протяженности углеродного скелета молекулы, влияющей на ОЧ используем индекс Винера [16]:

$$W = 0.5 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}, \quad (1)$$

где W — индекс Винера;

n — число вершин в соответствующем молекуле графе;

d_{ij} — кратчайшее расстояние между вершинами i и j .

В качестве энергетических характеристик молекул используем сумму квадратов собственных значений топологической матрицы, характеризующей хюккелевский спектр молекулярного графа, примененный ранее для прогнозирования октановых чисел алканов [17]:

$$L = \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2. \quad (2)$$

Для характеристики разветвленности молекул используется индекс Рандича, который характеризует разветвленность углеродного скелета и различается для изомеров углеводородов (индекс молекулярной связности) и вычисляется по формуле [16]:

$$\rho = \sum_{\text{по всем ребрам}} \frac{1}{\sqrt{v_i \cdot v_j}}, \quad (3)$$

где v_i — число ребер графа отходящих от i -ой вершины;

v_j — число ребер графа отходящих от j -ой вершины.

Исходя из изложенного, рассмотрим полуэмпирическую модель QSPR в виде функции (4):

$$q = a_0 + a_1 W + a_2 L + a_3 R + a_4 WL + a_5 LR + a_6 WR, \quad (4)$$

где q — октановое число;

a_n , ($n = 0, \dots, 6$) — коэффициенты модели QSPR, полученные методом наименьших квадратов.

В качестве объектов исследования рассмотрены 30 углеводородов ряда алкенов, которые входят в состав бензинов каталитического крекинга. Информация по ОЧ выбиралась из базы данных [18–20]. Отбор углеводородов в базовую и тестовую выборки проводился случайным образом.

В таблице 1 приведены соответствующие значения индексов Винера (W),

Рандича (R), суммы квадратов собственных значений матрицы смежности (L) для исследуемого ряда из 30 углеводородов.

Результаты и их обсуждение

В таблице 2 приведены результаты обработки данных методом наименьших квадратов и соответствующие значения коэффициентов трехфакторной модели (4).

Для того, чтобы определить с какой степенью точности регрессионное уравнение (4) аппроксимирует исходные данные, нами был вычислен коэффициент детерминации $R^2 = 0.856$ [18, 19]. Для характеристики качества модели QSPR был вычислен коэффициент множественной корреляции $R = 0.925$ для октанового числа, подтверждающий сильную связь

Таблица 1. Топологические индексы для алкенов

Table 1. Topological indices for alkenes

Вещество	W	R	L
2,3,3-триметил-1-бутен	39	2,603	10,499
2,3,3-триметил-1-пентен	58,5	3,164	12,499
2,3-диметил-1-бутен	26,5	2,296	8,499
2,3-диметил-1-пентен	43	2,834	10,499
2,5-диметил-2-гексен	66,5	3,259	12,499
2-метил-1-гексен	49	2,914	10,499
3,4-диметил-цис-2-пентен	41	2,809	10,499
3-метил-транс-2-пентен	27	2,426	8,499
4-метил-1-гексен	47	2,917	10,499
4-метил-транс-2-гексен	45	2,936	10,499
4-метил-транс-2-пентен	28	2,398	8,499
5-метил-транс-2-гексен	47	2,881	10,499
транс-3-гексен	30,5	2,564	8,499
этен	0,5	0,5	0,5
пропен	3	0,985	2,5
1-бутен	8,5	1,523	4,499
2-бутен	8	1,488	4,5
2-метил-1-бутен	16	1,914	6,499
3-метил-1-бутен	16	1,896	6,499
2-метил-2-бутен	15	1,866	6,5
2-гексен	31	2,526	8,5
3-гексен	30,5	2,564	8,499
2-метил-1-пентен	29,5	2,414	8,5
3-метил-1-пентен	28,5	2,434	8,5
2-метил-2-пентен	27,5	2,404	8,499
3-метил-2-пентен	27	2,426	8,499
4-метил-2-пентен	28	2,398	8,499
2-этил-1-бутен	28,5	2,474	8,5
3-гептен	50	3,064	10,499
2-метил-2-гексен	46	2,904	10,499
3-метил-2-гексен	45	2,926	10,499

Таблица 2. Коэффициенты модели (4)

Table 2. Model (4) coefficients

a_n	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
значение	108,42	-1,69	2,73	-18,99	0,07	2,91	-0,25

предложенных топологических характеристик молекул углеводородов с их ОЧ.

Для оценки статистической достоверности модели QSPR использовали корреляционную поправку:

$$S_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}},$$

где S_r — корреляционная поправка;

r — коэффициент множественной корреляции;

n — число исследуемых соединений.

В нашем случае $n = 30$, $R^2 = 0.856$, получаем $S_r = 0.0717$ и $\left| \frac{r}{s_r} \right| = \left| \frac{0.856}{0.0717} \right| = 11.94 \geq 3$

для октанового числа, следовательно, связь нельзя считать случайной, и регрессионная зависимость проходит через центр облака исходных точек [20].

В таблице 3 приведено сравнение справочных и рассчитанных значений ОЧ алкенов, а также абсолютная и относительная погрешности.

Таблица 3. Сравнение справочных и расчетных значений октановых чисел для алкенов (обучающая выборка)

Table 3. The comparison of reference and calculated values of octane numbers for alkenes (training sample)

Вещество	ОЧ (спр.), ед.	ОЧ (расч.), ед.	$\Delta_{\text{абс}}$, ед.	$\Delta_{\text{отн}}$, %
2,3,3-триметил-1-бутен	108	104,7	3,3	3,0
2,3,3-триметил-1-пентен	105	103,9	1,1	1,0
2,3-диметил-1-бутен	102	100,7	1,3	1,3
2,3-диметил-1-пентен	98	98,5	0,5	0,6
2,5-диметил-2-гексен	95	91,2	3,8	4,0
2-метил-1-гексен	86	88,5	2,5	3,0
3,4-диметил-цис-2-пентен	101	101,8	0,8	0,8
3-метил-транс-2-пентен	97	99,7	2,7	2,8
4-метил-1-гексен	86	86,0	0,0	0,0
4-метил-транс-2-гексен	94	95,3	1,3	1,4
4-метил-транс-2-пентен	98	98,1	0,1	0,1
5-метил-транс-2-гексен	90	91,9	1,9	2,1
транс-3-гексен	92	93,5	1,5	1,7
этен	97,3	100,1	2,8	2,9
пропен	101,8	98,4	3,4	3,3
1-бутен	98,8	96,8	2,0	2,0
2-бутен	101,6	98,0	3,6	3,6
2-метил-1-бутен	98,3	98,7	0,4	0,4
3-метил-1-бутен	97,5	98,7	1,2	1,3
2-метил-2-бутен	97,3	100,6	3,3	3,3
2-гексен	92,7	92,8	0,1	0,1
3-гексен	94	93,5	0,5	0,5
2-метил-1-пентен	94,2	95,5	1,3	1,4
3-метил-1-пентен	96	97,2	1,2	1,2
2-метил-2-пентен	95,7	98,9	3,2	3,4
3-метил-2-пентен	97,2	99,7	2,5	2,6
4-метил-2-пентен	98,9	98,1	0,8	0,8
2-этил-1-бутен	99,3	97,1	2,2	2,2
3-гептен	90	86,8	3,2	3,6
2-метил-2-гексен	92	93,6	1,6	1,7
3-метил-2-гексен	92	95,3	3,3	3,6

Статистическим показателем, позволяющим судить об адекватности прогнозируемых значений, об их соответствии справочным данным, является стандартная ошибка регрессии, определяемая по формуле:

$$S_{\text{regression}} = \sqrt{\frac{\sum (q_{\text{calc.}} - q_{\text{ref.}})^2}{n - k - 1}},$$

где $q_{\text{ref.}}$ — справочное значение октанового числа;

$q_{\text{calc.}}$ — расчетное (полученное в результате прогноза) значение переменной;
 n — число наблюдений (алкенов);
 k — число членов уравнения регрессии.

В нашем случае $S_{\text{regression}} = 6.5$ ед.

Малая величина стандартной ошибки регрессии по сравнению со значениями зависимой переменной подтверждает адекватность предложенной модели (4).

Прогноз для веществ, не входящих в базовый ряд, представлен в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение справочных и расчетных значений октановых чисел для алкенов, не входящих в базовый ряд

Table 4. The comparison of reference and calculated values of octane numbers for alkenes not included in the base series

Вещество	ОЧ (спр.), ед.	ОЧ (расч), ед.	$\Delta_{\text{абс.}}$ ед.	$\Delta_{\text{отн.}}$ %
4-метил-2-гексен	97,6	95,3	2,3	2,4
5-метил-2-гексен	94,3	91,9	2,4	2,5
3-метил-3-гексен	96,2	97,0	0,8	0,8
3-этил-1-пентен	95,6	95,3	0,3	0,3
2,4-диметил-1-пентен	99,2	95,2	4,0	4,0
3,3-диметил-1-пентен	103,5	101,7	1,8	1,7
3,4-диметил-1-пентен	98,9	98,5	0,4	0,4
2,4-диметил-2-пентен	100	100,1	0,1	0,1
4,4-диметил-2-пентен	105,3	101,7	3,6	3,5
2-этил-3-метил-1-бутен	97	98,6	1,6	1,6
2-метил-2-гептен	79,8	83,0	3,2	4,1
3-этил-2-метил-1-пентен	99,5	96,3	3,2	3,2
2,4,4-триметил-2-пентен	102	103,7	1,7	1,6
2,4,4-триметил-2-пентен	103,5	103,7	0,2	0,1
3,4,4-триметил-2-пентен	103	106,2	3,2	3,1
4,4-диэтил-1-гептен	79,8	80,1	0,3	0,4
4-метил-2-гексен	97,6	95,3	2,3	2,4
5-метил-2-гексен	94,3	91,9	2,4	2,5
3-метил-3-гексен	96,2	97,0	0,8	0,8
3-этил-1-пентен	95,6	95,3	0,3	0,3
2,4-диметил-1-пентен	99,2	95,2	4,0	4,0
3,3-диметил-1-пентен	103,5	101,7	1,8	1,7
3,4-диметил-1-пентен	98,9	98,5	0,4	0,4
2,4-диметил-2-пентен	100	100,1	0,1	0,1
4,4-диметил-2-пентен	105,3	101,7	3,6	3,5
2-этил-3-метил-1-бутен	97	98,6	1,6	1,6
2-метил-2-гептен	79,8	83,0	3,2	4,1
3-этил-2-метил-1-пентен	99,5	96,3	3,2	3,2
2,4,4-триметил-2-пентен	102	103,7	1,7	1,6
2,4,4-триметил-2-пентен	103,5	103,7	0,2	0,1
3,4,4-триметил-2-пентен	103	106,2	3,2	3,1
4,4-диэтил-1-гептен	79,8	80,1	0,3	0,4

Из таблицы 4 следует, что абсолютные ошибки для тестовой выборки находятся в интервале $0.1 \leq \Delta_{abc} \leq 4.0$, относительные — в интервале $0.1 \leq \Delta_{отн} \leq 4.1$. Это означает, что модель (4) позволяет осуществлять прогноз октановых чисел углеводородов ряда алкенов, входящих в состав бензиновых фракций каталитического крекинга.

Выводы

Для определения октановых чисел углеводородов ряда алкенов разработана нелинейная многофакторная модель «структура — свойство». Данная модель позволяет наиболее адекватно оценить октановые числа углеводородов ряда алкенов по сравнению с известными моделями. В качестве топологических индексов используются индексы, харак-

теризующие протяженность углеродного скелета — индекс Винера, разветвленность углеродного скелета — индекс Рандича, а также сумма квадратов собственных значений матрицы смежности. Коэффициент детерминации модели равен 0.856. Разработанная модель может быть использована при проведении инженерных и научных прогнозов октановых чисел нормальных и изомерных алкенов, компонентов моторного топлива.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90085 «Прогнозирование физико-химических свойств углеводородных и гетероатомных компонентов нефтяных систем и моторных топлив».

Список источников

1. Шленский О.Ф., Сиренко В.С., Егорова Е.А. Режимы горения материалов. М.: Машиностроение, 2011. 220 с.
2. Фролов С.М. Быстрый переход горения в детонацию // Химическая физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31-44.
3. Емельянов В.Е., Скворцов В.К. Моторные топлива: антидетонационные свойства и воспламеняемость. М.: Техника, ГУМА ГРУПП, 2006. 192 с.
4. Фролов С.М. Наука о горении и проблемы современной энергетики// Российский химический журнал. 2009. Т. 52. № 6. С. 129-133.
5. Фролов С.М. Быстрый переход горения в детонацию // Химическая физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31-44.
6. da Silva A. Jr., Hauber J., Cancino L.R., Huber K. The Research Octane Numbers of Ethanol-Containing Gasoline Surrogates // Fuel. 2019. No. 243. P. 306-313.
7. Копыльцова А.Б., Тарасов Б.П., Клим О.В. Современная практика и проблемы применения промышленных и лабораторных спектрофотометрических анализаторов физико-химических свойств нефти и нефтепродуктов // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 51-55.

8. Баскин И.И., Маджидов Т.И., Варнек А.А. Введение в хемеоинформатику. Моделирование «структура — свойство». Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. 302 с.
9. Sanjay Kumar, Mamta Thakur, Naman Shah, Sarthak Jain. Structural Modelling of Hydrocarbons for the Prediction of Octane Number and Designing of Sustainable Synthetic Fuel // International Conference on Futuristic Trends in Mechanical Engineering (ICOFTIME2020), 24-25th April 2020. 2020. P. 1-8.
10. Long Jiao, Huanhuan Liu, Le Qu, Zhiwei Xue, Yuan Wang, Yanzhao Wang, Bin Lei, Yunlei Zang, Rui Xu, Zhen Zhang, Hua Li, Omar Abdulaziz, Ahmed Alyemeni. QSPR Studies on the Octane Number of Toluene Primary Reference Fuel Based on the Electrotopological State Index // ACS Omega. 2020. No. 5. P. 3878-3888.
11. Balaban A.T., Kier L.B., Joshi N. Structure-Property Analysis of Octane Numbers for Hydrocarbons (Alkanes, Cycloalkanes, Alkenes) // Match. 1992. No. 28. P. 13-27.
12. Смоленский Е.А., Власова Г.В., Лапидус А.Л. Исследование зависимости между структурой и октановыми числами углеводородов // Доклады Академии наук. 2004. № 397. С. 219-223.

13. Смоленский Е.А., Рыжов А.Н., Бавыкин В.М., Мышенкова Т.Н., Лapidус А.Л. Моделирование октановых чисел углеводородов с помощью оптимальных топологических индексов для их топологических эквивалентов // Изв. АН. Сер. хим. 2007. № 9. С. 1619-1632.

14. Jabir H. Al-Fahemi, Nahla A. Albis, Elshafie A.M. Gad QSPR Models for Octane Number Prediction // Journal of Theoretical Chemistry. 2014. No. 1. P. 1-6.

15. Smolenskiy E.A., Ryzhov A.N., Bavykin V.M., Myshenkova T.N., Lapidus A.L. Octane Numbers (ONs) of Hydrocarbons: a QSPR Study Using Optimal Topological Indices for the Topological Equivalents of the ONs* // Russian Chemical Bulletin, International Edition. 2007. Vol. 56, No. 9. P. 1681-1693.

16. Доломатов М.Ю., Коледин О.С., Ковалева Э.А. Двухфакторная модель QSPR для прогноза октановых чисел алканов по топологическим дескрипторам и числу электронов в молекуле // Башкирский химический журнал. 2020. Т. 27. № 1. С. 56-60.

17. Доломатов М.Ю., Коледин О.С., Ковалева Э.А., Арсланбекова С.А. Прогноз октановых чисел замещенных алканов по топологическим характеристикам молекул // Бутлеровские сообщения. 2019. Т. 59. № 7. С. 69-75.

18. Доломатов М.Ю., Аубекеров Т.М., Вагапова Э.В., Ахтямова К.Р., Кузнецов Е.А. Взаимосвязь теплоемкости и топологических характеристик соединений в ряду замещенных аренов // Журнал физической химии. 2019. Т. 93. № 2. С. 170-175.

19. Доломатов М.Ю., Аубекеров Т.М., Вагапова Э.В., Ахтямова К.Р. Взаимосвязь теплоемкости и топологических характеристик молекул в рядах газообразных замещенных производных алкенов при давлении 100 кПа и в интервале температур от 298.15 до 1000 К // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54, № 4. С. 624-630. (Q2) DOI: 10.31857/S0044453720110059 RSCI.

20. Доломатов М.Ю., Аубекеров Т.М., Ковалева Э.А., Ахтямова К.Р., Вагапова Э.В., Коледин О.С. Корреляция

«Структура — свойство» для расчета критических давлений фазовых переходов «жидкость — пар» по топологическим характеристикам молекул алкенов // Журнал физической химии. 2020. Т. 94. № 10. С. 1445-1449. (Q4) DOI: 10.31857/S0044453720100088_RSCI.

References

1. Shlenskii O.F., Sirenko V.S., Egorova E.A. *Rezhimy goreniya materialov* [Combustion Modes of Materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 220 p. [in Russian].

2. Frolov S.M. Bystryi perekhod goreniya v detonatsiyu [Fast Transition from Combustion to Detonation]. *Khimicheskaya fizika — Russian Journal of Physical Chemistry*, 2008, Vol. 27, No. 6, pp. 31-44. [in Russian].

3. Emel'yanov V.E., Skvortsov V.K. *Motornye topliva: antidetonatsionnye svoystva i vosplamenyayemost'* [Motor Fuels: Anti-Knock Properties and Flammability]. Moscow, Tekhnika, TUMA GRUPP, 2006. 192 p. [in Russian].

4. Frolov S.M. Nauka o goreni i problemy sovremennoi energetiki [Combustion Science and Problems of Modern Energy]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal — Russian Chemical Journal*, 2009, Vol. 52, No. 6, pp. 129-133. [in Russian].

5. Frolov S.M. Bystryi perekhod goreniya v detonatsiyu [Fast Transition from Combustion to Detonation]. *Khimicheskaya fizika — Chemical Physics*, 2008, Vol. 2, No. 6, pp. 31-44. [in Russian].

6. da Silva A. Jr., Hauber J., Cancino L.R., Huber K. The Research Octane Numbers of Ethanol-Containing Gasoline Surrogates. *Fuel*, 2019, No. 243, pp. 306-313.

7. Kopyl'tsova A.B., Tarasov B.P., Klim O.V. Sovremennaya praktika i problemy primeneniya promyshlennykh i laboratornykh spektrofotometricheskikh analiza-torov fiziko-khimicheskikh svoystv nefi i nefteproduktov [Modern Practice and Problems of Application of Industrial and Laboratory Spectrophotometric Analyzers of Physical and Chemical Properties of Oil and Oil Products]. *Izmeritel'naya tekhnika —*

Measurement Techniques, 2013, No. 6, pp. 51-55. [in Russian].

8. Baskin I.I., Madzhidov T.I., Varnek A.A. *Vvedenie v khemeoinformatiku. Modelirovanie «struktura — svoistvo»* [Introduction to Hemeoinformatics. Modeling «Structure — Property»]. Kazan, Izd-vo Kazan. un-ta, 2015. 302 p. [in Russian].

9. Sanjay Kumar, Mamta Thakur, Naman Shah, Sarthak Jain. Structural Modelling of Hydrocarbons for the Prediction of Octane Number and Designing of Sustainable Synthetic Fuel. *International Conference on Futuristic Trends in Mechanical Engineering (ICOFTIME2020) 24-25th April 2020*. 2020. P. 1-8.

10. Long Jiao, Huanhuan Liu, Le Qu, Zhiwei Xue, Yuan Wang, Yanzhao Wang, Bin Lei, Yunlei Zang, Rui Xu, Zhen Zhang, Hua Li, Omar Abdulaziz, Ahmed Alyemeni. QSPR Studies on the Octane Number of Toluene Primary Reference Fuel Based on the Electrotological State Index. *ACS Omega*, 2020, No. 5, pp. 3878-3888.

11. Balaban A.T., Kier L.B., Joshi N. Structure-Property Analysis of Octane Numbers for Hydrocarbons (Alkanes, Cycloalkanes, Alkenes). *Match*, 1992, No. 28, pp. 13-27.

12. Smolenskii E.A., Vlasova G.V., Lapidus A.L. Issledovanie zavisimosti mezhdru strukturoi i oktanovymi chislami uglevodorodov [A Study of the Structure-Octane Number Relationship for Hydrocarbons]. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk — Doklady Physical Chemistry*, 2004, No. 397, pp. 219-223. [in Russian].

13. Smolenskii E.A., Ryzhov A.N., Bavykin V.M., Myshenkova T.N., Lapidus A.L. Modelirovanie oktanovykh chisel uglevodorodov s pomoshch'yu optimal'nykh topologicheskikh indeksov dlya ikh topologicheskikh ekvivalentov [Octane Numbers (ONs) of Hydrocarbons: a Qspr Study Using Optimal Topological Indices for the Topological Equivalents of the ONs]. *Izv. AN. Ser. Khim. — Russian Chemical Bulletin*, 2007, No. 9, pp. 1619-1632. [in Russian].

14. Jabir H. Al-Fahemi, Nahla A. Albis, Elshafie A.M. Gad QSPR Models for Octane

Number Prediction. *Journal of Theoretical Chemistry*, 2014, No. 1, pp. 1-6.

15. Smolenskii E.A., Ryzhov A.N., Bavykin V.M., Myshenkova T.N., Lapidus A.L. Octane Numbers (ONs) of Hydrocarbons: a QSPR Study Using Optimal Topological Indices for the Topological Equivalents of the ONs*. *Russian Chemical Bulletin, International Edition*, 2007, Vol. 56, No. 9, pp. 1681-1693.

16. Dolomatov M.Yu., Koledin O.S., Kovaleva E.A. Dvukhfaktornaya model' QSPR dlya prognoza oktanovykh chisel alkanov po topologicheskim deskriptoram i chislu elektronov v molekule [QSPR Two-Factor Model for Forecasting Alkanes Octan Numbers by Topological Descriptors and Number of Electrons in Molecule]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal — Bashkir Chemical Journal*, 2020, Vol. 27, No. 1, pp. 56-60. [in Russian].

17. Dolomatov M.Yu., Koledin O.S., Kovaleva E.A., Arslanbekova S.A. Prognoz oktanovykh chisel zameshchennykh alkanov po topologicheskim kharakteristikam molekul [Prediction of Octane Numbers of Substituted Alkanes according to the Topological Characteristics of the Molecules]. *Butlerovskie soobshcheniya — Butlerov Communications*, 2019, Vol. 59, No. 7, pp. 69-75. [in Russian].

18. Dolomatov M.Yu., Aubekero T.M., Vagapova E.V., Akhtyamova K.R., Kuznetsov E.A. Vzaimosvyaz' teploemkosti i topologicheskikh kharakteristik soedinenii v ryadu zameshchennykh arenov [Relationship between Heat Capacity and Topological Characteristics of Compounds in a Series of Substituted Arenes]. *Zhurnal fizicheskoi khimii — Physical Chemistry Journal*, 2019, Vol. 93, No. 2, pp. 170-175. [in Russian].

19. Dolomatov M.Yu., Aubekero T.M., Vagapova E.V., Akhtyamova K.R. Vzaimosvyaz' teploemkosti i topologicheskikh kharakteristik molekul v ryadakh gazo-obraznykh zameshchennykh proizvodnykh alkenov pri davlenii 100 kPa i v intervale temperatur ot 298.15 do 1000 K [Relationship between Heat Capacity and Topological Characteristics of Molecules in a Series of Gaseous Substituted Derivatives of Alkenes at a Pressure of 100 KPa and in the

Temperature Range from 298.15 to 1000 K]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii — Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, Vol. 54, No. 4, pp. 624-630. (Q2). DOI: 10.31857/S0044453720110059 RSCI. [in Russian].

20. Dolomatov M.Yu., Aubekerov T.M., Kovaleva E.A., Akhtyamova K.R., Vagapova E.V., Koledin O.S. Korrelyatsiya «Struktura — svoistvo» dlya rascheta kriticheskikh davlenii fazovykh perekhodov

«zhidkost' — par» po topologicheskim kharakteristikam molekul alkenov [Structure–Property Correlation for Calculating the Critical Pressures of Liquid–Vapor Phase Transitions from the Topological Characteristics of Alkene Molecules]. *Zhurnal fizicheskoi khimii — Russian Journal of Physical Chemistry*, 2020, Vol. 94, No. 10, pp. 1445-1449. (Q4). DOI: 10.31857/S0044453720100088_RSCI. [in Russian].



**Александр Николаевич
Пудовкин**
Alexander N. Pudovkin

*кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Городское
строительство и
хозяйство»,
Оренбургский
государственный
университет, филиал,
Кумертау, Россия*



**Рауф Музагитович
Халиков**
Rauf M. Khalikov

*кандидат химических наук, доцент кафедры
«Автомобильные
дороги и технология
строительного
производства»,
Уфимский
государственный
нефтяной технический
университет,
Уфа, Россия*



**Буллат Галиевич
Буллатов**
Bulat G. Bulatov

*старший
преподаватель кафедры
природообустройства,
строительства и
гидравлики,
Башкирский
государственный
аграрный университет,
Уфа, Россия*



Виктория Владимировна Соколова
Victoriya V. Sokolova

*кандидат филологических наук
доцент кафедры иностранных языков,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*



Игорь Вадимович Недосеко
Igor V. Nedoseko

*доктор технических наук
профессор кафедры
«Строительные конструкции»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*

УДК 625.85

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-103-113

ЦИФРОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Актуальность

Развитие региона отражается на его социально-экономической политике и зависит от прогнозируемых данных роста ВВП, влияющего на увеличение грузовых перевозок автомобильным транспортом. В Республике Башкортостан к 2030 г. объем таких пере-

возок может вырасти на 30–40 %, при этом произойдет увеличение количества грузового транспорта в 2 раза. Количество личного автотранспорта населения региона достигнет уровня 300–350 автомобилей на 1000 жителей. Все эти данные обязательно приведут к увеличению интенсивности и плотности трафика на транспортные артерии как регионального, так и межмуниципального значения на 30–40 %. Уже сегодня около 80 % протяженности транспортных артерий регионального муниципального значения нуждаются в увеличении прочностных показателей из-за ускоренного изнашивания дорожного полотна и снижения срока службы между плановыми ремонтами.

В ходе реализации национального проекта РФ «Безопасные качественные дороги» пропускная способность автомобильных дорог в республике недостаточна, а качество автомобильных дорог требует увеличения прочностных характеристик, поэтому становятся востребованными разработки новых подходов функционирования информационных систем, что дает возможность моделировать взаимодействия подсистем системы автоматизированного управления (САУ): САУ подачи минеральных материалов и САУ бункерами песка и щебня позволит оценить сложность организации взаимодействия подсистем САУ.

Вышесказанное ставит задачу повышения качества асфальтобетонной смеси на выходе асфальтобетонного завода (АБЗ), что обеспечивается автоматизацией предприятия, поэтому задача разработки распределенной иерархической системы управления информационными комплексами АБЗ является актуальной.

Цель исследования

Создание методологической основы для разработки структур современных систем управления производством асфальтобетонной смеси.

Методы исследования

За основу исследования принят комплекс методов теории вероятности и математической статистики, оптимальных систем и математического моделирования, а также теория автоматического управления. Моделирование технологического процесса и системного анализа проведено с применением пакета MatLab.

Результаты

Представлено решение задач цифрового управления производством асфальтобетона в виде обобщенного подхода. Все данные по сырью и технологическому процессу собираются в единой базе, что позволяет их обрабатывать на новом уровне. Результат проведенных исследований позволяет применять предложенную концепцию и методологию к дальнейшим исследованиям, что приведет к выработке оптимальной структуры САУ на производствах строительной отрасли. Внедрение новых результатов исследований улучшит оценку эффективности решений при техническом перевооружении асфальтобетонных заводов САУ АБЗ. Появляется реальная возможность сравнить поступающее сырье на предприятие с требованиями для производства асфальтобетонной смеси, которое было уложено в дорожное полотно. Представлены задачи контроля технологических параметров и процесса управления производством асфальтобетонной смеси.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, битум, логико-программное управление, автоматизация, система цифрового управления

DIGITAL REGULATION OF PARAMETERS IN THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF ASPHALT CONCRETE MIXTURE

Relevance

The development of the region is reflected in its socio-economic policy and depends on the projected gross domestic product growth data, which affects the increase in freight traffic by road. In the Republic of Bashkortostan, by 2030, the volume of such traffic may grow by 30–40 %, while the number of freight transport will double. The number of personal

vehicles of the population of the region will reach the level of 300–350 vehicles per 1000 inhabitants. All these data will certainly lead to an increase in the intensity and density of traffic on transport arteries, both regional and inter-municipal significance by 30–40 %. Already today, about 80 % of the length of transport arteries of regional municipal significance need to increase the strength indicators due to the accelerated wear of the roadway and a decrease in the service life between scheduled repairs.

In the course of the implementation of the national project of the Russian Federation «Safe High-Quality Roads», the capacity of highways in the republic is insufficient, and the quality of highways requires an increase in strength characteristics.

Therefore, the development of new approaches to the functioning of information systems is becoming in demand and makes it possible to simulate the interaction of subsystems of an automated control system (ACS): ACS for supplying mineral materials and ACS with sand and crushed stone bins will allow us to assess the complexity of organizing the interaction of ACS subsystems.

The foregoing sets the task of improving the quality of the asphalt concrete mixture at the output of the asphalt concrete plant, which is ensured by the automation of the enterprise. Therefore, the task of developing a distributed hierarchical control system for information systems of the asphalt concrete plant is urgent.

Aim of the research

Creation of a methodological basis for the development of structures for modern management systems for the production of asphalt concrete mix.

Research methods

The research is based on a set of methods of the theory of probability and mathematical statistics, optimal systems and mathematical modeling, as well as the theory of automatic control. Modeling of the technological process and system analysis was carried out using the MatLab package.

Results

The solution of problems of digital control of asphalt concrete production in the form of a generalized approach is presented. All data on raw materials and technological process are collected in a single database, which allows them to be processed at a new level. The result of the research carried out makes it possible to apply the proposed concept and methodology to further research, which will lead to the development of the optimal structure of the ACS in the construction industry. The introduction of new research results will improve the assessment of the effectiveness of solutions for the technical re-equipment of asphalt concrete plants ACS.

Keywords: asphalt concrete mix, bitumen, logic-program control, automation, digital control system

Введение

Качество готового продукта конкретного асфальтобетонного завода (АБЗ) зависит от большого числа факторов [1, 2]. Способы приемки исходного сырья: щебня, песка и минерального порошка, их складирование и внутризаводское перемещение должны исключать вероятное снижение их качества и загрязнение от воздействия окружающей среды. Методы разгрузки битума из вагонов и схема битумохранилища должны снизить или исключить возможность его обводне-

ния и загрязнения [3, 4]. Задачи технологического управления производства качественной асфальтобетонной смеси практически не реализованы ни в одной из представленных на рынке системе управления [5–7]. Плотность упорядоченных данных, собираемых с периодической частотой, а также и необходимые технологические параметры позволяют ставить задачу управления качеством готовой асфальтобетонной смеси только на выходе АБЗ.

Существующие на сегодняшний день системы автоматического управления производством асфальтобетонных заводов предназначены для управления предприятий только периодического действия. Перечислим основные функции таких систем:

- автоматическое управление и контроль технологических параметров;
- тензометрическое весовое дозирование сырьевых компонентов с высокой точностью;
- управление питателями предварительного дозирования;
- автоматическое поддержание температур технологического процесса;
- дистанционное измерение температуры готовой асфальтобетонной смеси;
- многоканальное измерение температур технологического процесса;
- анимационное, графическое и текстовое отображение информации;
- бесконтактные датчики положения исполнительных механизмов;
- библиотека рецептов асфальтобетонной смеси;
- автоматическая архивация всех технологических параметров;
- высокий модернизационный потенциал системы;
- гибкость в настройке и конфигурации параметров;
- сетевая версия программного обеспечения;
- передача информации с помощью SMS сообщений.

Современные системы управления асфальтосмесительными установками комплектуют микропроцессорными системами управления (МСУ), которые изготовлены с применением электронных компонентов ведущих мировых производителей, что является гарантом их высокого качества и надёжности [8, 9].

При применении МСУ роль оператора в управлении исключается, в результате получается автономный режим работы

технологической установки. МСУ непрерывно держит весь процесс производства асфальтобетонной смеси на контроле; довольно быстро переключается на выпуск смеси, взятой по рецепту из базы; ведет учет количества приготовленной смеси с возможностью дальнейшего просмотра, контроля и распечатки на принтере текущей информации о произведенной продукции и израсходованных сырьевых компонентов [10, 11].

Автоматизация системы управления АБЗ может производиться в различных вариантах, от самой простой, т.е. установки цифровых весовых дозаторов с наиболее простым и дешевым вариантом, до системы управления с применением современных компьютерных технологий. На отечественном и зарубежных рынках присутствуют и другие разработки САУ. Тем не менее, рассмотренные САУ являются типичными как по реализуемым задачам, так и по техническому оснащению САУ [12, 13].

Микропроцессоры, микроконтроллеры или управляющие компьютеры применяются для обработки полученной информации и формирования управляющих воздействий.

При рассмотрении системы автоматизированного управления асфальтобетонных заводов (САУ АБЗ) задачи цифрового управления реализуются для следующих параметров и объектов.

Регулирование и контроль температуры:

- сушильный барабан (температура сырьевых компонентов, температура окружающей среды);
- битум (подогрев битума в битумохранилище, подогрев битума в бункере, подогрев битума при дозировании и подачи);
- произведенная асфальтобетонная смесь.

Дозирование сырьевых компонентов:

- минеральные материалы;

- минеральный порошок;
- битум;
- добавки.

Представленные задачи цифрового управления нужно решать и в системах управления качеством продукции. Качество готовой асфальтобетонной продукции зависит от большого числа факторов. Причем часть этих необходимых факторов формируется вне технологического процесса (рисунок 1).

В процессе формирования управляющих воздействий на процесс производства асфальтобетонной смеси применяется информация о текущем реальном состоянии процесса. Данная информация получается в результате обработки полученных первичных преобразователей в измерительных системах и после ввода необходимых исходных данных техническим персоналом. Точность, достоверность и своевременность внесения исходных данных во многом определяют эффективность управления.

Существующие нормативные документы, контролирующие производство асфальтобетонной смеси, регламентируют контроль параметров не для решения задач управления технологическим процессом асфальтобетонного завода, а для аттестации готовой продукции [14–19].

Таким образом, необходимо оценить оперативное влияние основных параметров технологического процесса информационного обеспечения автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси на общую эффективность управления.

Характеристики основных компонентов, таких как, песок, щебень, минеральный порошок, битум и добавки, а также режимы технологического процесса влияют на качество готовой асфальтобетонной смеси. Также известно как отдельные свойства компонентов асфальтобетонной смеси связаны с показателями качества асфальтобетонной смеси.

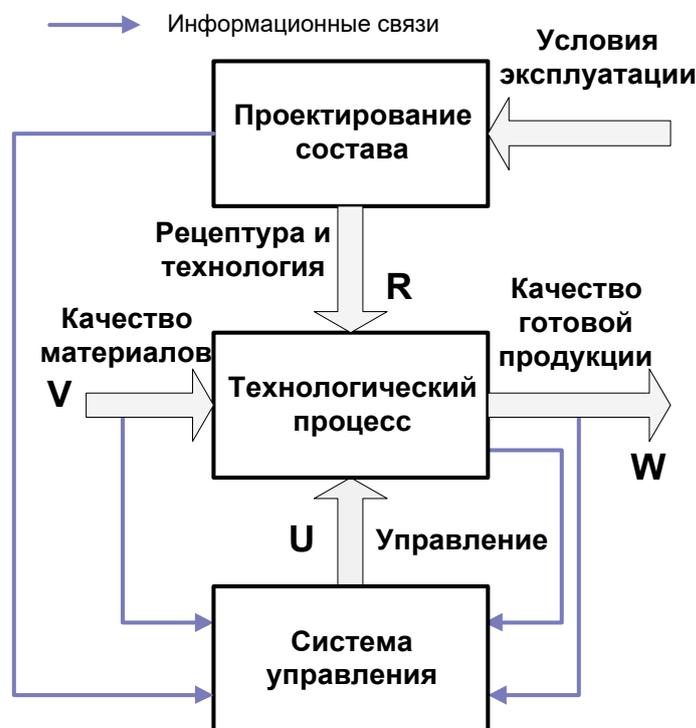


Рисунок 1. Общая схема технологического процесса производства асфальтобетонной смеси

Figure 1. General scheme of the technological process for the production of asphalt concrete mixture

Остаточная пористость может уменьшаться с увеличением расхода битума (рисунок 2). Рассматривая конкретные условия эксплуатации и применяя соответствующие нормативные документы, можно определить диапазон измерения остаточной пористости [20]. В диапазоне изменения расхода битума, который соответствует регламентированному диапазону остаточной пористости, зависимости прочностей (при температурах асфальтобетонной смеси 20 °С и 50 °С) имеют экстремальный характер.

Процесс увеличения содержания битума и прочности непосредственно взаимосвязан с процессом заполнения пор межзернового пространства минерального заполнителя до его полного заполнения, повышения степени обволакивания им минерального сырья. С того момента, как объём битума будет превы-

шать объём пор межзернового пространства, может происходить раздвижка зерен минеральных компонентов, а, отсюда, и возрастание пластичности готовой асфальтобетонной смеси, уменьшение гидродинамического сопротивления движению и, как следствие этого, снижение прочности готового продукта [20–23].

Снижение прочности также может происходить и при введении песка в асфальтовое вяжущее (рисунок 3) в связи с увеличением степени неоднородности асфальтобетонной смеси и появления объемного битума [21].

Оказываемое воздействие качества исходных компонентов асфальтобетонной смеси и отдельных параметров производства на будущие свойства готовой продукции асфальтобетонного завода представлены в таблице 1.

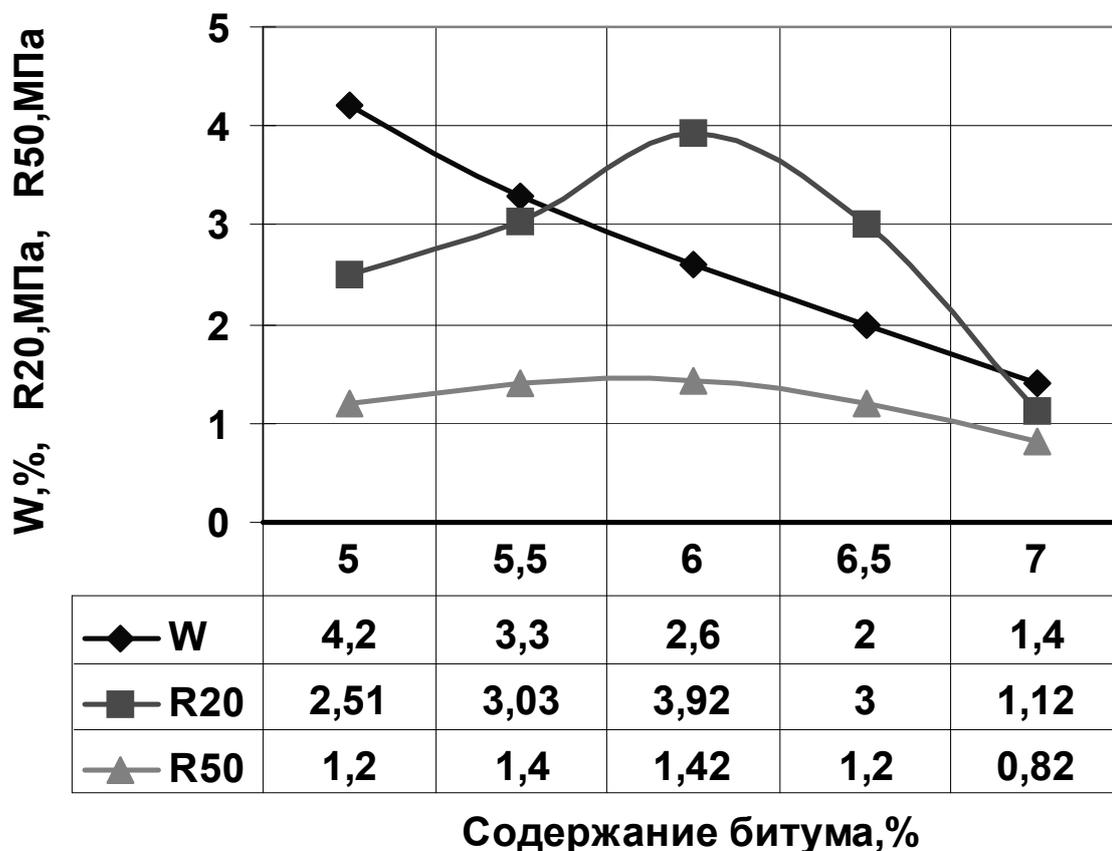


Рисунок 2. Зависимость остаточной пористости и прочности от расхода битума

Figure 2. Dependence of residual porosity and strength on bitumen consumption



битум: 1 — БНД 40-60; 2 — БНД 90-130; 3 — БНД 130-200; 4 — БНД 200-300
 содержание песка: I — 0 %; II — 10 %; III — 50 %; IV — 65 %

bitumen: 1 — BND 40-60; 2 — BND 90-130; 3 — BND 130-200; 4 — BND 200-300
 sand content: I — 0 %; II — 10 %; III — 50 %; IV — 65 %

Рисунок 3. Зависимость прочности асфальтового раствора от соотношения расходов битума и минерального порошка для битума различных марок и различного содержания песка

Figure 3. Dependence of the strength of asphalt mortar on the ratio of the consumption of bitumen and mineral powder for bitumen of various grades and various sand content

Таблица 1. Влияние показателей качества исходных компонентов асфальтобетонной смеси на свойства асфальтобетона

Table 1. Influence of quality indicators of initial components of asphalt concrete mixture on the properties of asphalt concrete

№	Входные данные	Выходные данные
1	Отношение $\frac{\Pi}{МП}$	Пористость смеси, %
2	Отношение $\frac{Щ}{\Pi}$	Прочность при сдвиге, МПа
3	Доля битума	Прочность при сжатии R_{20} , МПа
4	Вязкость битума (глубина проникновения иглы при 0 °С), мм	Прочность при сжатии R_{50} , МПа
5	Отношение $\frac{Б}{МП}$	Прочность при сжатии R_0 , МПа

Контролируемые параметры технологического процесса оказывают значительное влияние на качество работы САУ АБЗ.

Параметры основного контроля:

- точность проводимого контроля;
- продолжительность проводимого контроля;
- частота проводимого контроля.

В ходе технологического процесса также с результатами измерений нужно определять показатели, измеряемые специальным оборудованием:

- фактические нормы сырьевых компонентов асфальтобетонной смеси для каждого нового замеса;
- температурные показатели битума готовой асфальтобетонной смеси.

Источником данных сырьевых компонентов, технологических параметров также является лаборатория асфальтобетонного предприятия.

В лаборатории предприятия собрана следующая информация

- минимальное качество сырьевых компонентов асфальтобетонной смеси. Данная информация появляется в результате измерения контролируемых параметров, а также из сопроводительных документов поставщиков сырьевых компонентов асфальтобетонной смеси;

Список источников

1. Аминов Ш.Х., Суворов Д.Н., Пудовкин А.Н. История развития структур систем автоматизированного управления (САУ) асфальтобетонными заводами // История науки и техники. 2011. № 12 (выпуск 3). С. 106-111.
2. Zhao Y., Wang X., Jiang J., Zhou L. Characterization of Interconnectivity, Size Distribution and Uniformity of Air Voids in Porous Asphalt Concrete Using X-ray CT Scanning Images // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 213. P. 182-193.
3. Gu F., Ma W., West R.C., Taylor A.J., Zhang Y. Structural Performance and Sustainability Assessment of Cold Central-

- рецепты асфальтобетонной смеси;
- результаты измерений параметров готовой асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ;
- результатах измерений параметров готового асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги.

Выводы

Самые важные задачи качества технологического процесса производства асфальтобетонной смеси на сегодняшний день практически не реализованы ни в одной САУ, представленной на рынке. База данных, собранная с необходимой частотой с определенным количеством параметров, позволяет ставить задачу управления получения качественной асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ.

Сбор данных в одном информационном комплексе АБЗ позволяет обрабатывать все параметры на совершенно новом уровне. Например, появляется возможность сравнивать данные о рецепте асфальтобетонной смеси в замесе (стадии дозирования), который был уложен в дорожное полотно, а затем через определенное время подвергнут испытаниям. Такое сравнение данных открывает дорогу к получению совершенно новых данных, которые позволят построить эффективные модели связи.

Plant and In-Place Recycled Asphalt Pavements: A Case Study // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 208. P. 1513-1523.

4. Yildirim Z.B., Karacasu M. Modelling of Waste Rubber and Glass Fibber with Response Surface Method in Hot Mix Asphalt // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 227. P. 117070.

5. Нуйкин Д.А., Кулакова Е.С. Эффективность работы моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 1. С. 113-119. DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-1-113-119.

6. Yuan J., Zhong L., Vakili M., Segun G.A. New Modeling Method to Simulate Asphaltenes at Oil Sands Process in Water Management // *Journal of Molecular Graphics and Modelling*. 2019. Vol. 91. P. 1-9.

7. Sivilevičius H., Vislavičius K. Simulation of Composition of Recycled Hot-Mix Asphalt Mixture Produced in Asphalt Mixing Plant // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 214. P. 17-27.

8. Montoya M.A., Haddock J.E. Estimating Asphalt Mixture Volumetric Properties Using Seemingly Unrelated Regression Equations Approaches // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 225. P. 829-837.

9. Badretdinov I., Mudarisov S., Lukmanov R., Permyakov V., Ibragimov R., Nasyrov R. Mathematical Modeling and Research of the Work of the Grain Combine Harvester Cleaning System // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 165. P. 104966.

10. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Имитационное моделирование режимов технологического оборудования комплексномеханизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты в программе MatLab // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2021. Т. 17. № 1. С. 120-130. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-120-128.

11. Movilla-Quesada D., Raposeiras A.C., Silva-Klein L.T., Lastra-González P., Castro-Fresno D. Use of Plastic Scrap in Asphalt Mixtures Added by Dry Method as a Partial Substitute for Bitumen // *Waste Management*. 2019. Vol. 87. P. 751-760.

12. Ming H.U.A.N.G. Investigation on Production Process of Epoxy Emulsified Asphalt // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 30. P. 380-387.

13. Yu H., Leng Z., Dong Z., Tan Z., Guo F., Yan J. Workability and Mechanical Property Characterization of Asphalt Rubber Mixtures Modified with Various Warm Mix Asphalt Additives // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 175. P. 392-401.

14. ГОСТ 11955-82. Битумы нефтяные дорожные жидкие. Технические условия. М., 2009. 7 с.

15. ГОСТ Р 52129-2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и

органоминеральных смесей. Технические условия. М., 2003. 24 с.

16. ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. М., 1999. 67 с.

17. ГОСТ 22245-90. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. М., 1990. 9 с.

18. ГОСТ 31015-2002 Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. М., 2003. 14 с.

19. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. М., 1998. 109 с.

20. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Котлярский Э.В., Доценко А.И., Попов В.А. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Кн. 2. Практические разработки. М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2009. 608 с.

21. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Попов В.А. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Кн. 1. Теоретические основы. М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2009. 297 с.

22. Ostroukh A.V., Nuruev Y.E., Nedoseko I.V., Pudovkin A.N. Development of the Automated Control System for Concrete Plant with Two Units Concrete Mixing // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10. No. 17. P. 37792-37798.

23. Khafizov A.R., Bulatov B.G., Pudovkin A.N., Galimov V.M., Nedoseko I.V., Sultanov M.T. Analysis and Modeling of Coating Plant Topology and Automatic Control System // *International Review of Automatic Control*. 2020. Vol.c13. No. 2. P. 49-57.

References

1. Aminov Sh.Kh., Suvorov D.N., Pudovkin A.N. Istoriya razvitiya struktur sistem avtomatizirovannogo upravleniya (SAU) asfal'tobetonnyimi zavodami [The History of the Development of Structures of

- Automated Control Systems (ACS) Asphalt Concrete Plants]. *Istoriya nauki i tekhniki — History of Science and Technology*, 2011, No. 12 (Issue 3), pp. 106-111 [in Russian].
2. Zhao Y., Wang X., Jiang J., Zhou L. Characterization of Interconnectivity, Size Distribution and Uniformity of Air Voids in Porous Asphalt Concrete Using X-ray CT Scanning Images. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 213, pp. 182-193.
 3. Gu F., Ma W., West R.C., Taylor A.J., Zhang Y. Structural Performance and Sustainability Assessment of Cold Central-Plant and In-Place Recycled Asphalt Pavements: A Case Study. *Journal of Cleaner Production*, 2019, Vol. 208, pp. 1513-1523.
 4. Yildirim Z.B., Karacasu M. Modelling of Waste Rubber and Glass Fibber with Response Surface Method in Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 227, pp. 117070.
 5. Nuikin D.A., Kulakova E.S. Effektivnost' raboty modelei nadezhnosti otkazoustoichivoi avtomatizirovannoi sistemy upravleniya [The Efficiency of the Reliability Models of Automated Control System]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, Vol. 17, No. 1, pp. 113-119. DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-1-113-119. [in Russian].
 6. Yuan J., Zhong L., Vakili M., Segun G.A. New Modeling Method to Simulate Asphaltenes at Oil Sands Process in Water Management. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2019, Vol. 91, pp. 1-9.
 7. Sivilevičius H., Vislavičius K. Simulation of Composition of Recycled Hot-Mix Asphalt Mixture Produced in Asphalt Mixing Plant. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 214, pp. 17-27.
 8. Montoya M.A., Haddock J.E. Estimating Asphalt Mixture Volumetric Properties Using Seemingly Unrelated Regression Equations Approaches. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 225, pp. 829-837.
 9. Badretdinov I., Mudarisov S., Lukmanov R., Permyakov V., Ibragimov R., Nasyrov R. Mathematical Modeling and Research of the Work of the Grain Combine Harvester Cleaning System. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 165, pp. 104966.
 10. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. Imitatsionnoe modelirovanie rezhimov tekhnologicheskogo oborudovaniya kompleksno-mekhanizirovannogo zaboya vysokoproizvoditel'noi ugol'noi shakhty v programme MatLab [Simulation of Complex-Mechanized Downhole Technological Equipment of a High-Performance Coal Mine in the MatLab Program]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, Vol. 17, No. 1, pp. 120-130. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-120-128. [in Russian].
 11. Movilla-Quesada D., Raposeiras A.C., Silva-Klein L.T., Lastra-González P., Castro-Fresno D. Use of Plastic Scrap in Asphalt Mixtures Added by Dry Method as a Partial Substitute for Bitumen. *Waste Management*, 2019, Vol. 87, pp. 751-760.
 12. Ming H.U.A.N.G. Investigation on Production Process of Epoxy Emulsified Asphalt. *Procedia Manufacturing*, 2019, Vol. 30, pp. 380-387.
 13. Yu H., Leng Z., Dong Z., Tan Z., Guo F., Yan J. Workability and Mechanical Property Characterization of Asphalt Rubber Mixtures Modified with Various Warm Mix Asphalt Additives. *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 175, pp. 392-401.
 14. GOST 11955-82. Bitumy neftyanye dorozhnye zhidkie. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 11955-82. Road Petroleum Liquid Bitumens. Specifications]. Moscow, 2009. 7 p. [in Russian].
 15. GOST R 52129-2003. Poroshok mineral'nyi dlya asfal'tobetonnykh i organo-

mineral'nykh smesei [State Standard R 52129-2003. Tekhnicheskie usloviya. Mineral Powders for Asphaltic Concrete and Organomineral Mixtures Specifications]. Moscow, 2003. 24 p. [in Russian].

16. *GOST 12801-98. Materialy na osnove organicheskikh vyazhushchikh dlya dorozhnogo i aerodromnogo stroitel'stva. Metody ispytaniy* [State Standard 12801-98. Materials on the Basis of Organic Binders for Road and Airfield Construction. Test Methods]. Moscow, 1999. 67 p. [in Russian].

17. *GOST 22245-90. Bitумы нефтяные дорожные вязкие. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 22245-90. Viscous Petroleum Road Bitumens. Specifications]. Moscow, 1990. 9 p. [in Russian].

18. *GOST 31015-2002. Smesi asfal'tobetonnye i asfal'tobeton shchebenochno-mastichnye. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 31015-2002. Bituminous Stone Mastic Mixtures and Stone Mastic Asphalt. Specifications]. Moscow, 2003. 14 p. [in Russian].

19. *GOST 8269.0-97. Shcheben' i gravii iz plotnykh gornykh porod i otkhodov promyshlennogo proizvodstva dlya stroitel'nykh rabot. Metody fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy* [State Standard 8269.0-97. Mountainous Rock Road-Metal and Gravel, Industrial Waste Products for Construction Works. Methods of Physical and Mechanical Tests]. Moscow, 1998. 109 p. [in Russian].

20. Vorob'ev V.A., Suvorov D.N., Kotlyarskii E.V., Dotsenko A.I., Popov V.A. *Komp'yuternoe modelirovanie v avtomatizatsii proizvodstva asfal'tobetonnoi smesi. Book 2. Prakticheskie razrabotki* [Computer Modeling in the Automation of Asphalt Concrete Mix Production. Book 2. Practical Developments]. Moscow, Publishing House of the Russian Engineering Academy, 2009. 608 p. [in Russian].

21. Vorob'ev V.A., Suvorov D.N., Popov V.A. *Komp'yuternoe modelirovanie v avtomatizatsii proizvodstva asfal'tobetonnoi smesi. Book 1. Teoreticheskie osnovy* [Computer Modeling in the Automation of Asphalt Concrete Mix Production. Book 1. Theoretical Foundations]. Moscow, Publishing House of the Russian Engineering Academy, 2009. 297 p. [in Russian].

22. Ostroukh A.V., Nuruev Y.E., Nedoseko I.V., Pudovkin A.N. Development of the Automated Control System for Concrete Plant with Two Units Concrete Mixing. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, Vol. 10, No. 17, pp. 37792-37798.

23. Khafizov A.R., Bulatov B.G., Pudovkin A.N., Galimov V.M., Nedoseko I.V., Sultanov M.T. Analysis and Modeling of Coating Plant Topology and Automatic Control System. *International Review of Automatic Control*, 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 49-57.

ОБ АВТОРАХ

Алаева Наталья Николаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия

Баннов Дмитрий Михайлович

инженер кафедры «Электрические станции», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Булатов Булат Галиевич

старший преподаватель кафедры природообустройства, строительства и гидравлики, Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

Буньков Дмитрий Сергеевич

инженер-программист отделения силовой электроники, АО «ЭлеСи», Томск, Россия

Валеев Малик Рамилевич

магистрант кафедры «Технология нефти и газа», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Гарипов Роберт Венерович

магистрант кафедры «Технология нефти и газа», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Глазырин Александр Савельевич

доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Доломатов Михаил Юрьевич

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефти и газа», Уфимский государственный нефтяной технический университет; профессор кафедры физической электроники и нанофизики, Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

Дудаев Николай Олегович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский государственный авиационный технический университет, филиал, Кумертау, Россия

Зайцева Алина Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Зыкин Павел Витальевич

аспирант кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Ковалева Элла Александровна

кандидат химических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и прикладная математика», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Коледин Олег Сергеевич

аспирант кафедры «Технология нефти и газа», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Лихачев Евгений Александрович

старший преподаватель кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Недосеко Игорь Вадимович

доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Пичугин Павел Игоревич

магистрант кафедры техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия

Пудовкин Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство», Оренбургский государственный университет, Кумертауский филиал, Кумертау, Россия

Сафиуллин Рузил Ахнафович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технических дисциплин, Башкирский государственный университет», филиал, Нефтекамск, Россия

Ситдикова Ирина Петровна

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск, Россия

Соколова Виктория Владимировна

кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Халиков Рауф Музагитович

кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Хамитов Рустам Нуриманович

доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники, Омский государственный университет, Омск, Россия

Щербаков Константин Викторович

студент кафедры «Электронная инженерия» факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Уфимский государственный авиационный технический университет, филиал, Кумертау, Россия

Янгиров Ильгиз Флюсович

доктор технических наук, доцент кафедры электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Alaeva Natalya N.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation and Information Technology Department, Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russia

Bannov Dmitriy M.

Engineer of Electrical Stations Department, Samara State Technical University, Samara, Russia

Bulatov Bulat G.

Senior Lecturer of Environmental Engineering, Construction and Hydraulics Department, Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

Bunkov Dmitriy S.

Software Engineer of Power Electronics Departments, JSC EleSy, Tomsk, Russia

Glazyrin Alexander S.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electricity and Electrical Engineering Department, School of Energy Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Dolomatov Michail Yu.

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of Oil and Gas Technology Department, Ufa State Petroleum Technological University; Professor of Physical Electronics and Nanophysics Department, Bashkir State University, Ufa, Russia

Dudaev Nikolay O.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa State Aviation Technical University, Branch, Kumertau, Russia

Garipov Robert V.

Undergraduate Student of Oil and Gas Technology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khalikov Rauf M.

Candidate of Chemical Sciences, Assistant Professor of Highways and Structural Engineering Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khamitov Rustam N.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State University, Omsk, Russia

Koledin Oleg S.

Postgraduate Student of Oil and Gas Technology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kovaleva Ella A.

Candidate of Chemical Sciences, Assistant Professor of Information Technologies and Applied Mathematics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Likhachev Evgeny A.

Senior Lecturer of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Nedoseko Igor V.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Building Structures Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Pichugin Pavel I.

Undergraduate Student of High Voltage Engineering and Electrical Physics Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

Pudovkin Alexander N.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Urban Construction and Economy Department, Orenburg State University, Branch, Kumertau, Russia

Safiullin Ruzil A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Technical Disciplines Department, Bashkir State University, Branch, Neftekamsk, Russia

Shcherbakov Konstantin V.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa State Aviation Technical University, Branch, Kumertau, Russia

Sitdikova Irina P.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Automation and Information Technology Department, Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russia

Sokolova Victoriya V.

Candidate of Philological Sciences, Assistant Professor of Foreign Languages Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Valeev Malik R.

Undergraduate Student of Oil and Gas Technology Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Yangirov Ilgiz F.

Doctor of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electromechanics Department, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Zaytseva Alina A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Zykin Pavel V.

Postgraduate Student of Electric Power Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

СПИСОК СТАТЕЙ, ИЗДАНЫХ В 2021 ГОДУ

Абрамкина К.В., Марковкина Н.Н., Сметюх Н.П. Сравнительный анализ сред разработки MATLAB и COMSOL для реализации управления акустическим полем левитации с помощью ультразвуковых пьезоизлучателей, № 1, с. 129-140.

Авдеев Б.А., Вынгра А.В. Анализ валового потенциала солнечной энергетики керченского полуострова для интеграции в интеллектуальных сетях электроснабжения, № 1, с. 5-12.

Алаева Н.Н., Ситдикова И.П. К вопросу непрерывного контроля параметров добываемой продукции нефтяных скважин, № 3-4, с. 63-71.

Антропова В.Р., Сухачев И.С., Сушков В.В., Мартьянов А.С. Разработка вероятностной модели кратковременных нарушений электроснабжения, № 2, с. 76-85.

Баннов Д.М. Анализ методов диагностики обрыва стержня ротора асинхронного двигателя, № 3-4, с. 5-23.

Белов А.В., Мартынов Б.А., Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В. Методика калибровки резонансной испытательной установки переменного тока, № 2, с. 55-66.

Бордюг А.С. Разработка параметрической модели гидравлических потерь судового крана для повышения надежности выполнения грузовых операций, № 1, с. 65-73.

Буньков Д.С. Обзор методов оценивания параметров схемы замещения асинхронной электрической машины для организации векторной системы управления, № 3-4, с. 24-38.

Бухаров Д.С. Об алгоритме вычисления эллиптической области срабатывания дистанционной защиты, № 2, с. 86-91.

Гупаленко Д.Д., Токарева С.А., Захаров Д.Ю. Разработка ключевых показателей эффективности деятельности управлений аварийно-восстановительных работ и капитального ремонта скважин, № 1, с. 74-80.

Железняк А.А. Подавление низкочастотных помех судовых электроэнергетических систем, № 1, с. 13-18.

Зайцева А.А., Лихачев Е.А., Дудаев Н.О., Щербаков К.В. Высокопроизводительный информационно-управляющий комплекс для перспективного высокоскоростного вертолета, № 3-4, с. 72-81.

Иванов М.Д., Хазиева Р.Т. Моделирование генератора переменного напряжения для создания импульсного электромагнитного поля, № 2, с. 5-14.

Коледин О.С., Доломатов М.Ю., Ковалева Э.А., Гарипов Р.В., Валеев М.Р. Модель QSPR для прогноза октановых чисел углеводородов ряда алкенов по топологическим характеристикам молекул, № 3-4, с. 92-102.

Комиссаров Д.Р. Проектирование системы искусственного интеллекта для формирования списка вакантных должностей, № 1, с. 90-96.

Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Имитационное моделирование режимов технологического оборудования комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты в программе MATLAB, № 1, с. 120-128.

Ле Суан Хонг. Разработка модели асинхронного двигателя электроподвижного состава метрополитена с векторным управлением в среде Matlab, № 2, с. 15-25.

Мартынов Б.А., Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В. Защита схемы измерения тока резонансной испытательной установки, № 2, с. 26-40.

Моисеев И.С., Жиленков А.А., Ениватов В.В., Зинченко А.А. Некоторые проблемы моделирования динамики механических систем и их решение методами вариационных интеграторов группы Ли, № 1, с. 81-89.

Муравьева Е.А., Габитов Р.Ф., Имаев Р.Ф. Синтез нечеткого контроллера для идентификации количественной оценки возмущений по трендам, № 1, с. 97-112.

Нуйкин Д.А., Кулакова Е.С. Эффективность работы моделей надежности отказоустойчивой автоматизированной системы управления, № 1, с. 113-119.

Пичугин П.И. Решение обратной задачи нахождения поверхностной плотности заряда по известному электрическому потенциалу средствами Comsol Multiphysics, № 3-4, с. 39-48.

Пудовкин А.Н., Халиков Р.М., Булатов Б.Г., Соколова В.В., Недосеко И.В. Цифровое регулирование параметров в системе автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси, № 3-4, с. 103-113.

Родионов А.С., Жаринов Ю.А., Старцева Е.В., Суслов Н.С., Шишкина О.Ю. Программный комплекс обучения на основе технологий дополненной реальности, № 2, с. 92-99.

Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф. Исследование вибрации асинхронного электродвигателя, № 2, с. 41-54.

Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф. Конический спиральный датчик вибрации с улучшенными метрологическими характеристиками, № 3-4, с. 49-62.

Сафиуллин Р.А. Математическая модель асинхронного двигателя с полым ротором с прорезями со скосом, № 1, с. 19-26.

Семина И.А., Андреева Е.Г. Имитационное моделирование максимальной токовой защиты силового трансформатора в программе MATLAB SIMULINK, № 1, с. 27-32.

Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Низамов М.О., Соловьев Б.А. Моделирование автономной солнечной электростанции, № 1, с. 44-54.

Хамитов Р.Н., Зыкин П.В., Глазырин А.С. Разработка нечеткой системы управления приводом продольной подачи токарного станка с ЧПУ на основе совместно используемых функций принадлежности, № 3-4, с. 82-91.

Холодильник И.Ю., Хрюкин Д.Ю., Григорьев М.А. Система контроля геометрии полуцилиндров трубы Стана 1020, № 2, с. 100-109.

Шабанов В.А., Сорокин А.В. Алгоритмы дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока, № 1, с. 33-42.

Юдинцев А.Г. Аппаратно-программные комплексы имитации систем электроснабжения космических аппаратов, № 1, с. 55-64.

Яшин А.Н., Гильманов Э.А., Хакимьянов М.И. Моделирование механических характеристик асинхронного двигателя в пакете Matlab Simulink, № 2, с. 67-75.

LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2021

Abramkina K.V., Markovkina N.N., Smetyuh N.P. Acoustic levitation field control using ultrasonic piezo transmitters, № 1, p. 129-140.

Antropova V.R., Sukhachev I.S., Sushkov V.V., Martyanov A.S. Development of probabilistic model of short-term power supply interruptions, № 2, p. 76-85.

Alaeva N.N., Sitdikova I.P. On continuous monitoring of oil well production parameters, № 3-4, p. 63-71.

Avdeev B.A., Vyngra A.V. Analysis of the gross potential of solar power of the kerch peninsula for integration in the smart grids, № 1, p. 5-12.

Bannov D.M. Analysis of methods for diagnostics broken rotor bar of induction motor, № 3-4, p. 5-23.

Belov A.B., Martynov B.A., Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Calibration technique for a resonant AC test installation, № 2, p. 55-66.

Bordyug A.S. Development of a parametric model of hydraulic losses of a ship crane to increase the reliability of cargo operations, № 1, p. 65-73.

Bukharov D.S. On algorithm for computing of elliptic operation region of distance protection devices, № 2, p. 86-91.

Bunkov D.S. The review methods of induction machine equivalent circuit parameters estimation for field-oriented control implementation, № 3-4, p. 24-38.

Gupalenko D.D., Tokareva S.A., Zaharov D.Yu. The drafting of key performance indicators of activity of branches of emergency and recovery operations and workover, № 1, p. 74-80.

Hamitov R.N., Zykin P.V., Glazyrin A.S. Development of fuzzy CNC lathe drive control system based on shared accessory functions, № 3-4, p. 82-91.

Ivanov M.D., Khazieva R.T. Modeling an AC voltage generator to create a pulse electromagnetic field, № 2, p. 5-14.

Khazieva R.T., Kirillov R.V., Nizamov M.O., Soloviev B.A. Modeling an autonomous solar power plant, № 1, p. 44-54.

Kholodilin I.Yu., Khriukin D.Yu., Grigorev M.A. Mill tube half-cylinder geometry control system 1020, № 2, p. 100-109.

Koledin O.S., Dolomatov M.Yu., Kovaleva E.A., Garipov R.V., Valeev M.R. The QSPR model for prediction of octane numbers of hydrocarbons of series of alkenes by topological characteristics of molecules, № 3-4, p. 92-102.

Komissarov D.R. Designing an artificial intelligence system for forming a list of vacancies, № 1, p. 90-96.

Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. Simulation of complex-mechanized downhole technological equipment of a high-performance coal mine in the MATLAB program, № 1, p. 120-128.

Le Xuan Hong. Development of the asynchronous motor model of metro train with vector control in the Matlab, № 2, p. 15-25.

Martynov B.A., Khazieva R.T., Mukhametshin A.V. Protection of the current measuring circuit of a resonance testing installation, № 2, p. 26-40.

Moiseev I.S., Zhilenkov A.A., Enivatov V.V., Zinchenko A.A. Selected problems of modeling the dynamics of mechanical systems and their solution by the methods of the Lie group variational integrators, № 1, p. 81-89.

Muraveva E.A., Gabitov R.F., Imaev R.F. Synthesis of a fuzzy controller for identification and quantification of disturbances by trends, № 1, p. 97-112.

Nuykin D.A., Kulakova E.S. The efficiency of the reliability models of automated control system, № 1, p. 113-119.

Pichugin P.I. Solution of an inverse problem of finding surface charge density with a known electrical potential using comsol multiphysics, № 3-4, p. 39-48.

Pudovkin A.N., Khalikov R.M., Bulatov B.G., Sokolova V.V., Nedoseko I.V. Digital regulation of parameters in the automated control system of asphalt concrete mixture, № 3-4, p. 103-113.

Rodionov A.S., Zharinov Yu.A., Startseva E.V., Suslov N.S., Shishkina O.Yu. Software complex of training based on augmented reality technologies, № 2, p. 92-99.

Safiullin R.A., Yangirov I.F. Conical spiral vibration sensor with improved metrological characteristics, № 3-4, p. 49-62.

Safiullin R.A., Yangirov I.F. Investigation of induction electromotor vibration, № 2, p. 41-54.

Safiullin R.A. Mathematical model of an asynchronous motor with a hollow rotor with slots with a bevel, № 1, p. 19-26.

Semina I.A., Andreeva E.G. Simulation of overcurrent protection of power transformer in MATLAB SIMULINK software, № 1, p. 27-32.

Shabanov V.A., Sorokin A.V. Algorithms for remote determination of the distance to the single-phase fault location using the zero-sequence current as the reference current, № 1, p. 33-42.

Yashin A.N., Gilmanov E.A., Khakimyanov M.I. Simulation of mechanical characteristics of an induction motor in Matlab Simulink, № 2, p. 67-75.

Yudintsev A.G. Hardware and software complexes for simulating spacecraft power supply systems, № 1, p. 55-64.

Zaytseva A.A., Likhachev E.A., Dudaev N.O., Shcherbakov K.V. High performance information and control complex for perspective high-speed helicopter, № 3-4, p. 72-81.

Zheleznyak A.A. Suppression of low-frequency noise of electric systems, № 1, p. 13-18.

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц. Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.

Requirements for the materials, provided for publication in the journal:

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

Memo to authors

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («») or (“”).

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers. References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Группы научных специальностей, по которым ведется прием статей в научный журнал
«Электротехнические и информационные комплексы и системы»:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки),

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки),

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки),

05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки),

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки),

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы
(по отраслям) (технические науки),

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления (технические науки),

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (по отраслям) (технические науки)

