

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3 , т. 16, 2020

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)

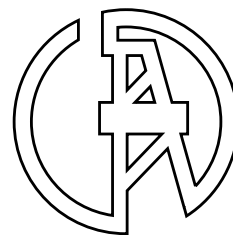


Electrical and data processing facilities and systems

№ 3 , т. 16, 2020



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 3, т. 16, 2020

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 серийный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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

Зам. главного редактора:

Ш.З. Валиев — канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

Члены редакционной коллегии:

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



П.С. Серенков — д-р техн. наук, проф. Белорусского национального технического университета (г. Минск, Белоруссия)



Б.М. Горшков — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса» (г. Тольятти, Российская Федерация)



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



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



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



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



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



В.Г. Кушнир — д-р техн. наук, проф. Костанайского государственного университета им. Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Казахстан)



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



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



Р.Б. Яруллин — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Р.Р. Сафин — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



И. Зицмане — 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)



Г.Д. Георгиев — д-р техн. наук, преподаватель Технического университета (г. Варна, Болгария)



А.Ф. Романченко — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



И.В. Пентегов — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины (г. Киев, Украина)



Ответственный секретарь: А. Г. Саенко

Технический редактор: К. А. Сазонова

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, 2020.

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 26.01.2021 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16.74

Тираж 1 000 экз. Заказ № 10.

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.

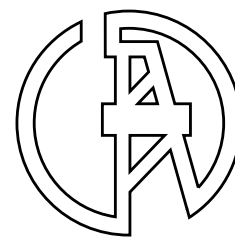
Материалы приводятся в авторской редакции.

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, v. 16, 2020

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. Assoc. Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

Deputy editor-in-chief:

Sh.Z. Valiev — Cand. Sci.Tech., Dr. Sci. Econ., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)

Members of an editorial board:

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



P.S. Serenkov — Dr. Sci.Tech., Prof. of Byelorussian National Technical University» (Minsk, Byelorussia)



B.M. Gorshkov — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Volga Region State University of Service» (Tolyatti, Russian Federation)



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



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



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



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



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



V.G. Kushnir — Dr. Sci.Tech., Prof. of Kostanaysky State University of Ahmet Baytursynov (Kostanay, Kazakhstan)



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



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



R.B. Yarullin — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Bashkir State Agrarian University» (Ufa, Russian Federation)



R.R. Safin — D. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



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



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



G.D. Georgiev — Dr. Sci.Tech., Lecturer Technical University (Varna, Bulgaria)



A.F. Romanchenko — Dr. Sci.Tech., Prof. of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University» (Ufa, Russian Federation)



I.V. Pentegov — Dr. Sci.Tech., Prof., Leading Researcher the E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)



Assistant editor: A. G. Saenko

Technical editor: K. A. Sazonova

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 III № 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, 2020.

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 26.01.2021 Paper format 60×84/8. Offset printing. 16.74 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 10.

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

Памяти Шамиля Зуфаровича Валиева 5

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Марченко А.А., Труднев С.Ю. Исследование процесса нагружения асинхронного электродвигателя в режиме генераторного торможения 6

Хлебцов А.П., Зайнутдинова Л.Х., Шилин А.Н. Развитие методов и устройств диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций 14

Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Д.Р. Исследование электромагнитного поля управляемого магнитоэлектрического демпфера 28

Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Купцов Д.В. Исследование стабилизационных свойств двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента 36

Иванова О.В., Короткова Л.Н., Фаттахов М.М., Халиков Р.М. Надежное управление качеством функционирования электротехнического оборудования в 3D аддитивных технологиях 43

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Солодилова Н.З., Ахметжанов Ф.М., Крымский В.Г., Будеева О.Н. Основы разработки аппаратного и программного обеспечения интеллектуальной одежды. Часть 1. Анализ особенностей аппаратного обеспечения подсистем сенсоров и исполнительных элементов 50

Муравьева Е.А., Квиринг М.Д. Разработка адаптивного нечеткого управления в среде Matlab Simulink 63

Феоктистов Е.А., Феоктистов Н.А. Микропроцессорное управление электролизно-водного генератора для сварки и пайки ювелирных изделий 70

Бордюг А.С. Применение циклического тестирования аппаратного обеспечения морских систем управления 77

Агуреев А.В., Губарев Д.Е., Кочубей А.С., Зикий А.Н. Два фильтра бегущей волны 83

Шулаева Е.А., Сатчихина Л.А. Математическое моделирование реактора-полимеризатора для процесса полимеризации поливинилхлорида суспензионным методом 94

Дегтярев А.В., Козаченко Л.Н., Соболев А.С., Антипенко И.В. Кинематическая модель процесса маневрирования судна в условиях информационно сложной ситуации 100

Об авторах 106

CONTENT

<i>Shamil Z. Valiev's Memorial</i>	5
ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS	
<i>Marchenko A.A., Trudnev S.Yu.</i> Research of asynchronous motor loading process in generator braking mode	6
<i>Khlebtsov A.P., Zainutdinova L.Kh., Shilin A.N.</i> Development of methods and devices for diagnostics of power electrical equipment of transformer substations	14
<i>Sattarov R.R., Garafutdinov D.R.</i> Study of the electromagnetic field of a controlled magnetoelectric damper	28
<i>Hazieva R.T., Vasiliev P.I., Kupcov D.V.</i> Research of the two-section multifunctional integrated electromagnetic component stabilization properties	36
<i>Ivanova O.V., Korotkova L.N., Fattakhov M.M., Khalikov R.M.</i> Reliable quality management of electrical equipment functioning in 3D additive technologies	43
DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS	
<i>Solodilova N.Z., Akhmedzhanov F.M., Krymsky V.G., Budeeva O.N.</i> Fundamentals of the development of hardware and software for intelligent clothing. Part 1. Analysis of features of hardware for subsystems of sensors and actuators	50
<i>Muraveva E.A., Kviring M.D.</i> Engineering of adaptive fuzzy control in Matlab Simulink	63
<i>Feoktistov E.A., Feoktistov N.A.</i> Microprocessor control of electrolysis-water generator for welding and soldering jewel	70
<i>Bordyug A.S.</i> Application of cyclic testing of marine control hardware	77
<i>Agureev A.V., Gubarev D.E., Kochubey A.S., Zikiy A.N.</i> Two traveling wave filters	83
<i>Shulaeva E.A., Satchikhina L.A.</i> Mathematical modeling of a polymerizer reactor for the polyvinyl chloride polymerization process by the suspension method	94
<i>Degtyarev A.V., Kozachenko L.N., Sobolev A.S., Antipenko I.V.</i> Kinematic model of the process of ship maneuvering in the conditions of an informationally complex situation	100
About the authors	106



ПАМЯТИ ШАМИЛЯ ЗУФАРОВИЧА ВАЛИЕВА

19 ноября 2020 г. ушел из жизни Валиев Шамиль Зуфарович, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Заслуженный работник сферы обслуживания РБ, заместитель главных редакторов научно-периодических изданий «Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия экономика» и «Электротехнические и информационные комплексы и системы», заведующий кафедрой «Региональная экономика и управление» УГНТУ.

К величайшему прискорбию, яркие талантливые личности растрачивают свою жизненную энергию быстрее обычных людей.

Его судьба неразделимо связана с профессиональным образованием Республики Башкортостан. Начав профессиональную карьеру в 1973 г. в Уфимском авиационном институте (ныне УГАТУ), уже в 1987 г. он

присоединился к команде Уфимского филиала Московского технологического университета и с тех пор все свои силы и талант ученого и организатора отдал становлению и развитию вуза как одного из ведущих в регионе. С 1990 г. — он проректор по учебной работе, с 2003 г. — первый проректор, с 2008 г. — проректор по образовательной политике, с 2013 г. — начальник управления стратегического развития, с 2003 г. одновременно заведовал кафедрой региональной экономики и управления Института экономики и сервиса Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Огромная жизненная энергия и многогранность интересов позволяли Шамилю Зуфаровичу успешно вести научные исследования, активно развивать научный потенциал академической системы образования, решать прикладные проблемы. Основные направления его научной деятельности неразрывно связаны с организацией и руководством двумя научными школами: «Организационно-экономические основы развития региона» и «Социально-экономические аспекты взаимосвязи рынка труда и профессионального образования в Республике Башкортостан».

Результаты научно-исследовательской работы во многом нашли свое отражение в прикладных работах, осуществляемых в рамках грантов РГНФ, РФФИ, и в других научных трудах. Всего им издано более 170 научных публикаций, несколько десятков учебно-методических разработок, 5 авторских свидетельств, последнее из которых получено в 2020 г. — патент на изобретение «Автоматизированный способ пространственных экономических исследований».

За плодотворную научную и учебную деятельность в 2001 г. он удостоен звания Заслуженный работник сферы обслуживания Республики Башкортостан, в 2006 г. — звания Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации.

Под руководством Шамиля Зуфаровича сплотилась работоспособная команда профессионалов, деятельность которой во многом способствует укреплению позиций ИЭС УГНТУ в образовательном пространстве страны. Его талант ученого, организаторские способности, энергия, умение привлекать к себе людей позволили ему добиться больших успехов, званий и наград, и, самое главное, уважения коллег и учеников.

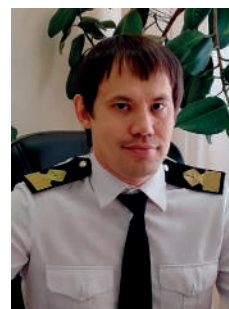
В памяти и сердцах учеников, студентов и коллег Шамиль Зуфарович навсегда останется мудрым и отзывчивым учителем, талантливым руководителем и наставником.

Разделяя скорбь с родными и близкими Шамиля Зуфаровича Валиева, храним в наших сердцах память о нем.



Марченко А. А.
Marchenko A. A.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Энергетические
установки и электрооборудование судов»,
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный
технический университет»,
г. Петропавловск-Камчатский,
Российская Федерация*



Труднев С. Ю.
Trudnev S. Yu.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Энергетические
установки и электрооборудование судов»,
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный
технический университет»,
г. Петропавловск-Камчатский,
Российская Федерация*

УДК 621.313

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-6-13

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Авторами статьи даётся обоснование проблемы испытаний электрических машин после ремонта на судоремонтных предприятиях Дальнего Востока.

В качестве решения проблемы предлагается теория о возможности проверки технического состояния электродвигателей под номинальным током без применения специализированных стендов.

Авторами статьи представлены результаты испытаний асинхронного двигателя в режиме искусственного нагружения без применения механической нагрузки, выполненных при помощи компьютерных моделей.

Первоначально авторы разработали математическую модель асинхронного двигателя с учетом потерь в стали. Далее проводилось определение параметров схемы замещения двигателя для работы с электрическими машинами определенных параметров. В результате была разработана компьютерная модель электродвигателя с характеристиками, отличными от указанных в паспорте машины, не более чем 9 % .

После проверки модели в номинальном режиме авторами проводились эксперименты по искусственному нагружению асинхронного двигателя.

Для этого модель электродвигателя многократно переводилась в режим генератора с рекуперативным торможением, при этом производились броски тока и изменение момента на валу. При помощи программы Matlab было посчитано значение эквивалентного тока.

Опытным путём была доказана возможность использования генераторного режима для испытаний электрических машин без применения механической нагрузки с возможностью получения номинальных параметров электродвигателя.

Ключевые слова: электродвигатель, испытания электрических машин, рекуперативное торможение, электрический ток, нагрузка, векторная диаграмма, моделирование.

RESEARCH OF ASYNCHRONOUS MOTOR LOADING PROCESS IN GENERATOR BRAKING MODE

The authors of the article substantiate the problem of testing electric machines after repair at ship repair enterprises in the Far East.

As a solution to the problem, a theory is proposed about the possibility of checking the

technical condition of electric motors under rated current without using specialized stands.

The authors of the article present the results of tests of an asynchronous motor in artificial loading mode without the use of mechanical load, made using computer models.

Initially, the authors developed a mathematical model of an asynchronous motor taking into account losses in steel. Further, parameters of the engine replacement circuit for working with electric machines of certain parameters were determined. As a result, a computer model of an electric motor with characteristics other than those indicated in the machine certificate was developed, not more than 9 %.

After checking the model in nominal mode, the authors conducted experiments on the artificial loading of an asynchronous motor.

For this, the electric motor model was repeatedly switched to generator mode with regenerative braking, while current throws and a change in torque on the shaft were carried out. Using the Matlab program, the equivalent current value was calculated.

Experimentally, the possibility of using the generator mode for testing electric machines without the use of mechanical load with the possibility of obtaining nominal parameters of the electric motor was proved.

Key words: electric motor, tests of electric machines, regenerative braking, electric current, load, vector diagram, modeling.

На сегодняшний день асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором является самым распространенным видом электродвигателей на рыбопромысловом флоте. На судоремонтных заводах камчатского края находятся сотни электродвигателей этого типа, требующих ремонта. Более 80 % электродвигателей находятся в стадии ремонта повторно. Это связано с плохим качеством первичного ремонта [1].

Основной проблемой является некачественная проверка электродвигателей, подвергавшихся ремонту. Чаще всего, электродвигатель проверяется в упрощенном режиме, т.е. в режиме холостого хода. Такая проверка не позволяет провести качественную диагностику электродвигателя, так как на холостом ходу невозможно оценить номинальные параметры машины. Получение таких данных может быть обеспечено только при проведении работы под нагрузкой.

Существуют промышленные стенды для испытания электрических машин с элементами компьютерной диагностики, но они обладают множеством недостатков, такими как высокая стоимость и сложность в эксплуатации. На сегодняшний день такие устройства не нашли применение на судоремонтных предприятиях Дальнего Востока. Выходом из сложившейся ситуации может быть стенд для испытания электрических машин под нагрузкой. Сложность таких систем в первую очередь связана с необходимостью использования механической

нагрузки. Этот процесс слишком трудоёмкий, он связан с необходимостью механического соединения нескольких электрических машин. Выходом может оказаться динамическое нагружение. Основным преимуществом такого типа нагружения является отсутствие механической нагрузки, электрические машины соединены только электрическими проводами. Самыми частыми неисправностями таких машин являются неисправности статорных обмоток.

В данной статье приводятся результаты испытаний по переводу модели асинхронного электродвигателя в режим генератора. Для получения достоверных результатов исследования было поставлено несколько задач. Во-первых, необходимо построить математическую модель электродвигателя с учетом возможности дальнейшего моделирования. Во-вторых, необходимо на основании полученной математической модели построить компьютерную модель электродвигателя средствами Simulink [2]. В-третьих, необходимо осуществить перевод модели электродвигателя в режим генератора.

При моделировании асинхронных двигателей чаще всего используют уравнения Парка-Горева, но данные уравнения являются обобщенными и не учитывают ряд важных процессов, таких как потери в стали и вытеснение тока в стержнях ротора. В последствии при проверке модели на соответствие реальной системе полученные параметры существенно отличаются от параме-

тров электродвигателя, прописанных в паспортных данных машины [3].

В рамках первого этапа исследования в среде *Simulink/Matlab* была разработана математическая модель асинхронного двигателя. Оцениваем эффекты насыщения магнитной системы основным магнитным потоком, вытеснение тока в стержнях ротора, значение потерь в стали. Далее уточняем параметры схемы замещения. Затем в математическую модель электродвигателя, уже имеющую все неизвестные ранее номинальные параметры, вводим нелинейные зависимости $L_m(\psi)$ и $R'_2(\omega_2)$ и учитываем потери в стали.

$$\begin{cases} i_{1x} = i_{n.cm} + (L_2 \cdot \Psi_{1x} - L_m \cdot \Psi_{2x}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); & i_{1y} = (L_2 \cdot \Psi_{1y} - L_m \cdot \Psi_{2y}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ i'_{2x} = (L_1 \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot \Psi_{1x}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); & i'_{2y} = (L_1 \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot \Psi_{1y}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2), \\ \bar{\Psi}_1 = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_m \cdot \bar{i}'_2; & \bar{i}_1 = (L_2 \cdot \bar{\Psi}_1 - L_m \cdot \bar{\Psi}_2) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ \bar{\Psi}_2 = L_m \cdot \bar{i}_1 + L_2 \cdot \bar{i}'_2; & \bar{i}'_2 = (L_1 \cdot \bar{\Psi}_2 - L_m \cdot \bar{\Psi}_1) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2). \end{cases} \quad (2)$$

Системы (1) и (2) записаны в координатах $x-y-0$, что позволяет оперировать произво-

Как общепринято, уравнения АД с короткозамкнутым ротором представляем через обобщенные векторы — в системе координат, вращающейся с произвольной угловой скоростью ω_k :

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1 \cdot \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{d\tau} + j \cdot \omega_k \cdot \bar{\Psi}_1; \\ 0 = R'_2 \cdot \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{d\tau} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \bar{\Psi}_2; \\ M = p \cdot L_m \cdot [\bar{i}_1 \cdot \bar{i}_2^*]; \\ J \frac{d\omega}{d\tau} = M - M_c. \end{cases} \quad (1)$$

дными потокосцеплений и соответствующими алгебраическими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{1x}}{d\tau} &= u_{1x} - \frac{R_1 \cdot L_2 \cdot \Psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_1 \cdot L_m \cdot \Psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \omega_k \cdot \Psi_{1y}; \\ \frac{d\Psi_{1y}}{d\tau} &= -\frac{R_1 \cdot L_2 \cdot \Psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_1 \cdot L_m \cdot \Psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} - \omega_k \cdot \Psi_{1x}; \\ \frac{d\Psi_{2x}}{d\tau} &= -\frac{R'_2 \cdot L_1 \cdot \Psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R'_2 \cdot L_m \cdot \Psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + (\omega_k - \omega) \cdot \Psi_{2y}; \\ \frac{d\Psi_{2y}}{d\tau} &= -\frac{R'_2 \cdot L_1 \cdot \Psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R'_2 \cdot L_m \cdot \Psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + (\omega_k - \omega) \cdot \Psi_{2x}; \\ M &= \frac{p \cdot L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} (\Psi_{1y} \cdot \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \cdot \Psi_{2y}); \\ J \frac{d\omega}{d\tau} &= M - M_c. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из векторной диаграммы следует:

$$\bar{i}_m = \bar{i}_1 + \bar{i}_2. \quad (4)$$

Обозначаем:

— индуктивности рассеяния статорной и роторной обмоток

$$L_{1\sigma} = L_1 - L_m, \quad L_{2\sigma} = L_2 - L_m; \quad (5)$$

— векторы потокосцеплений:

$$\bar{\Psi}_1 = L_{1\sigma} \cdot \bar{i}_1 + L_m \cdot \bar{i}_m; \quad \bar{\Psi}_2 = L_{2\sigma} \cdot \bar{i}'_2 + L_m \cdot \bar{i}_m. \quad (6)$$

Для данной модели справедливы в координатных осях $x-y-0$ выражения значений для потокосцеплений и токов:

$$\begin{cases} \Psi_{1x} = L_1 \cdot i_{1x} + L_m \cdot i'_{2x}; & \Psi_{1y} = L_1 \cdot i_{1y} + L_m \cdot i'_{2y}; \\ \Psi_{2x} = L_m \cdot i_{1x} + L_2 \cdot i'_{2x}; & \Psi_{2y} = L_m \cdot i_{1y} + L_2 \cdot i'_{2y}; \end{cases} \quad \Psi = \sqrt{\Psi_{1x}^2 + \Psi_{1y}^2}. \quad (7)$$

Влияние потерь в стали в представленной модели учтено увеличением активной составляющей i_{1x} тока статора на предварительно принятое значение тока потерь в стали $i_{n.cm}$.

При условии, что $i_{1R} = \sqrt{i_{1x}^2 + i_{1y}^2}$ и $i'_{2R} = \sqrt{i'_{2x}{}^2 + i'_{2y}{}^2}$, коэффициент мощности будет определяться выражением

$$\cos \varphi = |i_{1x} / i_{1R}|, \quad (8)$$

действующие значения токов фаз статора и ротора

$$I_1 = i_{1R} / \sqrt{3} \text{ и } I_2' = i'_{2R} / \sqrt{3}, \quad (9)$$

КПД

$$\eta = \frac{M \cdot \omega}{M \cdot \omega + \Delta P_{cm} + (i_{1R}^2 \cdot R_1 + i_{2R}'^2 \cdot R_2')}. \quad (10)$$

Первоначально оцененные мощность потерь в стали $\Delta P_{cm} \approx (P_{2n} / \eta_n - P_{2n}) \cdot 0,25$ и значение тока $i_{n.cm} = \Delta P_{cm} / (\sqrt{3} U_{1n})$, которое ей соответствует, необходимо определять в номинальном режиме. Это объясняется необходимостью получения номинальной мощности P_{2n} и КПД η_n двигателя.

Для подтверждения правильности математической модели в программе *Simulink* была разработана компьютерная модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, представленная на рисунке 1.

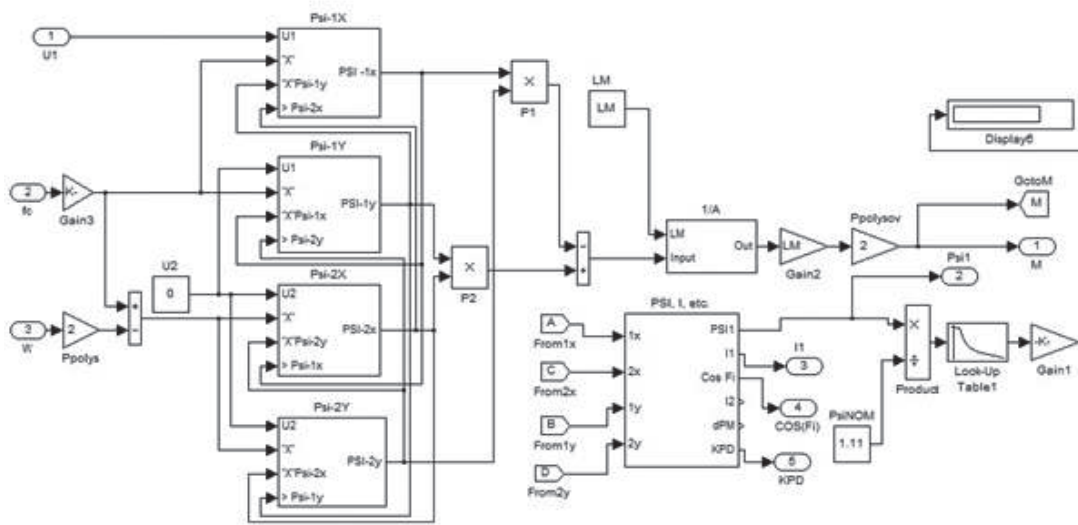


Рисунок 1. Модель асинхронного двигателя, разработанная в *Simulink*

Для корректной работы данной модели проводилось определение параметров схемы

замещения. В данном случае для электродвигателя 4A80A4 (таблица 1).

Таблица 1. Параметры схемы замещения

Параметр СЗ	Паспортные данные параметров схем замещения, Ом	Идентифицированные данные параметров схем замещения, Ом
	4A80A4	4A80A4
R_1	9,21	8,1
R_2'	5,20	5,8
X_1	6,0	6,5
X_2'	8,73	8,3
X_m	135	154

Как было сказано ранее, корректность работы компьютерной модели можно проверить в номинальном режиме.

На рисунке 2 представлена модель всей системы, учитывающая нагрузку, трение механических частей, а также с различными измерительными блоками для определения параметров модели.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования электродвигателя. Более подробный анализ показывает, что отклонения значения момента, номинальной скорости вращения, номинального тока, номинальной скорости, КПД модели электродвигателя не отличаются от номинальных значений электродвигателя более чем на 9 %.

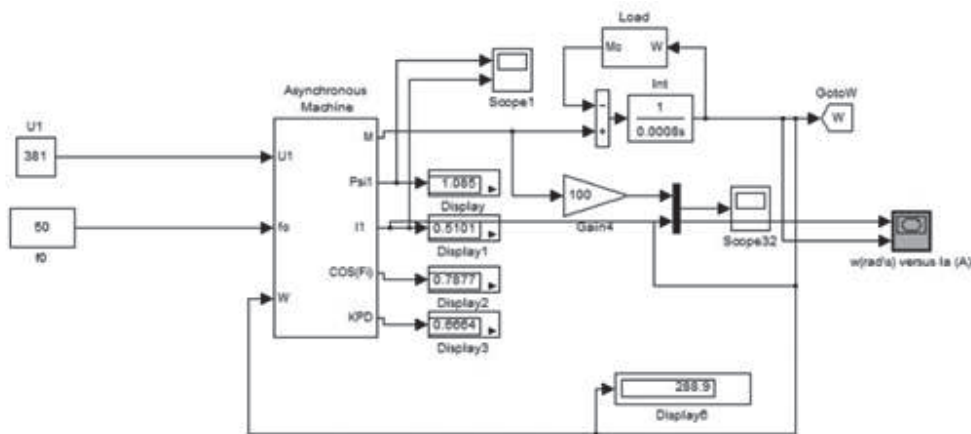


Рисунок 2. Модель динамической нагрузки асинхронного двигателя

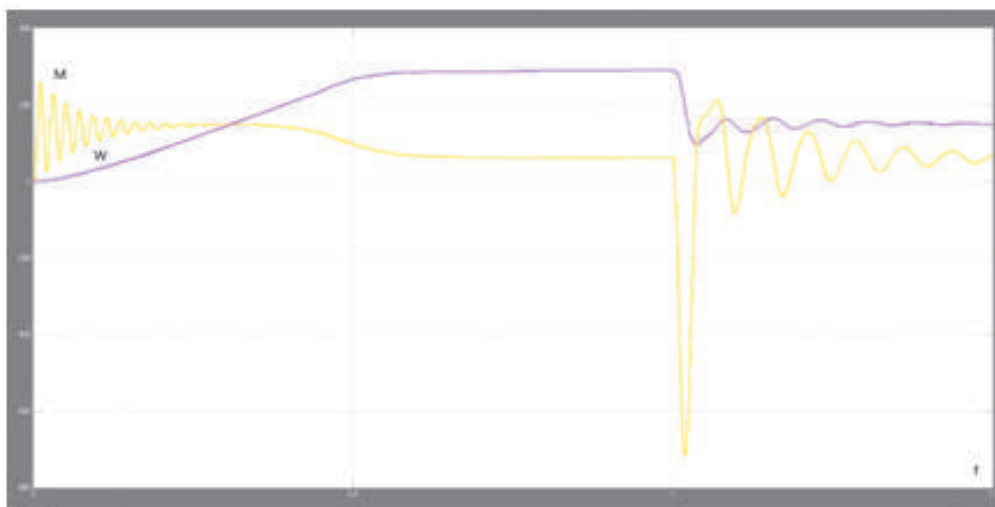


Рисунок 3. Результаты проверки модели

Основным требованием, предъявляемым к модели в рамках исследования, является корректное изменение значений координат электродвигателя при изменении частоты и напряжения [4].

Введение возмущения в работу электродвигателя приводит к возникновению переходных процессов, в результате которых изменяются параметры машины. В связи с этим получение нагрузочного режима для двигателя возможно получить различными способами, такими как противовключение или торможение. Так как способ изменения частоты питающего напряжения является самым перспективным в рамках данного исследования, поэтому были поставлены компьютерные эксперименты по введению электродвигателя в режим генератора с последующим торможением. При исследовании генераторного режима с рекуперативным торможением ключевым является эквивалентная механическая мощность, которая возникает на валу двига-

теля. Мощность пропорциональна угловой скорости и моменту двигателя [5].

Механическая характеристика электродвигателя в режиме рекуперативного торможения при изменении частоты напряжения изображена на рисунке 4.

Электродвигатель начинает работу на холостом ходу согласно механической характеристике. В точке 2 происходит изменение

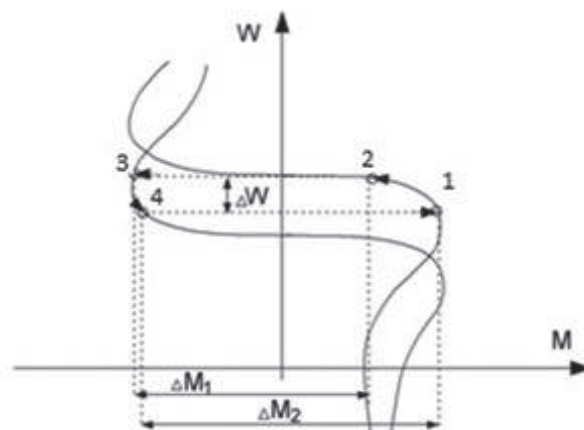


Рисунок 4. Механическая характеристика электродвигателя

частоты питающего напряжения, и рабочая точка смещается в точку 3 механической характеристики, соответствующей работе двигателя с изменением частоты напряжения. На валу двигателя происходит скачок момента ΔM_1 . Далее начинается процесс рекуперативного торможения с отдачей электрической энергии в сеть и нагружением асинхронного двигателя, который заканчивается в точке 3. Необходимым условием для

осуществления искусственного нагружения является долговременное нахождение его под нагрузкой [6], что не соответствует кратковременному режиму торможения на участке 1–2.

Возможным решением является циклическое изменение режимов работы от двигательного к генераторному. Таким образом, происходит перевод электродвигателя на механическую характеристику, которая соот-

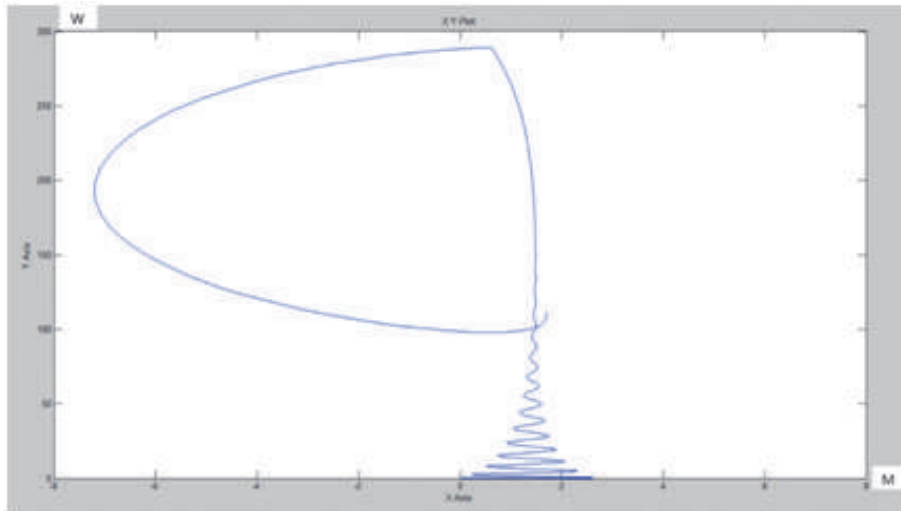
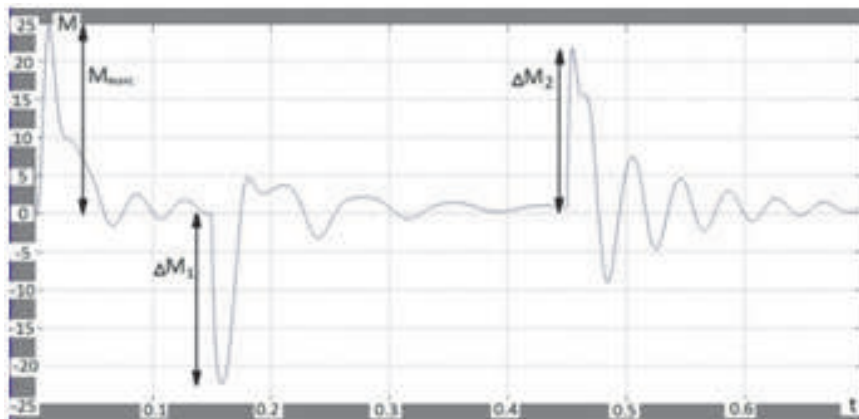
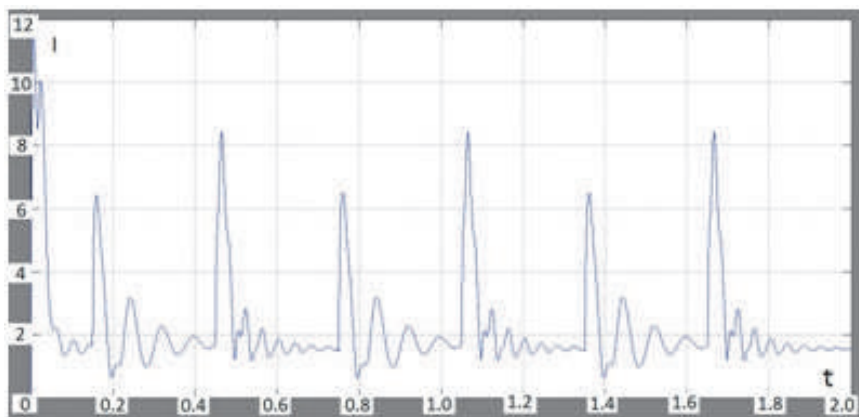


Рисунок 5. Механическая характеристика в процессе моделирования



а)



б)

а) момент асинхронного двигателя; б) значение тока асинхронного двигателя

Рисунок 6. Результаты моделирования при переводе электродвигателя в режим нагружения

ветствует двигательному режиму. Переходу из точки 3 в точку 1 соответствует скачок момента ΔM_2 . Далее происходит разгон электродвигателя до точки 2. Как было указано ранее, для оценки отдаваемой в сеть энергии в данном режиме цикл повторяется несколько раз.

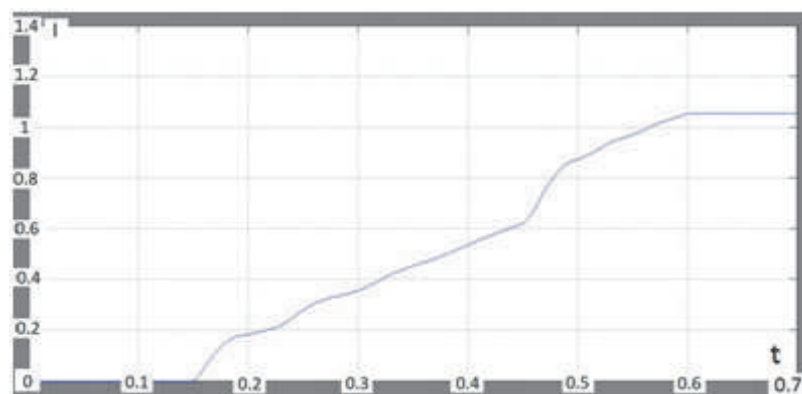
Переходу электродвигателя в режим генератора соответствует полученная в процессе моделирования механическая характеристика, представленная на рисунке 5. Видно, что механическая характеристика имеет классический вид.

На рисунке 6, а представлена диаграмма изменения момента двигателя. Также на рисунке указано максимальное значение момента M_{\max} . Значения ΔM_1 и ΔM_2 соответствуют таковым на рисунке 4.

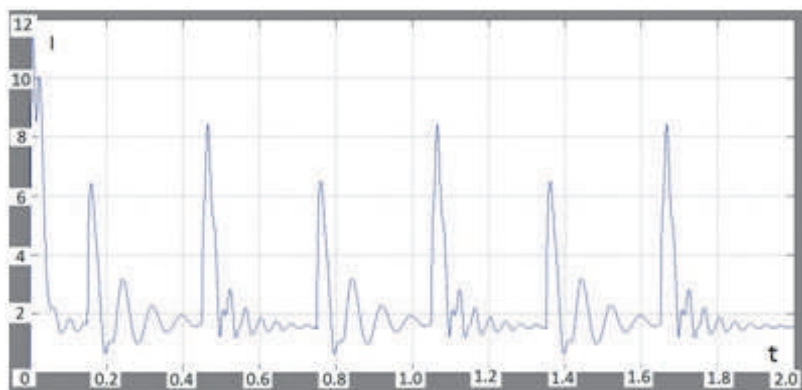
Основным критерием получения нагрузочного режима является ток электродвигателя.

На рисунке 7 показано изменение тока при многократном переводе электродвигателя в режим рекуперативного торможения.

Полученные результаты свидетельствуют о протекании нагрузочного режима при гене-



а)



б)

а) значение номинального тока; б) токи при циклическом переключении

Рисунок 7. Результаты эксперимента по искусственному нагружению

раторном торможении асинхронного электродвигателя. Среднее значение эквивалентного тока соответствует номинальному току, что является основным требованием к испытанию асинхронных электродвигателей. Полученные результаты в последствии могут быть использованы при проектировании установки для испытания асинхронных двигателей без применения механической нагрузки, но обладающей высокой степенью информативности в области диагностирования технического состояния электрических машин.

С точки зрения схемной реализации данная система может быть построена на основе частотного электропривода. Сегодня преобразователи частоты с непосредственной коммутацией могут работать в инверторном режиме и осуществлять беспрепятственную рекуперацию электрической энергии.

Вывод

В рамках данного исследования проводились испытания электродвигателя серии 4А80А4. Были получены оптимальные результаты при уменьшении частоты питаю-

щего напряжения в два раза. Нужно учесть, что для испытания асинхронных электродвигателей другой мощности для получения эквивалентного тока, соизмеримого с номинальным током, может потребоваться применение других значений частоты и напряже-

ния. Также нагрузочным режимом является не только рекуперативное торможение, но и торможение противовключением или применение электромагнитного тормоза. Данные варианты также требуют тщательной проработки.

Список литературы

1. Марченко А.А., Портнягин Н.Н. Исследование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 1–2. С. 408–412.

2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. С. 233–239.

3. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для высш. техн. заведений. 3-е изд. Л.: Энергия, 1978. С. 510–514.

4. Марченко А.А., Портнягин Н.Н. Моделирование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 6. С. 125–125.

5. Марченко А.А. Определение диапазона номинальной мощности электродвигателей при испытаниях методом динамического нагружения // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2012. № 2, т. 10. С. 38–44.

6. Марченко А.А., Портнягин Н.Н. Энергоэффективное нагружение асинхронных электродвигателей в процессе послеремонтных испытаний // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. 2014. Вып. 6. С. 76–84.

2. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0: ucheb. posobie* [Computer Modeling of Semiconductor Systems in MATLAB 6.0: Textbook]. Saint-Petersburg, KORONA print Publ., 2001, pp. 233–239. [in Russian].

3. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny: ucheb. dlya vyssh. tekhn. zavedenii* [Electrical Machines: Textbook for Universities]. 3rd ed. Leningrad, Energiya Publ., 1978, pp. 510–514. [in Russian].

4. Marchenko A.A., Portnyagin N.N. Modelirovanie protsessa dinamicheskogo nagruzheniya asinkhronnogo elektrodvigatelya [Modeling of Dinamic Loading of the Asynchronous Electric Motor]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» — Digital Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education»*, 2012, No. 6, pp. 125–125. [in Russian].

5. Marchenko A.A. Opredelenie diapazona nominal'noi moshchnosti elektrodvigatelei pri ispytaniyakh metodom dinamicheskogo nagruzheniya [Determination of Range of Rated Power of Electric Motors at Tests by the Method of Dynamic Loading]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2012, No. 2, Vol. 10, pp. 38–44. [in Russian].

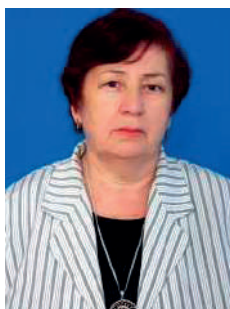
6. Marchenko A.A., Portnyagin N.N. Energoeffektivnoe nagruzhenie asinkhronnykh elektrodvigatelei v protsesse posleremontnykh ispytanii [Power Effective Loading of Asynchronous Electric Motors in the Course of Postrepair Tests]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova — Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*, 2014, Issue 6, pp. 76–84. [in Russian].

References

1. Marchenko A.A., Portnyagin N.N. Issledovanie protsessa dinamicheskogo nagruzheniya asinkhronnogo elektrodvigatelya [Research of Dinamic Loading of the Asynchronous Electric Motor]. *Fundamental'nye issledovaniya — Fundamental Research*, 2013, No. 1–2, pp. 408–412. [in Russian].



Хлебцов А. П.
Khlebtsov A. P.
аспирант,
ФГБОУ ВО
«Астраханский
государственный
университет»,
г. Астрахань,
Российская Федерация



Зайнутдинова Л. Х.
Zainutdinova L. Kh.
доктор педагогических
наук, действительный
член Академии
электротехнических
наук РФ, профессор
кафедры электротехники,
электроники и автоматики,
руководитель научно-
образовательного центра
«Альтернативная
энергетика»,
ФГБОУ ВО «Астраханский
государственный
университет»,
г. Астрахань, Российская
Федерация



Шилин А. Н.
Shilin A. N.
доктор технических
наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Электротехника»,
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный
технический университет»,
г. Волгоград, Российская
Федерация

УДК 621.311

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-14-27

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В настоящей работе проведен анализ оперативной информации патентных документов и научно-технической литературы с целью определения современного состояния и тенденций развития методов и средств контроля систем диагностики силового электрооборудования подстанций. Собранные материалы позволили провести анализ в соответствии с поставленными задачами патентных исследований. В результате проведенного анализа было установлено количество патентов по подгруппам патентной классификации. На основании анализа патентных документов и научно-технических источников, изданных за период с 2010 по 2019 годы, показано, что наиболее распространенным методом диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций является метод измерения электрических величин (36,82 % изобретений, 24,3 % источников научно-технической литературы), на втором месте находятся методы диагностики масла (23,7 % и 22,3 %), на третьем — тепловые методы (21 %), в меньшей степени используются методы регистрации частичных разрядов и вибродиагностики. Выявлены ограниченные возможности известных методов для целей оперативного прогнозирования предаварийных ситуаций. Разработана обобщенная классификация методов диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций, отражающая ранжирование методов по степени их использования. Обоснована целесообразность разработки интеллектуальной информационно-измерительной системы, использующей комплекс методов диагностики и обеспечивающей оперативное прогнозирование предаварийных ситуаций трансформаторных подстанций.

Ключевые слова: диагностика силового электрооборудования, методы диагностики, патентный поиск, трансформаторная подстанция, информационно-измерительная система, контроль

DEVELOPMENT OF METHODS AND DEVICES FOR DIAGNOSTICS OF POWER ELECTRICAL EQUIPMENT OF TRANSFORMER SUBSTATIONS

This work analyzes the operational information of patent documents and scientific and technical literature in order to determine the current state and development trends of methods and means for monitoring diagnostic systems for power electrical equipment of substations. The collected materials made it possible to conduct an analysis in accordance with the set objectives of patent research. As a result of the analysis, the number of patents was established by subgroups of the patent classification. Based on the analysis of patent documents and scientific and technical sources published for the period since 2010 to 2019, it is shown that the most common method for diagnosing power electrical equipment of transformer substations is the method of measuring electrical quantities (36.82% of inventions, 24.3% of scientific and technical literature), in second place are oil diagnostics methods (23.7% and 22.38%), in third — thermal methods (21%), methods of registering partial discharges and vibration diagnostics are used to a lesser extent. The limited possibilities of the known methods for the purposes of operational forecasting of pre-emergency situations are revealed. A generalized classification of diagnostic methods for power electrical equipment of transformer substations has been developed, reflecting the ranking of methods according to the degree of their use. The expediency of developing an intelligent information-measuring system using complexes of diagnostic methods and providing operational prediction of pre-emergency situations of transformer substations has been substantiated.

Key words: diagnostics of power electrical equipment, diagnostic methods, patent search, transformer substation, information-measuring system, control

Введение

В настоящее время на подстанциях эксплуатируется морально и физически устаревшее оборудование, которое может привести к потерям электроэнергии для потребителей и сбоям в электрических сетях. Разумеется, что нынешняя ситуация создает тенденцию к появлению видимых и скрытых отказов электрооборудования в системе электроснабжения потребителей. Аварийные ситуации проявляются, в первую очередь, из-за продолжительной наработки и большого физического износа электрооборудования электрических сетей, в том числе из-за использования большого числа силовых трансформаторов и выключателей с изношенными вводами. Решение проблемы по оценке технического состояния силового электрооборудования электрических сетей в значительной степени связано с внедрением в эксплуатацию действенных методов контроля и технического мониторинга оборудования. Ко всему прочему, диагностика необходима и обязательна для надежной и безотказной работы силовых электроаппаратов. В данной статье рассмотрены основные методы и средства контроля и диагностики оборудования в системах электроснабжения.

Анализ патентов

В качестве поисково-информационной системы была принята база данных Роспатента «Российские патенты на изобретения и патенты на полезные модели, заявки на изобретения, рефераты». Патентные исследования проводились в соответствии с установленными правилами ГОСТ «Патентные исследования. Содержание и порядок проведения» [1]. Охват патентного поиска принят с 2010 г. по 2019 г. [2]. В патентном поиске мы использовали следующие классификационные рубрики международной патентной классификации (далее МПК): раздел G «Физика», раздел H «Электричество»:

— G01R 31/00 «Устройства для определения электрических свойств; устройства для определения местоположения электрических повреждений; устройства для электрических испытаний, характеризующихся объектом, подлежащим испытанию, не предусмотренным в других подклассах»;

— G01R 31/02 «Испытание электрической аппаратуры, линий и элементов на короткое замыкание, обрыв, утечку или неправильное соединение»;

— G01R 31/04 «Проверка соединений, например штепсельных соединений или неразъемных соединений»;

— G01R 31/06 «Электрических обмоток, например на полярность»;

— G01R 31/12 «Испытание диэлектрика на электрическую прочность или пробивное напряжение»;

— G01R 31/28 «Испытание электронных схем, например, с помощью прибора для каскадной проверки прохождения сигнала»;

— H02H 7/04 «Схемы защиты трансформаторов»;

— H02H 7/045 «Дифференциальная защита трансформаторов»;

— H02H 7/26 «Секционированная защита кабельных или воздушных сетей, например, для отключения участка, на котором произошло короткое замыкание, замыкание на землю или дуговой разряд»;

— H02H 7/28 «Для замкнутых цепей»;

— H02H 3/00 «Схемы защиты, осуществляющие автоматическое отключение и непосредственно реагирующие на недопу-

стимое отклонение от нормальных электрических рабочих параметров с последующим восстановлением соединения или без такового»;

— H02H 3/22 «малой длительности, например от молнии».

Для поиска источников информации, по которым проводился анализ, использовались полные тексты патентных документов. Охват поиска составил — 10 лет (с 2010 г. по 2019 г.).

При проведении детального разбора патентной информация в качестве источника для последующего рассмотрения выбран 41 документ к охраняемым в одиннадцати рубриках МПК [3–43]. Полученные сведения позволили выполнить исследование в согласовании с установленными проблемами в данном патентном поиске. В итоге проведенного разбора патентной литературы нами было определено количество патентов по подгруппам патентной классификации в промежутке с 2010 по 2019 гг., что представлено в таблице 1.

Таблица 1. Количество охраняемых документов по подгруппам патентной классификации

МПК	Год публикации										Итого
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
G01R 31/00	–	–	1	2	2	1	2	2	–	–	10
G01R 31/02	–	–	2	–	–	2	–	1	3	–	8
G01R 31/04	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	1
G01R 31/06	–	–	–	–	–	1	–	1	1	–	3
G01R 31/12	–	–	–	1	4	–	–	1	1	–	7
G01R 31/28	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	1
H02H 7/045	–	–	–	1	–	–	–	–	–	1	2
H02H 7/04	–	–	–	–	–	2	–	1	–	–	3
H02H 7/026	–	–	–	–	–	–	–	2	–	–	2
H02H 3/027	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	1
H02H 3/22	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1
H02H 3/00	–	–	1	–	–	–	–	1	–	–	2
Итого	–	–	4	4	7	6	2	9	7	2	41

Количество патентов для рассмотренных подгрупп за период с 2012 по 2019 г. отражено на рисунке 1.

Количество патентных документов, выданных по классификационным рубрикам, показано на рисунке 2.

На основании проведенного анализа установлено, что наибольшее количество изобретений, направленных на развитие методов и средств контроля систем диагностики силового электрооборудования подстанций, отно-

сится к подгруппе G01R 31/00. Также достаточно большое количество изобретений представлено в подгруппах G01R 31/02 и G01R 31/12.

Согласно [44], на практике используются пять методов диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций:

- измерение электрических величин;
- диагностика маслонаполненного оборудования;

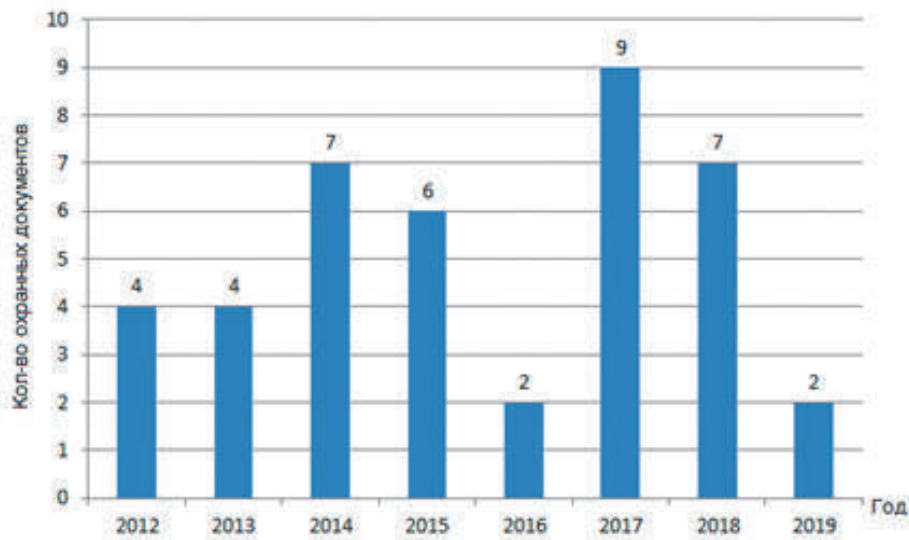


Рисунок 1. Количество патентов, выданных в России, по тематике «Диагностика силового электрооборудования» за 2012-2019 гг.

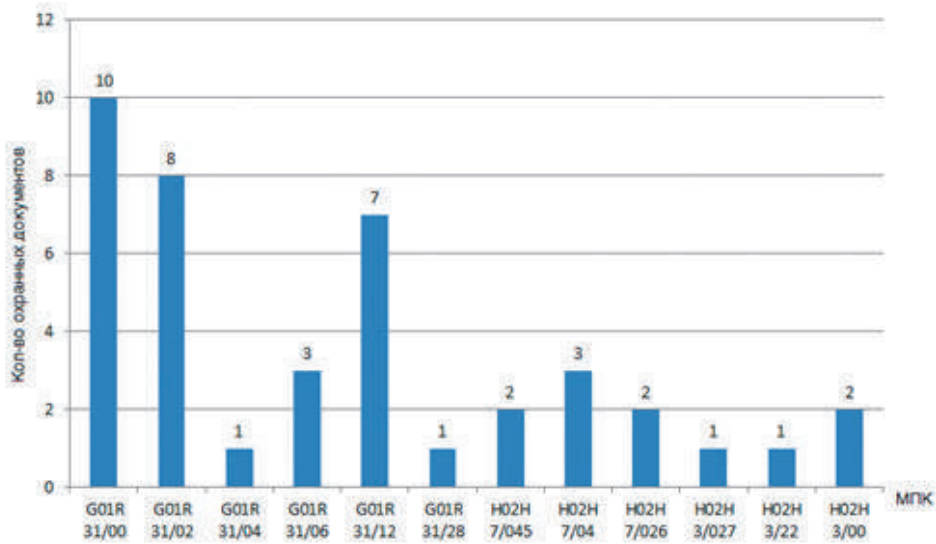


Рисунок 2. Количество патентов, выданных в России, по классификационным рубрикам МПК по тематике «Диагностика силового электрооборудования» за 2010–2019 гг.

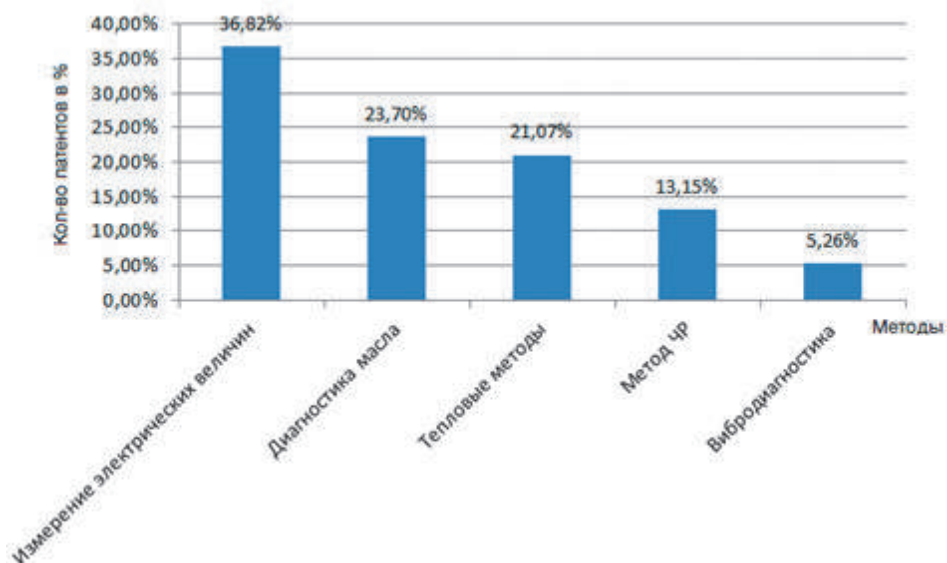


Рисунок 3. Распределение патентов по методам диагностики электрооборудования, %

- тепловой метод диагностики;
- метод измерения частичных разрядов;
- вибродиагностика.

В рассмотренных изобретениях используются различные методы диагностики силового электрооборудования. На рисунке 3 показано, в каком количестве изобретений затрагиваются те или иные методы. За 100 % принято общее количество рассмотренных изобретений.

Исследование показало, что в рассмотренных изобретениях наиболее часто применяются: измерение электрических величин, диагностика масла, тепловые методы. В меньшей степени используются регистрация частичных разрядов и вибродиагностика.

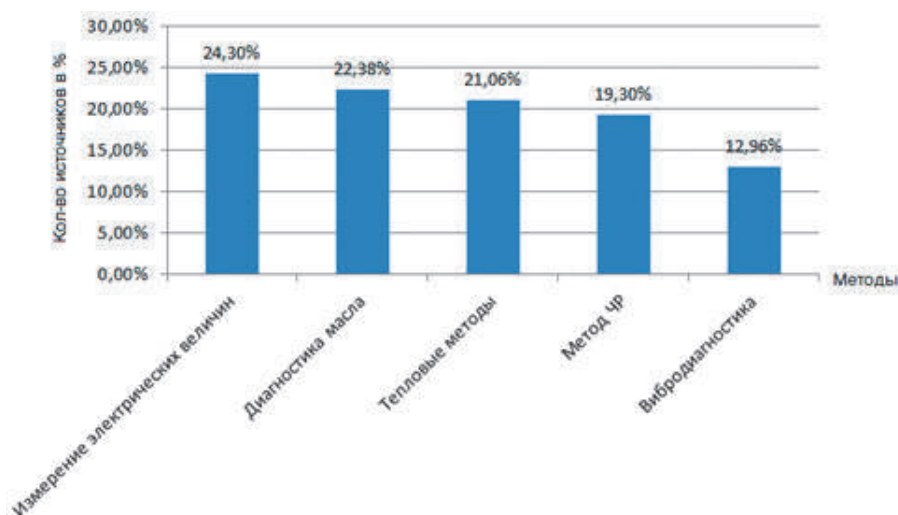


Рисунок 4. Количество источников научно-технической литературы по методам диагностики электрооборудования, %

Данное исследование показало, что, также как и в случае анализа патентных документов, наиболее часто применяются методы измерения электрических величин, диагностика масла, тепловые методы. В меньшей степени используются регистрация частичных разрядов и вибродиагностика.

На основе проведенного анализа в настоящем исследовании разработана обобщенная классификация методов диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций, которая представлена на рисунке 5.

Охарактеризуем выделенные методы диагностики силового электрооборудования.

Электрические измерения

Исходя из анализа научно-технической литературы, нами выделены следующие виды электрических измерений:

Анализ научно-технической литературы

Кроме анализа патентной информации, в настоящем исследовании также проведен анализ других видов источников, а именно научной литературы: отчеты об исследовательских работах, статьи в научно-технических журналах, учебные пособия, труды научно-практических конференций, государственные стандарты РФ и т.д. Охват поиска составил — 21 год (с 2000 г. по 2020 г.). Объем литературы: 67 источников. В настоящем исследовании проведен анализ частоты использования указанных выше методов диагностики силового электрооборудования (рисунок 4).

1. Измерение тока и потерь холостого хода;
2. Анализ частотных характеристик;
3. Измерение коэффициента трансформации;
4. Измерение коэффициента мощности и емкости / тангенса угла диэлектрических потерь;
5. Измерение сопротивления обмоток постоянному току.

Указанные методы электрических измерений имеют свои достоинства и недостатки. В качестве их достоинств можно выделить высокую точность измерения, информативность и возможность выявления дефектов на раннем этапе их развития. Недостатком данных методов является то, что при измерении необходимо отключать электрооборудование

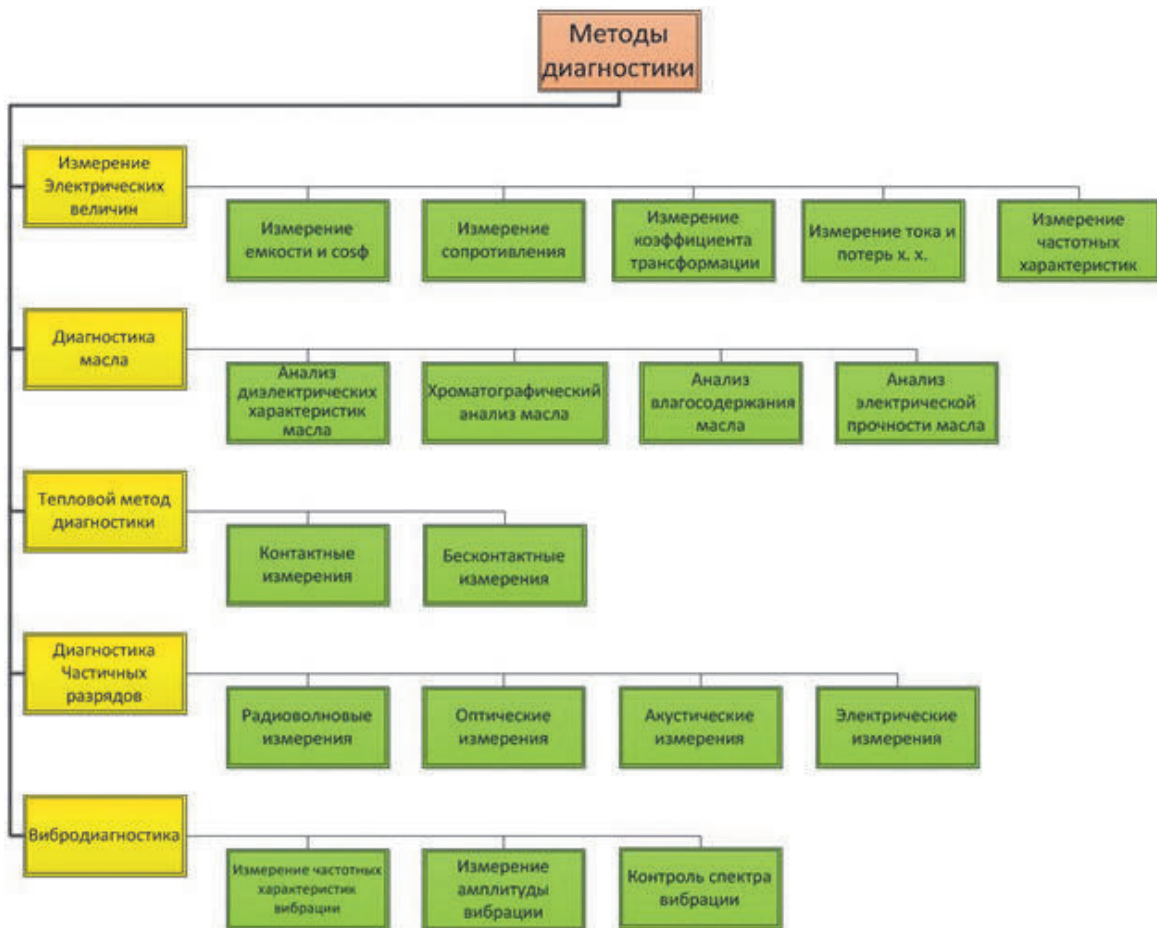


Рисунок 5. Обобщенная классификация методов диагностики электрооборудования трансформаторных подстанций с ранжированием методов по степени их использования

от сети. Как правило, диагностику электрических величин производят согласно регламенту технического обслуживания. В связи с этим нет возможности оперативной диагностики состояния электрооборудования трансформаторных подстанций.

Диагностика масла

Многолетнее воздействие электромагнитных полей вследствие длительной эксплуатации оборудования приводит к значительному изменению химических и электрофизических свойств масла, что неминуемо приводит к ухудшению его электроизоляционных качеств, а также может стать причиной изменения занимаемого объёма. Всё перечисленное вкуче несёт значительную опасность не только для самого оборудования подстанции, но и обслуживающего персонала на её территории.

Таким образом, заблаговременная диагностика состояния масла является необходимым условием безаварийной эксплуатации маслонаполненного электрооборудования [45].

Существуют четыре вида анализа трансформаторного масла:

- анализ электрической прочности масла;
- хроматографический анализ;
- анализ диэлектрических характеристик масла;
- анализ влагосодержания масла [46].

Диагностика масла применяется для регулярной оценки состояния и выявления медленно развивающихся дефектов оборудования. Она позволяет с высокой точностью определить неисправности в оборудовании. Но, как и в методах диагностики электрических величин, у диагностики трансформаторного масла нет оперативности измерений. Необходимы специальные лаборатории, чтобы проанализировать трансформаторное масло и выявить дефект.

Существуют датчики содержания газов и содержания влаги в масле, которые могут применяться в непрерывной диагностике. Такие типы датчиков определяют лишь допустимые значения контролируемых величин

состояния масла [46]. Стоит отметить, что для подробной диагностики трансформаторного масла необходимо дополнительное специализированное оборудование [46].

Тепловой метод контроля

Тепловые методы контроля (ТМК) базируются на измерении, анализе и оценке температуры исследуемого оборудования. Основным критерием использования ТМК в диагностике является наличие в контролируемом объекте тепловых потоков [47]. Существуют два основных вида измерения температуры применимо к диагностике силового электрооборудования:

— *контактные*. Устанавливаются непосредственно на корпусе оборудования. К контактными приборам можно отнести термометры, основанные на температурной зависимости термо-ЭДС, термометры, основанные на температурной зависимости электрического сопротивления вещества;

— *бесконтактные*. Температуру нагретого тела можно оценивать на основании измерения характеристик его теплового излучения, представляющего собой различной длины электромагнитные волны.

Тепловой метод контроля является достаточно эффективным. Он позволяет оперативно измерять температуру объекта. Для измерения тепловых параметров не требуется технически сложного и дорогого оборудования. К тому же, современные устройства измерения температуры обладают достаточно высокой точностью. ТМК на электрических станциях и подстанциях может использоваться практически для любого вида электрооборудования, в отличие от остальных методов диагностики. К недостатку можно отнести то, что данный метод диагностики не допускает выявления дефектов на ранней стадии развития.

Диагностика частичных разрядов

Частичным разрядом (ЧР) называют искровой разряд очень малой мощности, который образовывается внутри или на корпусах высоковольтной изоляции высокого или среднего классов напряжений электрооборудования. К тому же, ЧР может возникать и на поверхности в изоляциях высоковольтных токоведущих кабелей.

Одиночный ЧР не влечёт за собой особой опасности — это краткое событие, неспособное навредить электрооборудованию. Но, возникая на регулярной основе, такие разряды приводят к разрушению изоляции, и, как следствие, к короткому замыканию [48].

Выделяют следующие способы измерения и контроля частичных разрядов:

- оптические измерения;
- акустические измерения,
- радиоволновые измерения;
- электрические измерения.

Одним из преимуществ использования для диагностики вышеупомянутых измерений является то, что они позволяют обнаружить частичные разряды в локализованных местах на ранних стадиях зарождения. Использование разносторонних методов измерений ЧР позволяет оценить свойства развивающегося дефекта. Ко всему прочему, измерение частичных разрядов происходит без отключения электрооборудования от сети. Но существуют и ряд недостатков. К ним относятся низкая помехозащищенность, которая увеличивает погрешность измерений, и высокая стоимость оборудования для регистрации ЧР. К тому же необходимо применение нескольких различных типов датчиков ЧР для наиболее эффективного обеспечения мониторинга частичных разрядов в силовом электрооборудовании, работающем без отключения от сети.

Вибродиагностика

Вибрация — механические колебания в контролирующем месте электрооборудования относительно среднего, положения покоя. Вибрация является одним из наиболее эффективных и обобщенных параметров, который применяется в отключенном состоянии оценки текущего технического состояния электрооборудования [49].

Существует несколько типов применения метода вибрационной диагностики технического состояния силового электрооборудования и активной части трансформатора:

- измерение амплитуды вибрации на стенке бака трансформатора;
- анализ спектра вибрации;
- частотный способ контроля уровня прессы обмоток.

К преимуществам вибродиагностики можно отнести следующее. Метод позволяет определять скрытые дефекты в силовом электрооборудовании и не требуется разборки оборудования. К тому же существует возможность обнаружения дефектов на этапе их возникновения. К недостаткам вибродиагностики можно отнести: повышенные требования к способу установки датчика вибрации, зависимость параметров вибрации от большого количества сторонних источников вибрации и сложность выявления истинного дефектного сигнала вибрации, обусловленного наличием неисправности; небольшая точность диагностики. К тому же нет нормативной базы (стандартов) по вибродиагностике электрооборудования, имеются только методические рекомендации.

Вывод

1. В настоящей работе проведен анализ патентных документов по теме «Диагностика силового электрооборудования трансформаторных подстанций». Глубина патентного поиска с 2010 г. по 2019 г. Отобрано 41 описание к охраняемым документам. Установлено, что наибольшее количество изобретений, направленных на развитие методов и средств контроля систем диагностики силового электрооборудования подстанций, относится к подгруппе G01R 31/00. Также достаточно большое количество изобретений представлено в подгруппах G01R 31/02 и G01R 31/12.

2. Также в настоящем исследовании проведен анализ методов диагностики силового электрооборудования на основе изучения научно-технической литературы: отчеты об исследовательских работах, статьи в научно-технических журналах, учебные пособия, труды научно-практических конференций, государственные стандарты РФ и т.д. Охват

поиска составил — 21 год (с 2000 г. по 2020 г.). Выявлено 67 источников.

3. На основании проведенного анализа показано, что наиболее распространенным методом диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций является метод измерения электрических величин (36,82 % изобретений, 24,3 % источников научно-технической литературы), на втором месте находятся методы диагностики масла (23,7 % и 22,38 %), на третьем — тепловые методы (21 %). В меньшей степени используются регистрация частичных разрядов и вибродиагностика.

4. Разработана обобщенная классификация методов диагностики силового электрооборудования трансформаторных подстанций, отражающая ранжирование методов по степени их использования.

5. Выявлены ограниченные возможности известных методов для оперативного прогнозирования предаварийных ситуаций, а именно: методы электрических измерений, как правило, реализуются при отключенном трансформаторе; методы диагностики масла требуют взятия проб масла и проведения анализа масла в специализированных лабораториях; тепловым методам пока еще не хватает методик для оценки ситуации и принятия решения; вибродиагностика и контроль частичных разрядов сложны в реализации и имеют сравнительно невысокую точность.

6. На современном этапе цифровизации электроэнергетики целесообразна и становится возможной разработка интеллектуальной информационно-измерительной системы, использующей комплексные методы диагностики и обеспечивающей оперативное прогнозирование предаварийных ситуаций трансформаторных подстанций.

Список литературы

1. ГОСТ Р 15.011-96. Система разработки и постановки продукции на производство (СППП). Патентные исследования. Содержание и порядок проведения // Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. М., Стандартинформ, 1996.

2. Федеральный институт промышленной собственности: [сайт]. URL: <https://new.fips.ru>.

3. Пат. 2453859 РФ. Устройство для определения допустимых величины и длительности перегрузки силового маслонаполненного трансформаторного оборудования / В.А. Туркот, А.А. Филиппов, Г.М. Цфасман. 2010134228/28, Заявлено 18.08.2010; Опубл. 27.02.2012. Бюл. № 17.

4. Пат. 2402139 РФ. Система и способ мониторинга и управления режимом работы

- силового трансформатора / Вентуринишейм Луиш Америко, Жервину Силвейра Жозе Жералду. 2008102141/09, Заявлено 14.12.2005; Оpubл. 20.10.2020. Бюл. № 29
5. Пат. 2468407 РФ. Автоматизированная система мониторинга, защиты и управления оборудованием электрической подстанции / И.Н. Дорофеев, Д.В. Иванов. 2011124595/08, Заявлено 17.06.2011; Оpubл. 27.11.2012. Бюл. № 33
6. Пат. 2554574 РФ. Система мониторинга высоковольтного электротехнического оборудования (ВЭО) / С.М. Рассальская, А.А. Сахно, С.П. Конограй. 2013127145/08, Заявлено 14.06.2013; Оpubл. 27.06.2015. Бюл. № 18.
7. Пат. 2638129 РФ. Способ диагностики силовых трансформаторов / Р.А. Гимадиев, И.С. Мухортов, И.В. Ившин, Ф.Ф. Билалов, Р.Р. Валиуллин, А.И. Шайдуков, Р.Р. Бикчурин. 2016108527, Заявлено 09.03.2016; Оpubл. 14.09.2017. Бюл. № 26.
8. Пат. 2649646 РФ. Способ контроля ресурса электрической изоляции трансформатора / С.С. Малафеев. 2017111399, Заявлено 04.04.2017; Оpubл. 04.04.2018. Бюл. № 10
9. Пат. 2613130 РФ. Автоматизированное устройство мониторинга оборудования электрической подстанции / А.В. Балашов, С.Р. Карпиков, А.В. Есафов. 2015150670, Заявлено 25.11.2015; Оpubл. 15.03.2017. Бюл. № 8.
10. Пат. 2634125 РФ. Устройство диагностики силового масляного трансформатора / К.В. Капелько, Д.В. Подунов, Г.М. Киселев. 2016148369, Заявлено 09.12.2016; Оpubл. 14.10.2017. Бюл. № 30
11. Пат. 2434236 РФ. Способ диагностики высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, О.И. Моногаров. 2010131471, Заявлено 27.07.2010; Оpubл. 20.11.2011. Бюл. № 32.
12. Пат. 2515121 РФ. Способ определения допустимых величины и длительности перегрузки силового маслонаполненного трансформаторного оборудования / Р.Г. Мустафин, Д.Ф. Губаев. 2012154161/28, Заявлено 13.12.2012; Оpubл. 20.05.2014. Бюл. № 13.
13. Пат. 9296 РБ. Устройство для защиты силового трансформатора от перегрева обмотки и масла / Д.И. Зализный, Д.М. Лось. 20031021, Заявлено 10.11. 2003.
14. Пат. 8204 РБ. Устройство защиты силового трансформатора от перегрева / Д.И. Зализный, О.Г. Широков, Г.О. Широков. 20110846, Заявлено 31.10.2011.
15. Пат. 2330297 РФ. Способ неразрушающей диагностики предаварийного состояния электрооборудования с обмотками высокого напряжения / Л.А. Никонец, А.Э. Бубряк. 2006140027/28, Заявлено 13.11.2006; Оpubл. 27.07.2008. Бюл. № 21.
16. Пат. 2446406 РФ. Способ диагностики силовых трехобмоточных трансформаторов / В.А. Бабарушкин. 2009126349/28, Заявлено 08.07.2009; Оpubл. 27.03.2012. Бюл. № 9.
17. Пат. 2511038 РФ. Способ контроля технического состояния высоковольтного трансформаторного оборудования / Н.В. Киншт, Н.Н. Петрунько. 2012133227/28, Заявлено 02.08.2012; Оpubл. 10.04.2013. Бюл. № 10.
18. Пат. 2592089 РФ. Система мониторинга состояния основного и вспомогательного оборудования / Ю.В. Брусилковский. 2015123281/06, Заявлено 17.06.2015; Оpubл. 20.07.2016. № 20.
19. Пат. 2611554 РФ. Способ контроля технического состояния электроэнергетических объектов / В.Л. Лосев, Д.Г. Шевердин, В.В. Колков. 2015152372, Заявлено 07.12.2015; Оpubл. 28.02.2017. Бюл. № 7.
20. Пат. 2642521 РФ. Устройство для диагностики межвитковых замыканий в обмотках силового трансформатора / А.В. Белов, Ю.П. Ильин. 2016124947, Заявлено 21.06.2016; Оpubл. 25.01.2018. Бюл. № 3.
21. Пат. 2647224 РФ. Способ оценки состояния бумажной изоляции маслонаполненных электрических аппаратов / Л.А. Дарьян, А.В. Маскимиченко. 2016141619, Заявлено 24.10.2016; Оpubл. 14.03.2018. Бюл. № 8
22. Пат. 2710101 РФ. Способ контроля качества трансформаторного масла / А.Н. Лобанов, К.В. Коваленко. 018122245, Заявлено 19.06.2018; Оpubл. 24.12.2019. Бюл. № 36.
23. Пат. 2559785 РФ. Способ контроля ресурса изоляции силового трансформатора / С.И. Малафеев, Ю.В. Тихонов. 2014121132/07, Заявлено 23.05.2014; Оpubл. 10.08.2015. Бюл. № 22.

24. Пат. 2704606 РФ. Система непрерывного контроля температуры контактов масляных выключателей / А.М. Петров, Н.В. Савин. 2019115720, Заявлено 22.05.2019; Оpubл. 30.10.2019. Бюл. № 31.
25. Пат. 2525165 РФ. Способ диагностирования технического состояния высоковольтного трансформатора напряжения в сети генераторного напряжения электростанции / В.М. Геворкян, Ю.А. Казанцев. 201310836/28, Заявлено 26.02.2013; Оpubл. 10.08.2014. Бюл. №22.
26. Пат. 2645811 РФ. Способ выявления витковых замыканий в обмотках трехфазных трансформаторов / М.Л. Сапунков, Н.В. Давыдов. 2016147778, Заявлено 06.12.2016; Оpubл. 28.02.2018. Бюл. № 7.
27. Пат. 2700368 РФ. Способ определения технического состояния цифрового трансформатора по параметрам частичных разрядов в изоляции / С.Н. Литвинов, А.В. Гесенков и др. 2018146407, Заявлено 26.12.2018; Оpubл. 16.09.2019 Бюл. № 26.
28. Пат. 2700809 РФ. Селективная автоматизированная система диагностики и контроля состояния изоляции силовых кабельных линий / В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина. 2018135617, Заявлено 09.10.2018; Оpubл. 23.09.2019. Бюл. № 27.
29. Пат. 2399925 РФ. Устройство для контроля состояния изоляции силовых трансформаторов / С.И. Чичёв, В.Ф. Калинин, Е.И. Глинкин. 2009128278/28, Заявлено 21.07.2009; Оpubл. 20.09.2010. Бюл. № 26.
30. Пат. 2504913 РФ. Интеллектуальные электронные устройства для системы автоматизации подстанции и способ ее разработки и управления / Т. Вернер, Ж. Турнье, С. Рихтер. 2011133066/08, Заявлено 22.12.2009; Оpubл. 20.01.2014. Бюл. № 2.
31. Пат. 2563331 РФ. Способ определения потерь в трансформаторе и устройство для его реализации / С.С. Костинский, В.В. Михайлов. 2014122308/28, Заявлено 02.06.2014; Оpubл. 20.09.2015. Бюл. № 26.
32. Пат. 2650894 РФ. Автоматизированная система мониторинга, защиты и управления оборудованием электрической подстанции / Ф.А. Базаров, М.А. Грибков, С.А. Панфилов. 2016142213, Заявлено 27.10.2016; Оpubл. 18.04.2018. Бюл. № 11.
33. Пат. 2723155 РФ. Способ обнаружения и классификации электрического разряда на электрооборудовании / И.С. Костромин, И.А. Погибельский и др. 2019116560, Заявлено 29.05.2019; Оpubл. 09.06.2020. Бюл. № 16.
34. Пат. 187872 РФ. Устройство диагностики перегрева контактной детали силового электрооборудования / А.И. Горшков, Б.Н. Городецкий и др. 2018146704, Заявлено 25.12.2018; Оpubл. 21.03.2019. Бюл. № 9.
35. Пат. 2647995 РФ. Устройство диагностики контактов силового электрооборудования / А.И. Горшков, Б.Н. Городецкий и др. 2016113389, Заявлено 08.04.2016; Оpubл. 21.03.2018 Бюл. № 9.
36. Пат. 2709604 РФ. Способ диагностирования электрической изоляции в процессе дистанционного компьютерного мониторинга технологического оборудования / А.В. Костюков, С.Н. Бойченко. 2018127035, Заявлено 23.07.2018; Оpubл. 18.12.2019. Бюл. № 35.
37. Пат. 2709749 РФ. Способ контроля и диагностики технического состояния системы «источник питания — нагрузка» / В.Ф. Вербов, Б.Н. Просянкин, А.Г. Сукиязов. 2018139478, Заявлено 07.11.2018; Оpubл. 19.12.2019. Бюл. № 35.
38. Пат. 2720638 РФ. Устройство для мониторинга и диагностики высоковольтных линейных полимерных изоляторов / Н.И. Безбородов, К.В. Карасюк. 2019134125, Заявлено 23.10.2019; Оpubл. 12.05.2020. Бюл. № 14.
39. Пат. 2495375 РФ. Способ дистанционного обследования объектов электрических сетей / Г.К. Макаренко, А.М. Алешечкин. 2012120498/28, Заявлено 17.05.2012; Оpubл. 10.10.2013. Бюл. № 28.
40. Пат. 2518843 РФ. Устройство для диагностики и контроля электрических цепей переменного тока / С.Е. Волощенко, А.Г. Тарахтелюк. 2012140790/28, Заявлено 24.09.2012; Оpubл. 10.06.2014. Бюл. № 16.
41. Пат. 2680160 РФ. Способ диагностики и мониторинга технического состояния конденсаторов связи под рабочим напряжением / И.Б. Уразалиев и др. 2017110417, Заявлено 29.03.2017; Оpubл. 18.02.2019. Бюл. № 5.

42. Пат. 2489726 РФ. Способ определения остаточного коммутационного ресурса высоковольтного выключателя / Г.П. Муссонов. 2012108015/28, Заявлено 01.03.2012; Оpubл. 10.08.2013. Бюл. № 22.

43. Пат. 2580183 РФ. Способ диагностики электрического коммутационного аппарата / В.И. Дубров, Е.В. Кириевский. 2015100941/28, Заявлено 12.01.2015; Оpubл. 10.04.2016. Бюл. № 10.

44. Хлебцов А.П., Зайнутдинова Л.Х. Анализ состояния износа электрооборудования подстанций и методы диагностирования аварийных режимов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2019. № 2 (27). С. 17-20.

45. Шилин А.Н., Шилин А.А., Артюшенко Н.С., Деметьев С.С. Приборы контроля и диагностики в электроэнергетике: учеб. пособие. Волгоград, 2017. 132 с. ISBN 978-5-9948-2440-5.

46. Хлебцов А.П., Зайнутдинова Л.Х., Шилин А.Н. Датчики контроля технического состояния силовых трансформаторов // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: матер. II Междунар. науч.-техн. конф. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. С. 38–44. ISBN 978-5-4221-1298-2.

47. Хальясмаа А.И. и др. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 64 с. ISBN 978-5-7996-1493-5.

48. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. 367 с.

49. Гавриленко А.В., Долин А.П. Методика вибрационного обследования силовых трансформаторов, 2004. 18 с.

References

1. *GOST R 15.011-96. Sistema razrabotki i postanovki produktzii na proizvodstvo (SRPP). Patentnye issledovaniya. Soderzhanie i poryadok provedeniya* [State Standard R 15.011-96 System for the Development and Launching of Products. Patent Research. Content and Procedure]. Sistema standartov po informatsii, bibliotechnomu i izdatel'skomu delu [System of Standards for Information, Librarianship and

Publishing]. Moscow, Standartinform Publ., 1996. [in Russian].

2. *Federal'nyi institut promyshlennoi sobstvennosti* [Federal Institute of Industrial Property]: [website]. URL: <https://new.fips.ru>. [in Russian].

3. Turkot V.A., Filippov A.A., Tsfasman G.M. *Ustroistvo dlya opredeleniya dopustimyykh velichiny i dlitel'nosti peregruzki silovogo maslonapolnennogo transformatornogo oborudovaniya* [Device for Determining the Permissible Value and Duration of Overload of Power Oil-Filled Transformer Equipment]. Patent RF, No. 2453859, 2010. [in Russian].

4. Venturinisheim Luish Ameriko, Zhervinu Silveira Zhoze Zheraldu. *Sistema i sposob monitoringa i upravleniya rezhimom raboty silovogo transformatora* [System and Method for Monitoring and Controlling the Operating Mode of a Power Transformer]. Patent RF, No. 2402139, 2010. [in Russian].

5. Dorofeev I.N., Ivanov D.V. *Avtomatizirovannaya sistema monitoringa, zashchity i upravleniya oborudovaniem elektricheskoi podstantsii* [Automated System for Monitoring, Protection and Control of Electrical Substation Equipment]. Patent RF, No. 2468407, 2011. [in Russian].

6. Rassal'skaya S.M., Sakhno A.A., Konograi S.P. *Sistema monitoringa vysokovol'tnogo elektrotekhnicheskogo oborudovaniya* [Monitoring System for High-Voltage Electrical Equipment]. Patent RF, No. 2554574, 2015. [in Russian].

7. Gimadiev R.A., Mukhortov I.S., Ivshin I.V., Bilalov F.F., Valiullin R.R., Shaidukov A.I., Bikchurin R.R. *Sposob diagnostiki silovykh transformatorov* [Method for Diagnostics of Power Transformers]. Patent RF, No. 2638129, 2017. [in Russian].

8. Malafeev S.S. *Sposob kontrolya resursa elektricheskoi izolyatsii transformatora* [Method of Monitoring the Resource of Electrical Insulation of a Transformer]. Patent RF, No. 2649646. 2018. [in Russian].

9. Balashov A.V., Karpikov S.R., Esafov A.V. *Avtomatizirovannoe ustroistvo monitoringa oborudovaniya elektricheskoi podstantsii* [Automated Monitoring Device for Electrical Substation Equipment]. Patent RF, No. 2613130, 2017. [in Russian].

10. Kapel'ko K.V., Podunov D.V., Kiselev G.M. *Ustroistvo diagnostiki silovogo maslyanogo transformatora* [Diagnostic Device for Power Oil Transformer]. Patent RF, No. 2634125, 2017. [in Russian].
11. Shakhnin V.A., Monogarov O.I. *Sposob diagnostiki vysokovol'nogo oborudovaniya* [Method for Diagnostics of High-Voltage Equipment]. Patent RF, No. 2434236, 2011. [in Russian].
12. Mustafin R.G., Gubaev D.F. *Sposob opredeleniya dopustimyykh velichiny i dlitel'nosti peregruzki silovogo maslonapolnennogo transformatornogo oborudovaniya* [Method for Determining the Permissible Value and Duration of Overload of Power Oil-Filled Transformer Equipment]. Patent RF, No. 2515121, 2014. [in Russian].
13. Zaliznyi D.I., Los' D.M. *Ustroistvo dlya zashchity silovogo transformatora ot peregreva obmotki i masla* [Device for Protecting a Power Transformer from Winding and Oil Overheating]. Patent BY, No. 9296, 2007. [in Russian].
14. Zaliznyi D.I., Shirokov O.G., Shirokov G.O. *Ustroistvo zashchity silovogo transformatora ot peregreva* [Power Transformer Protection Device against Overheating]. Patent BY, No. 8204, 2012. [in Russian].
15. Nikonets L.A., Bubryak A.E. *Sposob nerazrushayushchei diagnostiki predavariinogo sostoyaniya elektrooborudovaniya s obmotkami vysokogo napryazheniya* [Method of Non-Destructive Diagnostics of Pre-Emergency State of Electrical Equipment with High Voltage Windings]. Patent RF, No. 2330297, 2008. [in Russian].
16. Babarushkin V.A. *Sposob diagnostiki silovykh trekhobmotochnykh transformatorov* [A Method for Diagnostics of Power Three-Winding Transformers]. Patent RF, No. 2446406, 2012. [in Russian].
17. Kinsht N.V., Petrun'ko N. N. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'nogo transformatornogo oborudovaniya* [Method for Monitoring the Technical Condition of High-Voltage Transformer Equipment]. Patent RF, No. 2511038, 2014. [in Russian].
18. Brusilovskii YuV. *Sistema monitoringa sostoyaniya osnovnogo i vspomogatel'nogo oborudovaniya* [System for Monitoring the Condition of the Main and Auxiliary Equipment]. Patent RF, No. 2592089, 2016. [in Russian].
19. Losev V.L., Sheverdin D.G., Kolkov V.V. *Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya elektroenergeticheskikh ob'ektov* [Method for Monitoring the Technical Condition of Electric Power Facilities]. Patent RF, No. 2611554, 2017. [in Russian].
20. Belov A.V., Il'in YuP. *Ustroistvo dlya diagnostiki mezhvitkovykh замыканий v obmotkakh silovogo transformatora* [Device for Diagnostics of Turn-to-Turn Faults in the Windings of a Power Transformer]. Patent RF, No. 2642521, 2018. [in Russian].
21. Dar'yan L.A., Maskimichenko A.V. *Sposob otsenki sostoyaniya bumazhnoi izolyatsii maslonapolnennykh elektricheskikh apparatov* [Method for Assessing the State of Paper Insulation of Oil-Filled Electrical Devices]. Patent RF, No. 2647224, 2018. [in Russian].
22. Lobanov A.N., Kovalenko K.V. *Sposob kontrolya kachestva transformatornogo masla* [Method of Quality Control of Transformer Oil]. Patent RF, No. 2710101, 2019. [in Russian].
23. Malafeev S.I., Tikhonov Yu.V. *Sposob kontrolya resursa izolyatsii silovogo transformatora* [Method of Monitoring the Power Transformer Insulation Resource]. Patent RF, No. 2559785, 2015. [in Russian].
24. Petrov A.M., Savin N.V. *Sistema nepreryvnogo kontrolya temperatury kontaktov maslyanykh vyklyuchatelei* [The System for Continuous Monitoring of the Temperature of the Contacts of Oil Switches]. Patent RF, No. 2704606, 2019. [in Russian].
25. Gevorkyan V.M., Kazantsev Yu.A. *Sposob diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'nogo transformatora napryazheniya v seti generatornogo napryazheniya elektrostantsii* [Method for Diagnosing the Technical State of a High-Voltage Transformer in the Generator Voltage Network of a Power Plant]. Patent RF, No. 2525165, 2014. [in Russian].
26. Sapunkov M.L., Davydov N.V. *Sposob vyyavleniya vitkovykh замыканий v obmotkakh trekhfaznykh transformatorov* [Method of Detecting Turn Short Circuits in the Windings of Three-Phase Transformers]. Patent RF, No. 2645811, 2018. [in Russian].
27. Litvinov S.N., Gesenkov A.V. e.a. *Sposob opredeleniya tekhnicheskogo sostoy-*

aniya tsifrovogo transformatora po parametram chastichnykh razryadov v izolyatsii [Method for Determining the Technical State of a Digital Transformer by the Parameters of Partial Discharges in Isolation]. Patent RF, No. 2700368, 2019. [in Russian].

28. Biryulin V.I., Kudelina D.V. *Selektivnaya avtomatizirovannaya sistema diagnostiki i kontrolya sostoyaniya izolyatsii silovykh kabel'nykh linii* [Selective Automated System for Diagnostics and Monitoring of the Insulation State of Power Cable Lines]. Patent RF, No. 2700809, 2019. [in Russian].

29. Chichev S.I., Kalinin V.F., Glinkin E.I. *Ustroistvo dlya kontrolya sostoyaniya izolyatsii silovykh transformatorov* [Device for Monitoring the State of Insulation of Power Transformers]. Patent RF, No. 2399925, 2010. [in Russian].

30. Verner T., Turn'e Zh., Rikhter S. *Intellektual'nye elektronnye ustroistva dlya sistemy avtomatizatsii podstantsii i sposob ee razrabotki i upravleniya* [Intelligent Electronic Devices for a Substation Automation System and a Method for its Development and Control]. Patent RF, No. 2504913, 2014. [in Russian].

31. Kostinskii S.S., Mikhailov V.V. *Sposob opredeleniya poter'v transformatore i ustroistvo dlya ego realizatsii* [Method for Determining Losses in a Transformer and a Device for Its Implementation]. Patent RF, No. 2563331, 2015. [in Russian].

32. Bazarov F.A., Gribkov M.A., Panfilov S.A. *Avtomatizirovannaya sistema monitoringa, zashchity i upravleniya oborudovaniem elektricheskoi podstantsii* [Automated System for Monitoring, Protection and Control of Electrical Substation Equipment]. Patent RF, No. 2650894, 2018. [in Russian].

33. Kostromin I.S., Pogibel'skii I.A. e.a. *Sposob obnaruzheniya i klassifikatsii elektricheskogo razryada na elektrooborudovanii* [Method of Detecting and Classifying Electrical Discharge on Electrical Equipment]. Patent RF, No. 2723155, 2020. [in Russian].

34. Gorshkov A.I., Gorodetskii B.N. e.a. *Ustroistvo diagnostiki peregreva kontaknoi detali silovogo elektrooborudovaniya* [Device for Diagnostics of Overheating of a Contact Part of Power Electrical Equipment]. Patent RF, No. 187872, 2019. [in Russian].

35. Gorshkov A.I., Gorodetskii B.N. e.a. *Ustroistvo diagnostiki kontaktov silovogo elek-*

trooborudovaniya [Device for Diagnostics of Contacts of Power Electrical Equipment]. Patent RF, No. 2647995, 2018. [in Russian].

36. Kostyukov A.V., Boichenko S.N. *Sposob diagnostirovaniya elektricheskoi izolyatsii v protsesse distantsionnogo komp'yuternogo monitoringa tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Method for Diagnosing Electrical Insulation in the Process of Remote Computer Monitoring of Technological Equipment]. Patent RF, No. 2709604, 2019. [in Russian].

37. Verbov V.F., Prosyannikov B.N., Sukiyazov A.G. *Sposob kontrolya i diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya sistemy «istochnik pitaniya — nagruzka»* [Method for Monitoring and Diagnosing the Technical State of the «Power Source — Load» System]. Patent RF, No. 2709749, 2019. [in Russian].

38. Bezborodov N.I., Karasyuk K.V. *Ustroistvo dlya monitoringa i diagnostiki vysokovol'tnykh lineinykh polimernykh izolyatorov* [Device for Monitoring and Diagnostics of High-Voltage Linear Polymer Insulators]. Patent RF, No. 2720638, 2020. [in Russian].

39. Makarenko G.K., Aleshechkin A.M. *Sposob distantsionnogo obsledovaniya ob'ektov elektricheskikh setei* [Method for Remote Inspection of Electrical Network Objects]. Patent RF, No. 2495375, 2013. [in Russian].

40. Voloshenko S.E., Tarakhtelyuk A.G. *Ustroistvo dlya diagnostiki i kontrolya elektricheskikh tsepei peremennogo toka* [Device for Diagnostics and Control of Alternating Current Electric Circuits]. Patent RF, No. 2518843, 2014. [in Russian].

41. Urazaliev I.B. e.a. *Sposob diagnostiki i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya kondensatorov svyazi pod rabochim napryazheniem* [Method for Diagnostics and Monitoring of Technical Condition of Coupling Capacitors under Operating Voltage]. Patent RF, No. 2680160, 2019. [in Russian].

42. Mussonov G.P. *Sposob opredeleniya ostatochnogo kommutatsionnogo resursa vysokovol'tnogo vyklyuchatelya* [Method for Determining the Residual Switching Resource of a High-Voltage Switch]. Patent RF, No. 2489726, 2013. [in Russian].

43. Dubrov V.I., Kirievskii E.V. *Sposob diagnostiki elektricheskogo kommutatsionnogo apparata* [Method for Diagnostics of Electrical

Switching Apparatus]. Patent RF, No. 2580183, 2016. [in Russian].

44. Khlebtsov A.P., Zainutdinova L.Kh. Analiz sostoyaniya iznosa elektrooborudovaniya podstantsii i metody diagnostirovaniya avariinykh rezhimov [Analysis of the State of Wear of Electrical Equipment of Substations and Methods for Diagnosing Emergency Modes]. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport — Energy and Resource Saving: Industry and Transport*, 2019, No. 2 (27), pp. 17–20. [in Russian].

45. Shilin A.N., Shilin A.A., Artyushenko N.S., Dement'ev S.S. *Pribory kontrolya i diagnostiki v elektroenergetike: ucheb. posobie* [Instruments for Monitoring and Diagnostics in the Electric Power Industry: Tutorial]. Volgograd, 2017. 132 p. ISBN 978-5-9948-2440-5. [in Russian].

46. Khlebtsov A.P., Zainutdinova L.Kh., Shilin A.N. Datchiki kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya silovykh transformatorov [Sensors for Monitoring the Technical Condition of Power Transformers]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi kon-*

ferentsii «Problemy polucheniya, obrabotki i peredachi izmeritel'noi informatsii» [Materials of the II International Scientific and Technical Conference «Problems of Receiving, Processing and Transmission of Measuring Information»]. Ufa, RIK UGATU, 2019, pp. 38–44. ISBN 978-5-4221-1298-2. [in Russian].

47. Khal'yasmaa A.I. e.a. *Diagnostika elektrooborudovaniya elektricheskikh stantsii i podstantsii: uchebnoe posobie* [Diagnostics of Electrical Equipment of Power Plants and Substations: Tutorial]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta, 2015. 64 p. ISBN 978-5-7996-1493-5. [in Russian].

48. Rusov V.A. *Izmerenie chastichnykh razryadov v izolyatsii vysokovol'nogo oborudovaniya* [Measurement of Partial Discharges in Isolation of High-Voltage Equipment]. Ekaterinburg, UrGUPS, 2011. 367 p. [in Russian].

49. Gavrilenko A.V., Dolin A.P. *Metodika vibratsionnogo obsledovaniya silovykh transformatorov* [Technique of Vibration Inspection of Power Transformers]. 2004. 18 p. [in Russian].



Саттаров Р. Р.
Sattarov R. R.

*доктор технических наук,
профессор кафедры «Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Гарафутдинов Д. Р.
Garafutdinov D. R.

*студент кафедры «Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 62-752.2

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-28-35

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕМПФЕРА

В настоящее время для замедления перемещений узлов и механизмов, гашения колебаний широко используются индукционные вихретоковые демпферы, которые имеют длительный срок службы и высокую надежность. Демпфер — это вихретоковые устройства, которые имеют массивную проводящую вторичную часть. Вторичная часть движется в магнитном поле, которое создается катушками с электрическими токами или постоянными магнитами. В ряде областей находят применение индукционные вихретоковые демпферы, тормоза и муфты. Их основное достоинство — бесконтактная передача крутящего момента, что обеспечивает более длительный срок службы. Демпферы и тормоза могут иметь электромагнитное возбуждение или от постоянных магнитов. Электромагнитное возбуждение позволяет легко контролировать крутящий момент и при необходимости включить или выключить тормоз. Изменение крутящего момента достигается путем изменения тока возбуждения в катушках. Это позволяет контролировать скорость вращения, но при этом требуется энергия для поддержания тока в обмотке возбуждения. Магнитное поле необходимо демпферам для создания вихревых токов, которые, в свою очередь, взаимодействуя с магнитным полем источника, производят изменение угловой скорости вторичного элемента. Из-за отсутствия контакта и трения устройство имеет более высокую надежность. В работе проведено моделирование способа управления электромагнитным моментом в магнитоэлектрическом демпфере. Применение постоянных магнитов для возбуждения позволяет сократить затраты энергии практически до нуля. Однако возникают трудности с регулированием электромагнитного момента. В работе исследовано изменение электромагнитного поля и момента при реконфигурации магнитной цепи за счет механических перемещений ее элементов. Приведено общее описание управляемых магнитоэлектрических демпферов. Проведено моделирование поля и получено распределение поля вдоль воздушного зазора. Показано, что диапазон регулирования электромагнитного момента при исследуемом способе — от 5 % до 100 %.

Ключевые слова: индукционный демпфер, постоянный магнит, магнитное поле, регулирование электромагнитного момента, метод конечных элементов, ELCUT.

STUDY OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF A CONTROLLED MAGNETOELECTRIC DAMPER

Currently, induction eddy current dampers, which have a long service life and high reliability, are widely used to slow down the movement of components and mechanisms, and dampen vibrations. A damper is an eddy current device that has a massive conductive secondary part. The

secondary part moves in a magnetic field that is created by coils with electric currents or permanent magnets. Induction eddy current dampers, brakes, and clutches are used in a number of areas. Their main advantage is the contactless transmission of torque, which provides a longer service life and high reliability. Dampers and brakes can be electrically excited or from permanent magnets. Electromagnetic excitation makes it easy to control the torque and turn the brake on or off if necessary. The change in torque is achieved by changing the excitation current in the coils. This allows you to control the speed of rotation, but it requires energy to maintain the current in the field winding. The magnetic field is necessary for dampers to create eddy currents, which in turn, interacting with the magnetic field of the source, changes the angular velocity of the secondary element. Due to the lack of contact and friction, the device has a long service life and high reliability. In this paper, the method of controlling the electromagnetic moment in a magnetoelectric damper is modeled. The use of permanent magnets for excitation allows you to reduce energy costs to almost zero. However, it is difficult to control the electromagnetic moment. In this paper, the change in the electromagnetic field and moment during reconfiguration of a magnetic circuit due to mechanical movements of its elements is studied. A General description of controlled magnetoelectric dampers is given. The field is modeled and the field distribution along the air gap is obtained. It is shown that the range of control of the electromagnetic moment in the studied method is from 5 % to 100 %.

Key words: eddy current damper, permanent magnet, magnetic field, electromagnetic torque control, finite element method, ELCUT.

Введение

В ряде областей находят применение индукционные вихретоковые демпферы, тормоза и муфты [1–4]. Использование постоянных магнитов (ПМ) повышает эффективность демпферов, так как в этом случае система возбуждения не потребляет энергию для возбуждения магнитного потока [4–6, 7]. Главным недостатком демпферов с ПМ являются сложности регулирования тормозного крутящего момента в рабочем режиме [7–9]. Одной из возможностей регулирования крутящего момента в демпферах с ПМ является использование механических перемещений элементов для реконфигурации магнитной цепи [6, 10]. Например, тормозной момент может регулироваться путем изменения воздушного зазора за счет скольжения вторичного проводящего элемента, что приводит к изменению индукции магнитного поля [1, 11].

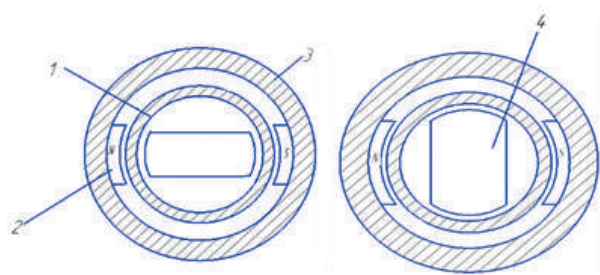
При проектировании и разработке магнитных систем с постоянными магнитами необходимо выбрать геометрию магнитной системы (постоянного магнита, магнитопровода, сердечника, ярма, воздушного зазора и т.д.) и определить ее размеры, которые обеспечивают необходимые распределение и величины магнитного поля возбуждения. Расчет поля постоянного магнита наиболее точно ведется по уравнениям электромагнитного поля [7–9, 12, 13]. В настоящее время

наиболее точно и быстро задачу расчета магнитного поля можно решать методом конечных элементов (МКЭ) [14–17]. МКЭ реализуется рядом программных комплексов, например ELCUT [15]. Данный программный комплекс позволяет рассчитывать двумерные статические и квазистационарные магнитные поля, получать распределение магнитного потока и определять интегральные характеристики поля, что достаточно для анализа магнитоэлектрических демпферов, выбора геометрических размеров преобразователя [19].

Постановка задачи исследования

В качестве объекта исследования целесообразно исследовать двухполупериодную модель управляемого демпфера [6]. Регулирование тормозного электромагнитного момента производится за счет изменения положения продольной оси внутреннего сердечника [10]. Зубчатые магнитные структуры используются в различных электромеханических преобразователях [19, 20].

Для определения влияния углового положения внутреннего сердечника необходимо рассчитать распределение магнитного потока в рабочем воздушном зазоре. В расчетной модели можно выделить следующие области: ферромагнитный явнополюсный внутренний сердечник; постоянные магниты, намагниченные радиально; ферромагнитный



- а) б)
- 1 — полый немагнитный цилиндрический ротор;
2 — постоянные магниты;
3 — индуктор; 4 — явнополюсный сердечник
- а) положения внутреннего явнополюсного сердечника, соответствующие максимальному тормозному моменту;
б) положения внутреннего явнополюсного сердечника, соответствующие минимальному тормозному моменту

Рисунок 1. Управляемый демпфер внешний магнитопровод и полый немагнитный проводящий ротор (рисунок 1). Применение структуры Холбаха (Hallbach) для индуктора с ПМ позволяет обойтись без внешнего магнитопровода [1, 2, 4].

Моделирование поля методом конечных элементов

Наиболее быстрый и точный способ исследования магнитных полей в электромеханических преобразователях — использование программных комплексов на основе МКЭ [2, 14, 16]. Программный комплекс ELCUT позволяет рассчитывать двухмерные электромагнитные поля для электромеханических преобразователей [15, 17]. Для компьютерного моделирования магнитной системы

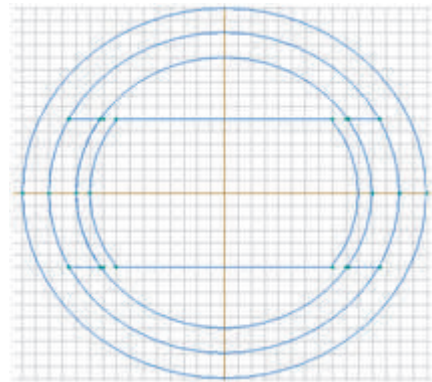


Рисунок 2. Положение внутреннего явнополюсного сердечника, соответствующего максимальному тормозному моменту

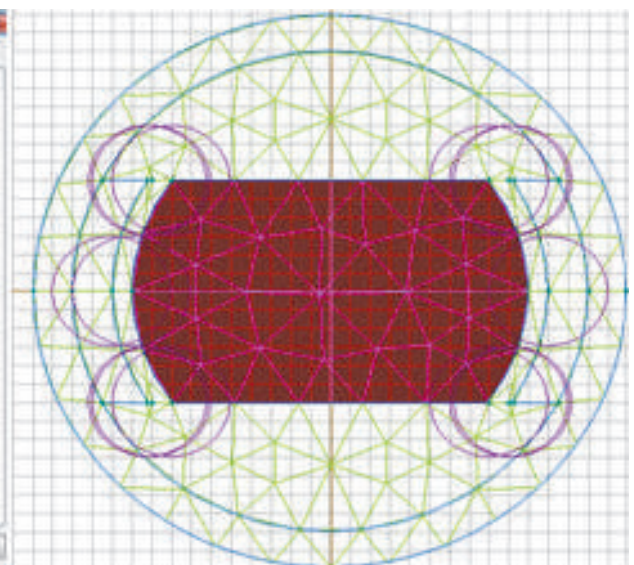
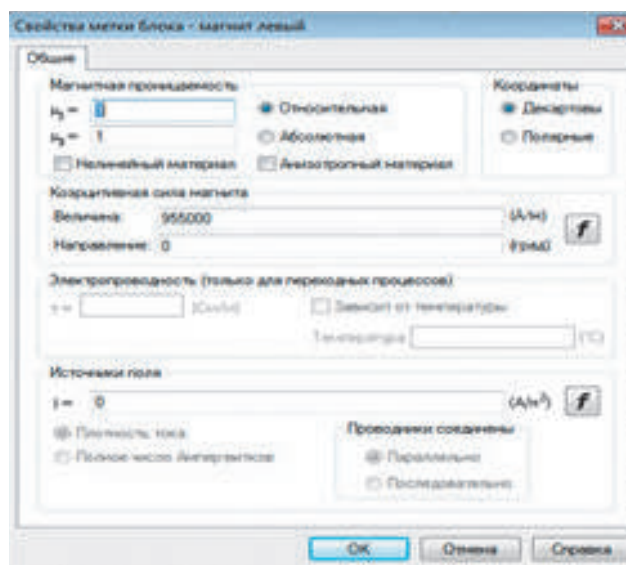
демпфера методом конечных элементов необходимо выполнить следующие шаги:

1. Создание геометрической модели (рисунок 2);
2. Определение параметров областей и граничных условий (рисунок 3, а);
3. Построение сетки конечных элементов (рисунок 3, б);
4. Расчет и определение распределения магнитного поля;
5. Анализ распределения магнитного поля.

При построении сетки использованы стандартные алгоритмы с заданием уменьшения шага сетки в области под полюсами, где плотность магнитных линий возрастает.

Результаты моделирования и их анализ

На рисунке 4 изображено распределение магнитного потока в конструктивных



- а) б)
- а) задание параметров б) построение сетки конечных элементов

Рисунок 3. Этапы моделирования

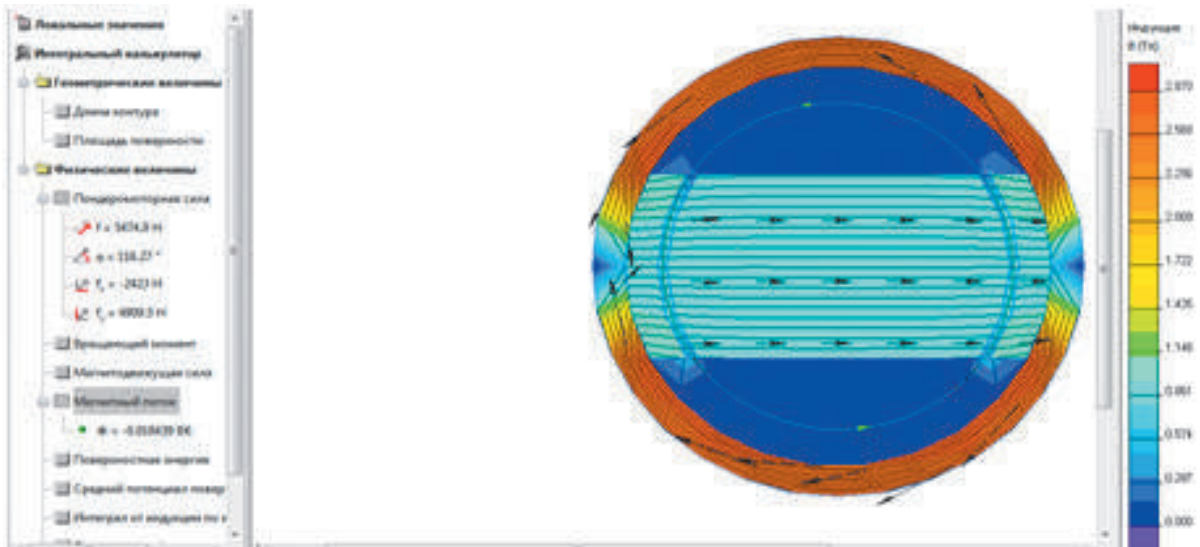


Рисунок 4. Распределение магнитного поля

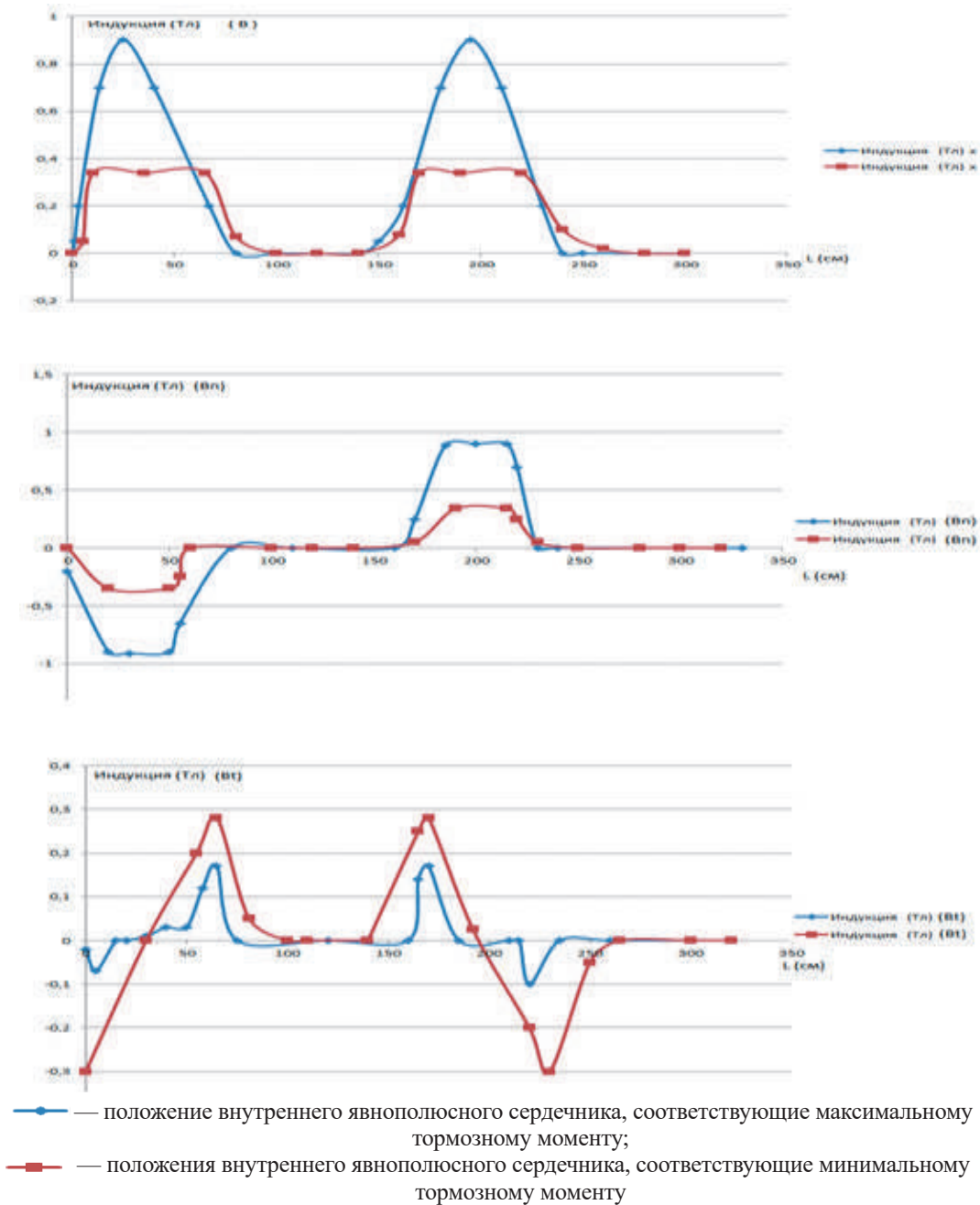


Рисунок 5. Распределение магнитной индукции вдоль воздушного зазора

элементах демпфера, максимальная индукция в воздушном зазоре между ПМ и явнополюсным сердечником составляет 0,9 Тл (см. также рисунок 5). Распределение индукции носит периодический характер, по мере удаления сердечника от продольной оси (оси намагничивания момента), индукция падает до нуля, а потом меняет свое направление.

Аналогично может быть определено поле для случая поперечного расположения внутреннего сердечника (рисунки 6 и 7).

На рисунке 7 изображено распределение магнитного потока в конструктивных элементах демпфера, в этом случае максимальная индукция в воздушном зазоре между ПМ и явнополюсным сердечником составляет 0,33 Тл.

Таким образом, при повороте внутреннего явнополюсного сердечника максимальное значение индукции магнитного поля изменяется от 0,9 до 0,33 Тл (рисунок 5). Так как

максимальное значение электромагнитного момента пропорционально квадрату максимальной индукции, то за счет изменения положения сердечника возможна регулировка максимального момента от его макси-

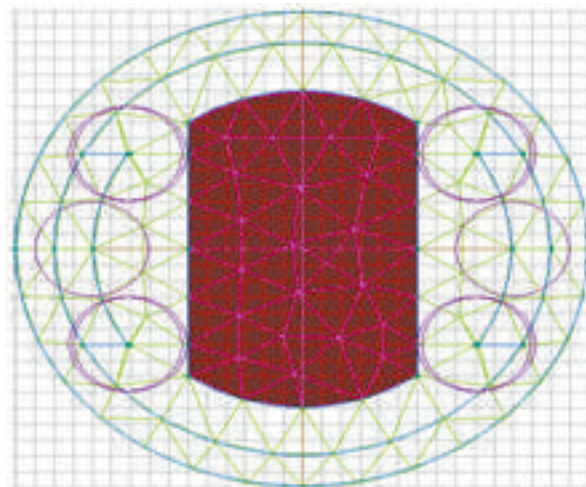


Рисунок 6. Положение внутреннего явнополюсного сердечника, соответствующее минимальному тормозному моменту

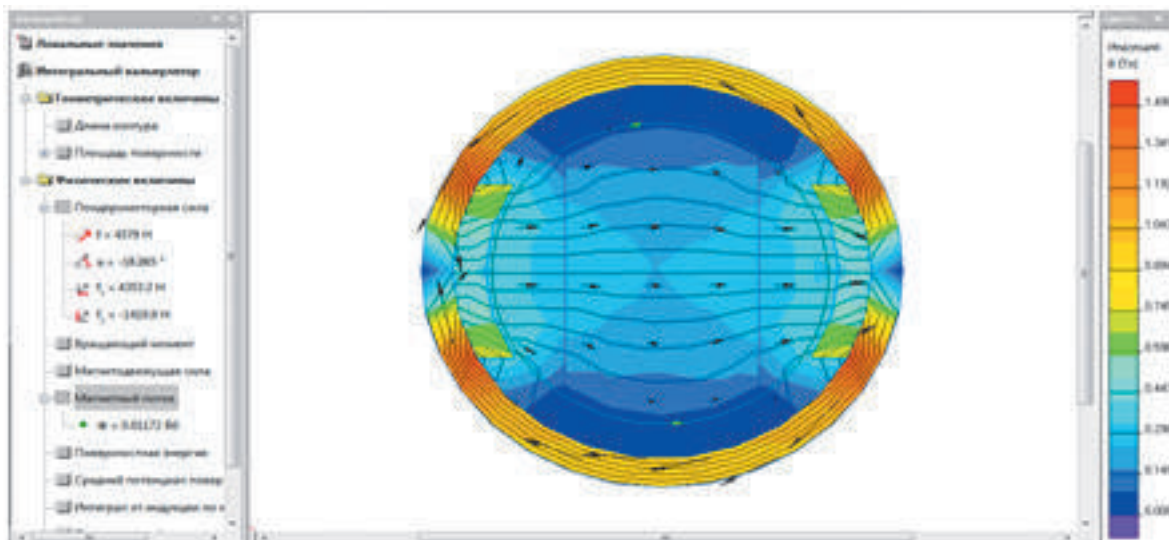


Рисунок 7. Распределение магнитного потока при положении внутреннего явнополюсного сердечника, соответствующем минимальному тормозному моменту

мального значения (100 %) до минимального (13 %). Для увеличения (или уменьшения) диапазона регулирования возможно оптимизировать геометрию и размеры внутреннего сердечника. В общем случае можно считать, что использование такого способа регулирования позволяет добиться диапазона регулирования электромагнитного момента от 5 % до 100 %.

Выводы

В данной работе обоснована возможность регулирования электромагнитного момента

в индукционных тормозах, демпферах и муфтах. Таким образом, магнитоэлектрические индукционные устройства могут использоваться в автономных системах, где использование электромагнитного возбуждения не рационально из-за расхода энергии на возбуждение этих устройств. Другое применение магнитоэлектрических тормозов с регулируемым моментом может быть найдено в системах, где требуется автоматически регулировать момент в соответствии с изменением скорости или нагрузки.

Список литературы

1. Ebrahimi B., Khamesee M.B., Golnaraghi F. Permanent Magnet Configuration in Design of an Eddy Current Damper // *Microsystem Technologies*. 2010. Vol. 16, No. 1–2. P. 19–24.
2. He R., Liu X., Liu C. Brake Performance Analysis of ABS for Eddy Current and Electrohydraulic Hybrid Brake System // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. Vol. 2013.
3. Саттаров Р.Р., Еременко В.В. Замедление объектов с помощью управляемого электромагнитного демпфера // *Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. ст. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*, 2019. С. 114–120.
4. Sodano N., Bae J.S., Inman D.J., Belvin W.K. Improved Concept and Model of Current Damper // *Journal of Vibration and Acoustic*. ASME. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 294–302.
5. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Sattarov R.R. The Controllable Eddy Current Brakes with Permanent Magnets: Basic Concept // *2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 — Conference Proceedings. IEEE*, 2018. P. 1–5.
7. Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р. Переходные процессы в электромагнитных демпферах с распределенной вторичной системой сложной геометрии // *Электричество*. 2014. № 3. С. 43–48.
8. Tonoli A. Dynamic Characteristics of Eddy Current Dampers and Couplers // *Journal of Sound and Vibration*. 2007. Vol. 301. No. 3-5. P. 576-591.
9. Shin H.-J., Choi J.-Y., Cho H.-W., Jang S.-M. Analytical Torque Calculations and Experimental Testing of Permanent Magnet Axial Eddy Current Brake // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013. Vol. 49, No. 7. P. 4152–4155.
10. Пат. 2365022 РФ. Управляемый магнитоэлектрический тормоз / Р.Р. Саттаров, И.А. Огуречникова, М.Б. Гумерова; Заявлено 03.03.2008; Оpubл. 20.08.2009. Бюл. № 19. 2–4 с.
11. Choi J.-Y., Shin H.-J., Park Y.-S., Jang S.-M. Torque Analysis of Axial Flux PM Type Eddy Current Brake Based on Analytical Field Computations // *Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference*. 2011. P. 1–5.
12. Jin Y., Kou B., Li L., Li C., Pan D., Song K. Analytical Model for a Permanent Magnet Eddy-Current Brake with Transverse Edge Effect // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 1–1.
13. Li Z. e.a. Analytical Modeling and Analysis of Magnetic Field and Torque for Novel Axial Flux Eddy Current Couplers with PM Excitation // *AIP Advances*. 2017. Vol. 7. No. 10. P. 105303.
14. Татевосян А.А., Мищенко В.С. Моделирование магнитного поля синхронного генератора с постоянными магнитами // *Омский научный вестник*. 2016. № 4 (148).
15. Потапов Л.А., Максимцев Е.И. Полевой подход к расчету электромеханических устройств с немагнитными роторами // *Электротехника*. 2000. № 8. С. 8–10.
16. Андреева Е.Г., Семина И.А., Татевосян А.А. Исследование поля магнитной системы открытого типа с помощью программного пакета ANSYS // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2014. № 1.
17. Андреева Е.Г., Плеханова В.С. Исследование магнитного поля, его силовых характеристик, свойств материалов электротехнических устройств с незамкнутой магнитной системой // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160).
18. Sattarov R.R. 2D Model of Axial-Flux Eddy Current Brakes with Slotted Conductive Disk Rotor // *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Astana, Kazakhstan: IEEE, 2017. С. 1–6.
19. Нейман Л.А., Рогова О.В., Нейман В.Ю. Новые типы магнитных систем электромагнитных двигателей с зубчатыми элементами магнитопровода // *Актуальные проблемы энергетики АПК: матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. / Под ред. А.В. Павлова*. 2013. С. 227–229.
20. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Blenkinsop P.T., Corda J., Fulton N.N. Variable-Speed Switched Reluctance Motors // *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. 1980. Vol. 127, No. 4. P. 253–265.

References

1. Ebrahimi B., Khamesee M.B., Golnaraghi F. Permanent Magnet Configuration in Design of an Eddy Current Damper. *Microsystem Technologies*, 2010, Vol. 16, No. 1–2, pp. 19–24.
2. He R., Liu X., Liu C. Brake Performance Analysis of ABS for Eddy Current and Electrohydraulic Hybrid Brake System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, Vol. 2013.
3. Sattarov R.R., Eremenko V.V. Zamedlenie ob'ektov s pomoshch'yu upravlyаемого elektromagnitnogo dempfera [Deceleration of Objects Using a Controlled Electromagnetic Damper]. *Sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei «Aktual'nye problemy elektroenergetiki»* [Collection of Scientific and Technical Articles «Actual Problems of Electric Power Industry»]. Nizhnii Novgorod, Izd-vo Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva, 2019, pp. 114–120. [in Russian].
4. Sodano H., Bae J.S., Inman D.J., Belvin W.K. Improved Concept and Model of Current Damper. *Journal of Vibration and Acoustic ASME*, 2006, Vol. 128, No. 3, pp. 294–302.
5. Balagurov V.A., Galteev F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Electric Generators with Permanent Magnets] Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. [in Russian].
6. Sattarov R.R. The Controllable Eddy Current Brakes with Permanent Magnets: Basic Concept. *10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 — Conference Proceedings. IEEE*, 2018, pp. 1–5.
7. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Perekhodnye protsessy v elektromagnitnykh dempferakh s raspredelennoi vtorichnoi sistemoi slozhnoi geometrii [Transients in Electromagnetic Dampers with a Distributed Secondary System of Complex Geometry]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2014, No. 3, pp. 43–48. [in Russian].
8. Tonoli A. Dynamic Characteristics of Eddy Current Dampers and Couplers. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, Vol. 301, No. 3–5, pp. 576–591.
9. Shin H.-J., Choi J.-Y., Cho H.-W., Jang S.-M. Analytical Torque Calculations and Experimental Testing of Permanent Magnet Axial Eddy Current Brake. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, Vol. 49, No. 7, pp. 4152–4155.
10. Sattarov R.R., Ogurechnikova I.A., Gumerova M.B. *Upravlyaemyi magnitoelektricheskii tormoz* [Controlled Magnetolectric Brake]. Patent RF, No. 2365022. 2009. [in Russian].
11. Choi J.-Y., Shin H.-J., Park Y.-S., Jang S.-M. Torque Analysis of Axial Flux PM Type Eddy Current Brake Based on Analytical Field Computations. *Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference*, 2011, pp. 1–5.
12. Jin Y., Kou B., Li L., Li C., Pan D., Song K. Analytical Model for a Permanent Magnet Eddy-Current Brake with Transverse Edge Effect. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 1–1.
13. Li Z. e.a. Analytical Modeling and Analysis of Magnetic Field and Torque for Novel Axial Flux Eddy Current Couplers with PM Excitation. *AIP Advances*, 2017, Vol. 7, No. 10, pp. 105303.
14. Tatevosyan A.A., Mishchenko V.S. Modelirovanie magnitnogo polya sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami [Modeling of the Magnetic Field of a Synchronous Generator with Permanent Magnets]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2016, No. 4 (148). [in Russian].
15. Potapov L.A., Maksimtsev E.I. Polevoi podkhod k raschetu elektromekhanicheskikh ustroystv s nemagnitnymi rotorami [Field Approach to the Calculation of Electromechanical Devices with Non-Magnetic Rotors]. *Elektrotehnika — Electrotechnics*, 2000, No. 8, pp. 8–10. [in Russian].
16. Andreeva E.G., Semina I.A., Tatevosyan A.A. Issledovanie polya magnitnoi sistemy otkrytogo tipa s pomoshch'yu programmnoho paketa ANSYS [Investigation of the Field of an Open-Type Magnetic System using the ANSYS Software Package]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin — Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2014, No. 1. [in Russian].
17. Andreeva E.G., Plekhanova V.S. Issledovanie magnitnogo polya, ego silovykh kharakteristik, svoystv materialov elektrotekhnicheskikh ustroystv s nezamknutoi magnitnoi sistemoi [Investigation of the Magnetic Field, Its

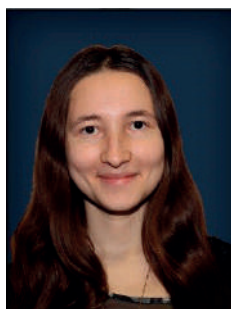
Power Characteristics, and Material Properties of Electrical Devices with an Open Magnetic System]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2018, No. 4 (160). [in Russian].

18. Sattarov R.R. 2D Model of Axial-Flux Eddy Current Brakes with Slotted Conductive Disk Rotor. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Astana, Kazakhstan, 2017, pp. 1–6.

19. Neiman L.A., Rogova O.V., Neiman V.Yu. Novye tipy magnitnykh sistem elektromagnitnykh dvigatelei s zubchatymi elementami magnitoprovoda [New Types of Magnetic Systems

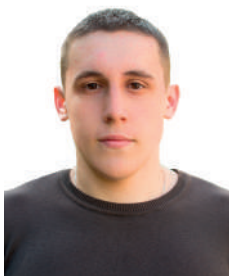
of Electromagnetic Motors with Gear Elements of a Magnetic Circuit]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy energetiki APK»* [Materials of the IV International Scientific and Practical Conference «Current Problems of Agricultural Energy Complex»]. 2013, pp. 227–229. [in Russian].

20. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Blenkinsop P.T., Corda J., Fulton N.N. Variable-Speed Switched Reluctance Motors. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, 1980, Vol. 127, No. 4, pp. 253–265.



Хазиева Р. Т.
Hazieva R. T.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Васильев П. И.
Vasiliev P. I.

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Курцов Д. В.
Kursov D. V.

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-36-42

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДВУХСЕКЦИОННОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА

Авторы данной статьи предлагают улучшить экономические показатели параметрических стабилизаторов тока и увеличить их эффективность за счет использования многофункционального интегрированного компонента (МИЭК). Для этого в качестве индуктивно-емкостного преобразователя используется МИЭК, настроенный в резонанс, от которого и будет происходить питание электрической цепи.

В зависимости от необходимой точности стабилизации тока нагрузки подбираются нужные параметры компонента. Для правильного подбора необходимо рассчитать электромагнитные процессы, которые происходят в стабилизаторе при протекании тока.

В ходе работы была разработана математическая модель параметрического стабилизатора тока, выполненного на основе двухсекционного МИЭК. Данная модель позволяет подобрать параметры стабилизации тока для выбора оптимального соединения секций компонентов. В результате расчетов было выяснено, что, для того чтобы добиться регулировки параметров тока, стабилизированного при питании компонента от инвертора на нагрузке, необходимо изменять амплитуду напряжения МИЭК. В резонансном режиме МИЭК ток на нагрузке зависит от напряжения прямо пропорционально, что способствует получению линейно возрастающей вольт-амперной характеристики. Эта способность МИЭК широко используется в устройствах заряда емкостного накопителя, так как при зарядке накопителей необходимо поддержание линейно возрастающей характеристики тока для улучшения экономических показателей. Немаловажным положительным качеством МИЭК являются его массогабаритные показатели, которые выигрывают у традиционных дискретных индуктивно-емкостных преобразователей.

В статье рассматривается двухсекционный многофункциональный интегрированный компонент, секции которого соединены последовательно. Источник питания присоединяется к обкладкам первой секции, а нагрузка к концам второй секции. Двухсекционный МИЭК позволяет приблизить значение передаточной функции к единице в индуктивно-емкостных преобразователях.

Ключевые слова: стабилизатор тока, вольт-амперные характеристики, индуктивно-емкостные преобразователи, источники тока, математическая модель.

RESEARCH OF THE TWO-SECTION MULTIFUNCTIONAL INTEGRATED ELECTROMAGNETIC COMPONENT STABILIZATION PROPERTIES

The authors of this article propose improving the economic performance of parametric current stabilizers and increasing their efficiency by using a multifunctional integrated component (MIC). For this purpose, an inductive-capacitive converter uses MIC tuned to resonance, from which the electrical circuit will be powered.

Depending on the required accuracy of load current stabilization, the necessary component parameters are selected. For correct selection, it is necessary to calculate the electromagnetic processes that occur in the stabilizer during current flow.

In the course of the work, a mathematical model of a parametric current stabilizer based on a two-section MIC was developed. This model allows you to select current stabilization parameters for choosing the optimal connection of component sections. As a result of calculations, it was found out that in order to achieve adjustment of the current parameters stabilized when the component is powered from the inverter at the load, it is necessary to change the voltage amplitude of the MIC. In the resonant mode of MIC, the load current depends on the voltage in direct proportion, which contributes to a linearly increasing current-voltage characteristic. This ability of the MIC is widely used in devices for charging a capacitive storage device, since when charging storage devices, it is necessary to maintain a linearly increasing current characteristic to improve economic performance. An important positive feature of MIC is its weight and size indicators, which are superior to traditional discrete reactance-capacity converter.

The article deals with a two-section multifunctional integrated component, the sections of which are connected in series. The power supply is connected to the plates of the first section, and the load is connected to the ends of the second section. Two-section MIC allows you to approximate the value of the transfer function to one in inductive-capacitive converters.

Key word: current stabilizer, current-voltage characteristics, inductive-capacitive converters, current sources, mathematical model.

Основным функциональным блоком устройств заряда емкостного накопителя являются индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП), которые используются в системах стабилизации тока (ССТ). Кроме того, ИЕП используются в различных электротехнических системах, а также устройствах, которые требуют постоянного уровня подводимой мощности при изменяющемся сопротивлении [1–8].

Авторы данной статьи предлагают замену дискретного ИЕП на преобразователь, выполненный на основе гибридного электромагнитного элемента (ЭМЭ). Такая замена позволит добиться заметного повышения КПД и улучшения массогабаритных показателей ССТ [9–12].

За счет выбора параметров ИЕП производится настройка необходимой точности стабилизации тока нагрузки. Была поставлена задача по определению диапазона изме-

нения нагрузки для получения максимальных значений КПД, а также нахождения зависимости коэффициента стабилизации тока нагрузки от частоты [13, 14]. Для решения поставленной задачи необходимо произвести расчет электромагнитных процессов, происходящих в ИЕП. Главными задачами данной работы являются: изучение структуры работы ЭМЭ, определение диапазона изменения нагрузки, при котором достигается стабилизация тока требуемой точности, оценка и анализ частотных характеристик, полученных при построении систем стабилизации тока на основе ИЕП, а также коэффициента стабилизации.

Двухсекционный МИЭК из-за особенностей конструкции предполагает несколько вариантов соединения секций. В следствие этого появляются различные способы его схематичного изображения [15–18]. Секция МИЭК состоит из двух скрученных в спи-

раль проводящих обкладок и изолированных друг от друга диэлектриком. В начале и конце каждой обкладки находятся выводы.

Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций, а также диагональным подключением источника питания и нагрузки подходит для использования источников напряжения генерирующим высшие гармоники. Последовательное соединение обкладок и диагональное подключение источника питания позволяет достичь согласного протекания тока в обкладках секций [12].

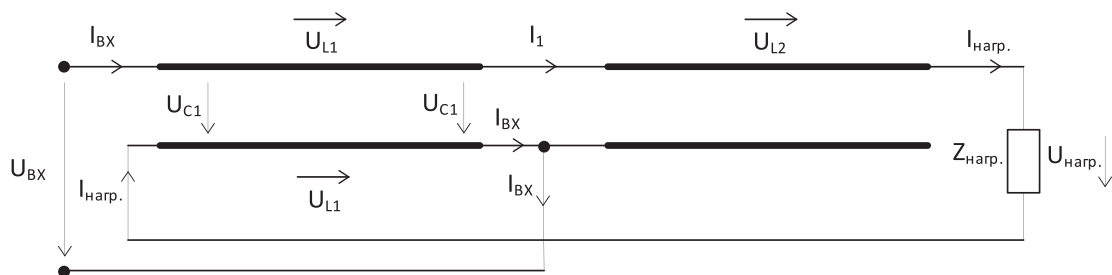


Рисунок 1. Двухсекционный МИЭК

Математическая модель МИЭК и формулы тока нагрузки

$$\underline{U}_{\text{вх.}} = \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{C1}, \quad (1)$$

$$\underline{U}_{C1} = j \cdot X_{C11} \cdot (I_1 - I_{\text{вх}}), \quad (2)$$

$$\underline{U}_{C2} = j \cdot X_{C22} \cdot (I_{\text{нагр.}} - I_1), \quad (3)$$

$$\underline{U}_{L1} = (R_1 + j \cdot X_{L1} + j \cdot X_{M12}) \cdot (I_{\text{вх}} + I_{\text{нагр.}}), \quad (4)$$

$$\underline{U}_{C1} = \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{\text{нагр.}}, \quad (5)$$

$$I_1 = I_{\text{нагр.}}, \quad (6)$$

$$I_{\text{нагр.}} = -0,5 \cdot j \cdot X_{C22} \cdot \underline{U}_{\text{вх}}, \quad (7)$$

$$I_{\text{нагр.}} = \frac{0,5 \cdot \underline{U}_{\text{вх.}}}{R_1 + R_2 + j \cdot X_{L1} + j \cdot X_{L2} + j \cdot X_{M12} + j \cdot X_{M21}}. \quad (8)$$

Далее приведен расчет параметров стабилизации МИЭК при заданных значениях емкости, индуктивности и напряжения питания в функции относительной частоты $\alpha = \omega/\omega_0$. В качестве значения добротности воспользуемся статьей [19], где найдено ее более рациональное значение $Q = 10$.

На рисунке 2 изображена зависимость коэффициента усиления по напряжению от изменения частоты в относительных единицах.

Судя по графику, можно заключить, что исследуемая схема дает максимальное значение коэффициента усиления по напряжению, равное 14, при добротности 10.

Разработанная математическая модель параметрического стабилизатора позволяет определить с необходимой точностью зависимость коэффициента стабилизации тока от частоты и ширины нагрузочного диапазона стабилизации. Данная модель описывает происходящие в МИЭК процессы при помощи систем интегральных параметров, таких как общая емкость C , токи выводов обкладок $I_{\text{вх}}$, $I_{\text{н}}$ и полная индуктивность L . На рисунке 1 изображена схема замещения МИЭК.

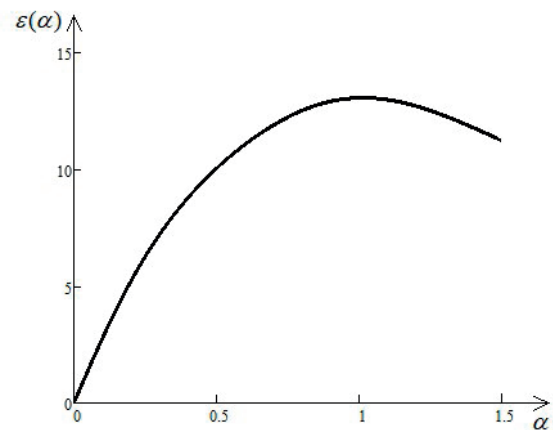


Рисунок 2. Зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты в относительных единицах (ε)

На рисунке 3 показана зависимость входного сопротивления двухсекционного МИЭК от изменения частоты в относительных единицах.

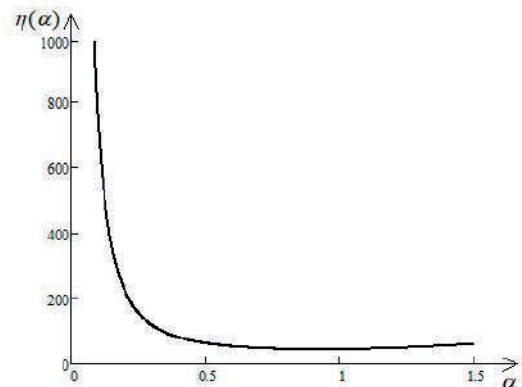


Рисунок 3. Зависимость входного сопротивления от частоты в относительных единицах (η)

По данной зависимости можно заключить, что выходное сопротивление начинает уменьшаться при увеличении частоты.

На рисунке 4 показана зависимость передаточного сопротивления исследуемой структуры МИЭК от изменения частоты в относительных единицах.

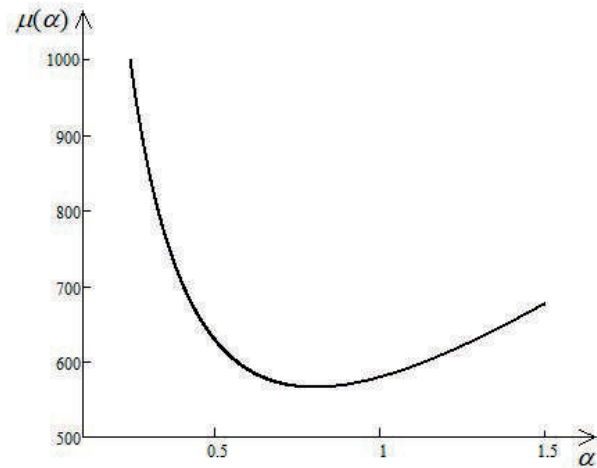


Рисунок 4. Зависимость передаточного сопротивления от частоты в относительных единицах (μ)

На графике, изображенном на рисунке 4, видно, что увеличение частоты влечет за собой уменьшение передаточного сопротивления.

Из графика на рисунке 5 видно, что передаточная проводимость с ростом частоты уменьшается.

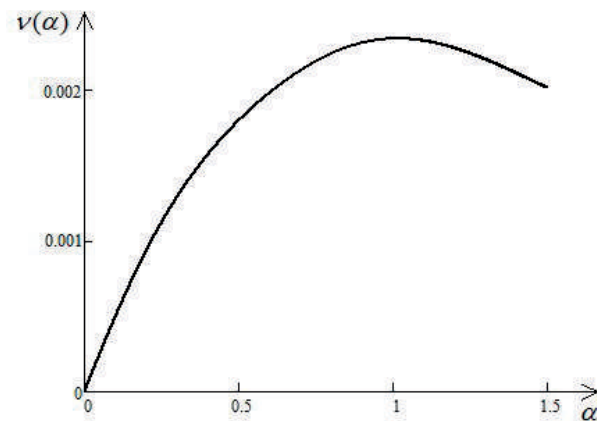


Рисунок 5. Зависимость передаточной проводимости от частоты в относительных единицах (ν)

МИЭК имеет хорошие фильтрующие свойства по току нагрузки преобразователя. В данном исполнении схемы МИЭК переходная проводимость при частоте, равной нулю, $\omega = 0$. Поэтому можно заключить, что это

схематическое исполнение двухсекционного МИЭК является наиболее пригодным при питании от источника напряжения с высшими гармониками.

На рисунке 6 показана зависимость изменения коэффициента стабилизации от частоты в относительных единицах.

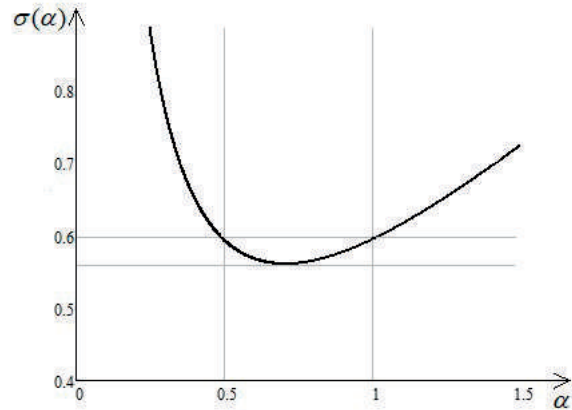


Рисунок 6. Зависимость изменения коэффициента стабилизации от частоты в относительных единицах (σ)

По графику видно, что с увеличением частоты коэффициент стабилизации убывает. В диапазоне изменения частоты от 0,5 до 1 коэффициент стабилизации изменяется от 0,57 до 0,60, это говорит о том, что требуется улучшение стабилизации по току.

Выводы

По результатам исследования стабилизационных свойств двухсекционного МИЭК можно сделать следующие выводы.

1. Двухсекционный МИЭК из-за особенностей конструкции предполагает несколько вариантов соединения секций, что, несомненно, является его преимуществом.

2. В ходе работы была разработана математическая модель параметрического стабилизатора тока, выполненного на основе двухсекционного многофункционального интегрированного компонента. Данная модель позволяет подобрать параметры стабилизации тока для выбора оптимального соединения секций компонентов. В результате расчетов было выяснено, что, для того чтобы добиться регулировки параметров тока, стабилизированного при питании компонента от инвертора на нагрузке, необходимо изменять амплитуду напряжения МИЭК.

3. МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключе-

нием источника питания и нагрузки является наиболее оптимальным для индуктивно-емкостных преобразователей и устройств

Список литературы

1. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Хлюпин П.А., Кондратьев Э.Ю. Анализ динамики патентования методов и устройств регулирования реологических свойств высоковязкой нефти на основе энергосберегающих индукционных технологий // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. № 5. С. 179–189. URL: http://www.ogbus.ru/authors/KonesevSG/KonesevSG_1.pdf.
2. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Кондратьев Э.Ю., Садилов М.Р., Хлюпин П.А. Индукционные нагревательные системы для протяженных нефтепроводов // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12. № 4. С. 40–47.
3. Пат. 164415 РФ. Труба для транспортировки вязких текучих сред / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, Э.Ю. Кондратьев. Оpubл. 27.08.2016. БИ № 24.
4. Пат. 117748 РФ. Устройство заряда емкостного накопителя / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, А.В. Мухаметшин, М.Р. Садилов. Оpubл. 27.06.2012. БИ № 18.
5. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Хлюпин П.А. Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя на основе индуктивно-емкостного преобразователя // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 4. С. 374–390. URL: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf.
6. Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Колесникова О.И. Modeling of Capacitive Storage Charge Device Based on Multifunction Integrated Electromagnetic Component // Нефть и газ — 2015: сб. тр. 69-й Междунар. молодежн. науч. конф. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. С. 388–393.
7. Musavi F., Eberle W., Dunford W.G. A Phase Shifted Semi-Bridgeless Boost Power Factor Corrected Converter for Plug in Hybrid Electric Vehicle Battery Chargers // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APPEC), 2011. Twenty-Sixth Annual IEEE, March 2011, pp. 821–828.
8. Kit Sum. K. Improved Valley-Fill Passive Power Factor Correction Current Shaper заряда накопительных конденсаторов. МИЭК позволяет добиться хороших массогабаритных характеристик.
9. Approaches IEC Specification Limits // PCIM Magazine, Feb. 1998.
9. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи. применение в электротехнике и обзор схемотехнических решений // Ресурсо-, энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: сб. тр. 3-й Всеросс. науч.-практ. конф. Волжский: филиал МЭИ, 2010. С. 120–125.
10. Хазиева Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи на основе многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Тинчуринские чтения: сб. 6-й Междунар. науч. молодежн. конф. с междунар. участием. Казань: ГОУ ВПО КГЭУ, 27–29 апреля 2011. С. 107–108.
11. Пат. 2450413 РФ. Индуктивно-емкостный преобразователь / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, И.С. Конесев, Р.А. Нурлыгаянов. Оpubл. 10.05.2012. БИ № 13.
12. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Функциональная интеграция как техническое средство развития электромагнитных элементов // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. С. 135–138.
13. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка, 1974. 216 с.
14. Милях А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В. Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока. Киев: Наукова думка, 1964. 299 с.
15. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 65–75.
16. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методы оценки параметров надежности сложных компонентов и систем // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки

и образования». 2015. № 1. URL: <http://www.science-education.ru/121-17558>.

17. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методика оценки надежности сложных электромагнитных элементов // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 1. URL: www.science-education.ru/121-17925.

18. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Оценка показателей надежности многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 1. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18445>.

19. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Исследование частотных характеристик двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 66–71. <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/vestnik/article/view/1152>.

References

1. Konesev S.G., Khazieva R.T., Khlyupin P.A., Kondrat'ev E.Yu. Analiz dinamiki patentovaniya metodov i ustroystv regulirovaniya reologicheskikh svoystv vysokovyazkoi nefti na osnove energosberegayushchikh induktsionnykh tekhnologii [Analysis of the Dynamics of Patenting Methods and Devices for Controlling the Rheological Properties of High-Viscosity Oil Based on Energy-Saving Induction Technologies]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2013, No. 5, pp. 179–189. URL: http://www.ogbus.ru/authors/KonesevSG/KonesevSG_1.pdf. [in Russian].

2. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Kondrat'ev E.Yu., Sadikov M.R., Khlyupin P.A. Induktsionnye nagrevatel'nye sistemy dlya protyazhennykh nefteprovodov [Induction Heating Systems for Long Oil Pipelines]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2014, Vol. 12, No. 4, pp. 40–47. [in Russian].

3. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Kondrat'ev E.Yu. Truba dlya transportirovki vyazkikh tekuchikh sred [Pipe for Conveying Viscous Fluids]. Patent RF, No. 164415. 2016. [in Russian].

4. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Mukhametshin A.V., Sadikov M.R. *Ustroistvo zaryada emkostnogo nako-pitelya* [Capacitive Storage Charger]. Patent RF, No. 117748, 2012. [in Russian].

5. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Khlyupin P.A. Komp'yuternaya model' sistemy zaryada emkostnogo preobrazovatelya [Computer Model of a Capacitive Storage Charging System Based on an Inductive-Capacitive Converter]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2015, No. 4, pp. 374-390. URL: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf. [in Russian].

6. Khazieva R.T., Kirillov R.V., Kolesnikova O.I. Modeling of Capacitive Storage Charge Device Based on Multifunction Integrated Electromagnetic Component [Modeling of Capacitive Storage Charge Device Based on Multifunction Integrated Electromagnetic Component]. *Sbornik trudov 69-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchoi konferentsii «Nef't i gaz — 2015»* [Collection of Works of 69th International Youth Scientific Conference «Oil and Gas — 2015»]. Moscow, RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina, 2015, pp. 388–393. [in Russian].

7. Musavi F., Eberle W., Dunford W.G. A Phase Shifted Semi-Bridgeless Boost Power Factor Corrected Converter for Plug in Hybrid Electric Vehicle Battery Chargers. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011. Twenty-Sixth Annual IEE*. 2011, pp. 821–828.

8. Kit Sum. K. Improved Valley-Fill Passive Power Factor Correction Current Shaper Approaches IEC Specification Limits. *PCIM Magazine*, Feb. 1998.

9. Konesev S.G., Khazieva R.T. Induktivno-emkostnye preobrazovateli. primeneniye v elektrotekhnike i obzor skhemotekhnicheskikh reshenii [Inductive-Capacitive Converters Application in Electrical Engineering and an Overview of Circuit Solutions]. *Sbornik trudov 3-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Resurso-, energosberezhenie i ekologo-energeticheskaya bezopasnost' promyshlennykh gorodov»* [Collection of Articles of 3rd All-Russian Scientific and Practical

Conference «Resource-, Energy-Saving and Environmental-Energy Safety of Industrial Cities». Volzhskii, filial MEI Publ., 2010, pp. 120–125. [in Russian].

10. Khazieva R.T. Induktivno-emkostnye preobrazovateli na osnove mnogofunktsional'nykh integrirovannykh elektromagnitnykh komponentov [Inductive-Capacitive Converters Based on Multifunctional Integrated Electromagnetic Components]. *Sbornik 6-i Mezhdunarodnoi nauchnoi molodezhnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Tinchurinskie chteniya», 27–29 aprelya 2011* [Collection of Articles of 6th International Scientific Youth Conference with International Participation «Tinchurin Readings»]. Kazan, GOU VPO KGEU, 2011, pp. 107–108. [in Russian].

11. Konesev S.G., Khazieva R.T., Konesev I.S., Nurlygayanov R.A. *Induktivno-emkostnyi preobrazovatel'* [Inductive-Capacitive Converter]. Patent RF, No. 2450413, 2012. [in Russian].

12. Konesev S.G., Khazieva R.T. Funktsional'naya integratsiya kak tekhnicheskoe sredstvo razvitiya elektromagnitnykh elementov [Functional Integration as a Technical Tool for the Development of Electromagnetic Elements]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Interuniversity Collection of Scientific Works «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2014, pp. 135–138. [in Russian].

13. Milyakh A.N., Volkov I.V. *Sistemy neizmennogo toka na osnove induktivno-emkostnykh preobrazovatelei* [Consykhant Current Systems Based on Inductive-Capacitive Converters]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974. 216 p. [in Russian].

14. Milyakh A.N., Kubyshev B.E., Volkov I.V. *Induktivno-emkostnye preobrazovateli istochnikov napryazheniya v istochniki toka* [Inductive-Capacitive Converters of Voltage Sources into Current Sources]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1964. 299 p. [in Russian].

15. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Analiz energeticheskikh i chastotnykh kharakteristik mnogofunktsional'nykh integrirovannykh elektromagnitnykh kompo-

nentov [Analysis of Energy and Frequency Characteristics of Multifunctional Integrated Electromagnetic Components]. *Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov «Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy»* [International Collection of Scientific Works «Energy and Electrotechnical Systems»]. Magnitogorsk, Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2014, pp. 65–75. [in Russian].

16. Konesev S.G., Khazieva R.T. Metody otsenki parametrov nadezhnosti slozhnykh komponentov i sistem [Methods for Assessing the Parameters of the Reliability of Complex Components and Systems]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» — Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education»*, 2015, No. 1. URL: <http://www.science-education.ru/121-17558>. [in Russian].

17. Konesev S.G., Khazieva R.T. Metodika otsenki nadezhnosti slozhnykh elektro-magnitnykh elementov [Methodology for Assessing the Reliability of Complex Electromagnetic Elements]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» — Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education»*, 2015, No. 1. URL: www.science-education.ru/121-17925. [in Russian].

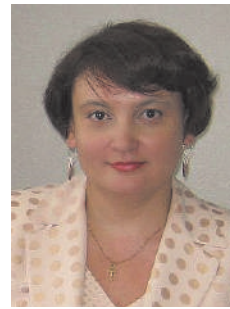
18. Konesev S.G., Khazieva R.T. Otsenka pokazatelei nadezhnosti mnogofunktsional'nykh integrirovannykh elektromagnitnykh komponentov [Assessment of Reliability Indicators for Multifunctional Integrated Electromagnetic Components]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya» — Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education»*, 2015, No. 1. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18445>. [in Russian].

19. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Issledovanie chastotnykh kharakteristik dvukhseksionnykh mnogofunktsional'nykh integrirovannykh elektromagnitnykh komponentov [Investigation of the Frequency Characteristics of Two-Section Multifunctional Integrated Electromagnetic Components]. *Vestnik UGATU — USATU Herald*, 2015, Vol. 19, No. 4 (70), pp. 66–71. <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/vestnik/article/view/1152>. [in Russian].



Иванова О. В.
Ivanova O. V.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление и сервис
в технических системах»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Короткова Л. Н.
Korotkova L. N.

кандидат химических наук,
доцент кафедры «Охрана окружающей
среды и рациональное использование
природных ресурсов»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Фаттахов М. М.
Fattakhov M. M.

доктор технических наук, заведующий
кафедрой «Автомобильные дороги и
технология строительного производства»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Халиков Р. М.
Khalikov R. M.

кандидат химических наук, доцент
кафедрой «Автомобильные дороги и
технология строительного производства»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.31

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-43-49

НАДЕЖНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В 3D АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

3D аддитивные технологии являются одним из наиболее динамичных направлений «цифрового» производства в стройиндустрии и дают возможность гибкого конструирования разнообразных уникальных сооружений. На сегодняшний день послойное экструдирование выступает основным трендом 3D печати большинства строительных принтеров: сопло (экструдер) выдавливает быстротвердеющую бетонную смесь, в которую включены различные модифицирующие добавки. При цифровой технологии особую роль играет оптимальная скорость «печати», что позволяет ранее «напечатанным» слоям бетонного нанокomпозиционного материала набирать первоначальную прочность. Автоматизированные устройства 3D принтеров, которые действуют в угловых координатах и приводятся в дви-

жение электроприводами, а также роботизированные манипуляторы являются наиболее экономичными за счет надежности при строительстве малоэтажных зданий. Преимущества аддитивных технологии 3D печати в строительстве зданий и сооружений проявляются в высокой скорости строительства, снижении трудозатрат и др.

Важнейшее требование к бетононасосному оборудованию 3D печати — способность перекачивать нанокomпозиционный строительный раствор по горизонтали и (или) вертикали на десятки метров. Подобный технологический запрос вызывает необходимость безотказного функционирования электротехнического оборудования с определенной скоростью выгрузки и геометрической точностью экструзии бетонной смеси. Более совершенные поршневые агрегаты с двумя цилиндрами, работающими попеременно, значительно уменьшают механический износ, а также гарантируют бесперебойную и плавную работу бетононасоса. Гидравлические масляные устройства обеспечивают большее давление, максимальную надежность 3D печати и долговечность электротехнического оборудования. При выборе оптимальных электродвигателей для бетонных насосов, работающих с переменной нагрузкой, мощность электроприводов завышается с учетом самых тяжелых пусков и максимально возможных нагрузкой. Учет соотношения максимального давления и объема бетонной композиции позволяет увеличить мощность электродвигателя на 12–17 %, сократить энергетические трудозатраты на 25–30 %.

Ключевые слова: 3D аддитивная технология, бетонный насос, строительный 3D-принтер, электродвигатель, управление качеством, энергосбережение.

RELIABLE QUALITY MANAGEMENT OF ELECTRICAL EQUIPMENT FUNCTIONING IN 3-D ADDITIVE TECHNOLOGIES

3D additive technologies are one of the most dynamic areas of «digital» production in the construction industry which make it possible to flexibly design a variety of unique structures. Today, layer-by-layer extrusion is the main trend in 3D printing of most construction printers: the nozzle (extruder) squeezes out a fast-hardening concrete mixture, which includes various modifying additives. With digital technology, the optimal speed of «printing» plays a special role, which allows previously «printed» layers of concrete nanocomposite material to gain initial strength. Automated devices of 3D printers that operate in angular coordinates and are driven by electric drives, as well as with a portal drive, are the most economical due to reliability in the construction of low-rise buildings. The advantages of additive 3D printing technologies in the construction of buildings and structures can be summed up to robotization, high construction speed, reduced labor costs, etc.

The most important requirement for 3D printing concrete pumping equipment is the ability to pump nanocomposite mortar horizontally and (or) vertically for tens of meters. Such a technological request causes the need for trouble-free operation of electrical equipment with a certain discharge speed and geometric accuracy of concrete mix extrusion. More advanced reciprocating units with two cylinders working alternately significantly reduce mechanical wear, and also guarantee uninterrupted and smooth operation of the concrete pump. Hydraulic oil devices provide greater pressure, maximum reliability of 3D printing and durability of electrical equipment. When choosing the optimal electric motors for concrete pumps which operate with variable loads, the power of electric drives is overestimated by taking into account the heaviest starts and the maximum possible loading. Taking into account the ratio of the maximum pressure and volume of the concrete composition allows increasing the power of the electric motor by 12–17 % and reducing energy labor costs by 25–30 %.

Key words: 3D additive technology, concrete pump, electric motor, construction 3D printer, quality management, energy saving.

Интенсивные работы по созданию прорывных трендов и высокотехнологичного электротехнического оборудования для 3D аддитивных технологий продолжаются во

многих странах мира [1]. Аддитивные технологии — это способ построения объемного стройобъекта по цифровой 3D модели (CAD-модель) методом послойного наращивания;

3D принтер – это устройство, которое создает объемное здание по цифровой 3D модели путем послойного наращивания стройматериала. Использование высокотехнологичных электротехнических аппаратов раскрывает обширные перспективы для модифицирования привычной архитектуры и геометрических конфигураций строительных объектов. Разработка бетонных электронасосов для перекачивания модифицированных наноконпозиций, обеспечивающих получение 3D конструкций с высокими эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками, остается актуальной задачей. Например, возведение монолитных уникальных зданий, которое является одним из основных трендов развития промышленного и гражданского строительства, требует надежное обеспечение своевременной доставки композиционной смеси в точку бетонирования.

Цель данной статьи — рассмотрение надежного функционирования электротехнического оборудования для 3D печати бетонных конструкций в аддитивных технологиях.

В настоящее время инновационным трендом является последовательное изготовление строительных объектов слой за слоем на базе цифровой 3D модели с использованием различных стройматериалов материалов, в том числе разнообразных бетонных композиций. Исходная смесь для аддитивного производства: портландцементное (геополимерное) вяжущее, наполнители (кварцевый песок и др.) за счет модифицирующих добавок (ускорители или замедлители твердения), обладает более увеличенной вязкостью по сравнению с обычным бетоном, что позволяет бетонной композиции быть самонесущей в процессе «наслаивания».

Важнейшее функциональное назначение бетононасоса в 3D аддитивных технологиях охватывает своевременную перекачку необходимого объема бетонной строительной композиции многообразной реологии в вертикальном и/или горизонтальном направлениях. Среди преимуществ бетонных гидроприводных насосов следует отметить простую конструкцию с удобной бетоноводострелой для легкой подачи разнообразных

составов, а также меньший расход электроэнергии. Полная гидравлическая система электрических бетононасосов продлевает срок эксплуатации, повышает надежность и сокращает количество технологических отказов.

3D аддитивная технология трехмерной печати предусматривает согласованное функционирование строительного принтера и исходных сырьевых компонентов [2]. В некоторых технологических конструкциях вместо накопительного бункера (резервуара) установлен принимающий рукав для готовой бетонной смеси. В связи с этим необходимо иметь электротехническое оборудование по способности перекачивать и подавать исходную наноконпозицию с определенной скоростью выгрузки и геометрической точностью, что обеспечивается роботизированной системой для автоматического перемещения сопла (инжектора, форсунки) печатающей головки (рисунок 1).

Печатающая головка 3D принтера представляет с собой сопло, из которого выдавливается (экструдировается) бетонная сырьевая композиция. Траектория сопла определяется цифровой CAD-программой: после завершения полного нанесения одного слоя рабочая платформа поднимается вверх на толщину слоя и «печатаются» другие слои. При цифровой технологии особую роль играет оптимальная скорость «печати», что позволяет ранее «напечатанным» слоям бетонного наноконпозиционного материала набирать первоначальную прочность, чтобы обеспечить соответствующую адгезию между отдельными слоями.

Следует отметить, что для обеспечения соответствующего объема перекачки электрическим бетононасосом формуемая бетонная наноконпозиция имеет требуемую реологию [3], т.е. обладает сравнительно низкой пластической вязкостью и низким пределом текучести. В 3D аддитивных технологиях оптимальная бетонная смесь относительно быстро набирает прочность при замедленной кинетике начального структурообразования; в то же время не растекается под воздействием последующих верхних слоев и имеет невысокую усадку при твердении.



Рисунок 1. Технологическая схема функционирования 3D печати

В настоящее время преимущественно в аддитивных технологиях используются двухпоршневые бетононасосы (наряду с роторными и шнековыми аппаратами), которые приводятся в движение электрическим или дизельным двигателем. Более совершенные поршневые агрегаты с двумя цилиндрами, работающими попеременно, значительно уменьшают механический износ, а также гарантируют бесперебойную и плавную работу бетононасоса: гидравлические масляные устройства обеспечивают требуемое давление, надежность 3D печати и долговечность.

Основной функцией электропривода является приведение в движение бетонного насоса в соответствии с требованиями технологического режима в 3D аддитивных технологиях. При использовании асинхронного электродвигателя между ним и бетононасосом необходима установка механической передачи, понижающая скорость оборотов до требуемого уровня. Наличие механической передачи снижает надежность работы электропривода, увеличивает его массу, габариты и стоимость, создает дополнительный шум при работе. В связи с этим перспективным является использование таких электродвига-

телей [4], которые имеют низкую угловую скорость вала: волновые электроприводы и двигатели с катящимся ротором.

При выборе мощности электродвигателей для бетонных насосов, работающих с переменной нагрузкой (максимальное давление — P на выходе бетононасоса) и производительностью (объем бетонной смеси — Q) (рисунок 2), мощность электроприводов завышается с учетом самых тяжелых пусков и максимально возможных нагрузкой. Одновременно максимальные значения давления P и производительности Q не могут быть достигнуты. Учет этих факторов позволяет увеличить мощность электродвигателя на 12–17 %, сократить энергетические затраты на 25–30 %, а также одновременно понизить уровень вибраций.

Технологическое управление бетононасосом 3D печати осуществляется автоматически электронным оборудованием; дополнительно все функции на гидравлическом блоке управления могут легко обслуживаться вручную, что при выходе из строя блока управления или датчиков позволяет бетононасосу продолжать работу. Приводные цилиндры бетонного поршневого насоса имеют автома-

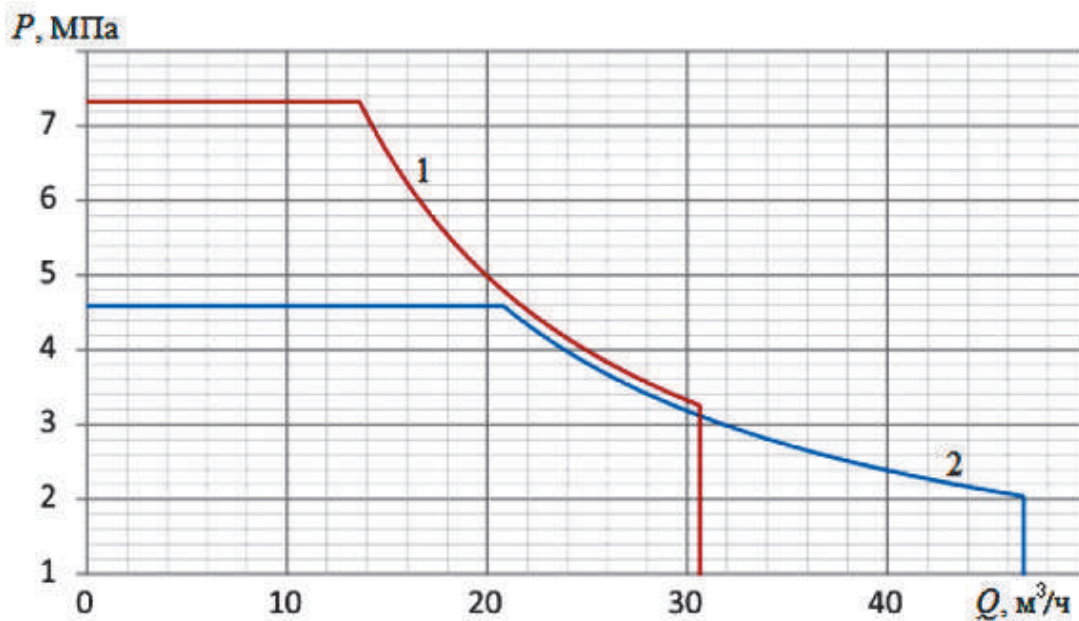


Рисунок 2. Динамика производительности бетонного насоса в режимах высокого давления (1) и оптимальной производительности (2)

тическую компенсацию утечки на быстроизнашивающихся деталях и кольце.

Следует отметить, что запуск бетононасоса осуществляется пусковой смесью или цементным «молочком» (подвижная смесь цемента с водой). Автономная система промывки водой в 3D аддитивных технологиях позволяет оперативно очистить бетонопровод от остатков строительного раствора. Поэтому для надежного управления качественного функционирования электротехнического оборудования в процессе 3D печати необходим постоянный источник чистой воды (при низких температурах — теплой) [5].

При помощи электронного блока управления, оператор может обеспечить бесперебойную и надежную работу бетононасоса в оптимальном режиме. Для выполнения разнообразных задач стройиндустрии комплектация бетононасоса включает трубки, шланги различной длины и диаметра, систему промывки, а также программное обеспечение для мониторинга технологического процесса. Перекачиваемость и подвижную реологию нанокмпозиций в 3D печати можно усилить добавлением 0,7–0,9 % высокоэффективных суперпластификаторов на базе гребнеобразных поликарбоксилатных эфиров [6, 7], которые позволяют значительно увеличить время сохранения консистенции. Следует выделить и нерешенные проблемы

использования аддитивных технологий в стройиндустрии: низкая производительность оборудования при низких или высоких температурах, ограничения геометрических размеров возводимых сооружений, которые связаны с конструкцией 3D принтеров.

Строительные 3D принтеры представляют собой конструктивные аналоги лабораторно-производственных устройств аддитивных технологий. В настоящее время разработаны многообразные компоновки: порталные рамные 3D принтеры; с дельта-приводом, функционирующие в угловых координатах; роботизированные манипуляторы (рисунок 3) и др. Автоматизированные устройства для строительства малоэтажных зданий и сооружений, которые действуют в угловых координатах (аналог башенного крана) и приводятся в движение электроприводами, являются наиболее экономичными. Роботизированные манипуляторы позволяют надежно управлять качеством функционирования электротехнического оборудования в аддитивных технологиях стройиндустрии.

В производственных условиях Уфимской гипсовой компании с использованием опытно-промышленного 3D принтера АМТ S1160 (ООО «СПЕЦАВИА», г. Ярославль) напечатаны фрагменты вертикальных ограждающих конструкций и одноэтажный малогабаритный павильон. Преимуществами



1 — сопло экструдера; 2 — конструкция сооружения

Рисунок 3. Роботизированный строительный 3D принтер

аддитивных технологий 3D печати в строительстве зданий и сооружений являются: роботизация строительного процесса, высокая скорость строительства, снижение затрат на производство работ [8, 9]. Аддитивные технологии значительно укорачивают строительный цикл и сокращают время застройки; дают возможность быстрого изменения конструкции зданий без дорогостоящей оснастки. В последние годы аддитивные технологии возведения монолитных зданий претерпели существенные изменения: активно используются средства механизации процессов транспортировки и

укладки бетонной смеси, инновационные опалубочные системы.

Выводы

3D аддитивные технологии являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства в стройиндустрии и дают возможность конструировать разнообразные здания и сокращают энергетические затраты на 25–30%. Инновационный технологический подъем в России 3D аддитивных технологий в значительной мере определяется надежным функционированием ресурсосберегающих электроприводов.

Список литературы

1. Чулкова И.Л., Юрина Т.А. Проектирование составов бетонных смесей с помощью современных информационных технологий. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 136 с.
2. Austin S.A., Lim S., Buswell R.A. e.a. Mix Design and Fresh Properties for High-Performance Printing Concrete // *Materials and Structures*. 2012. P. 1221–1232.
3. Иванова О.В., Короткова Л.Н., Халиков Р.М. Инновационные подходы управления качеством создания пластифицирующих нанодобавок // *Современные инновации в науке и технике: сб. 10-й Всеросс. конф.* Курск: ЮЗГУ, 2020. С. 131–134.
4. Шапиро С.В., Гумерова М.Б., Бабилова Н.Л. и др. Каскадный асинхронно-синхронный бесконтактный двигатель // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2018. Т. 14. № 3. С. 28–36.
5. Иванова О.В., Халиков Р.М., Короткова Л.Н. Результативное управление электротехническим оборудованием технологической схемы производства качественной воды // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2018. Т. 14. № 2. С. 21–27.
6. Сеницин Д.А., Халиков Р.М., Булатов Б.Г. и др. Технологические подходы направленного структурообразования нано-

композитов строительного назначения с повышенной коррозионной устойчивостью // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т. 11. № 2. С. 153–164.

7. Журавлева М.И., Иванова О.В., Халиков Р.М. Управление технологическими характеристиками вяжущих материалов поликарбоксилатными суперпластификаторами // Актуальные проблемы науки и техники – 2019: сб. XII Междунар. конф. Уфа: Изд-во «УГНТУ», 2019. Т. 2. С.111–113.

8. Perkins I., Skitmore M. Three-Dimensional Printing in Construction Industry: A Review // *International Journal of Construction Management*. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 1–9.

9. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С. и др. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 27–46.

References

1. Chulkova I.L., Yurina T.A. *Proektirovanie sostavov betonnykh smesei s pomoshch'yu sovremennykh informatsionnykh tekhnologii* [Design of Concrete Mix Compositions Using Modern Information Technologies]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2019. 136 p. [in Russian].

2. Austin S.A., Lim S., Buswell R.A. e.a. Mix Design and Fresh Properties for High-Performance Printing Concrete. *Materials and Structures*, 2012, pp. 1221–1232.

3. Ivanova O.V., Korotkova L.N., Khalikov R.M. Innovatsionnye podkhody upravleniya kachestvom sozdaniya plastifitsiruyushchikh nanodobavok [Innovative Approaches to Quality Management for Creating Plasticizing Nanoadditives]. *Sbornik 10-i Vserossiiskoi konferentsii «Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike»* [Collection of 10th All-Russian Conference «Modern Innovations in Science and Technology»]. Kursk, YuZGU Publ., 2020, pp. 131-134. [in Russian].

4. Shapiro S.V., Gumerova M.B., Babikova N.L. e.a. Kaskadnyi asinkhronno-sinkhronnyi beskontaktnyi dvigatel' [Cascading Asynchronous-Synchronous Non-Contact Motors]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye*

kompleksy i sistemy – Electrical and Data Facilities and Systems, 2018, Vol. 14, No. 3, pp. 28–36. [in Russian].

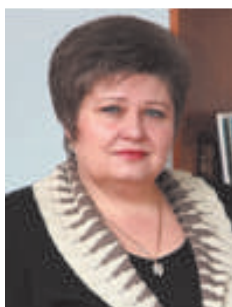
5. Ivanova O.V., Khalikov R.M., Korotkova L.N. Rezul'tativnoe upravlenie elektrotekhnicheskim oborudovaniem tekhnologicheskoi skhemy proizvodstva kachestvennoi vody [The Efficient Management of Electrotechnical Equipment for the Qualitative Water Production Technological Scheme]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy – Electrical and Data Facilities and Systems*, 2018, Vol. 14, No. 2, pp. 21–27. [in Russian].

6. Sinitsin D.A., Khalikov R.M., Bulatov B.G. e.a. Tekhnologichnye podkhody napravlenogo strukturoobrazovaniya nanokompozitov stroitel'nogo naznacheniya s povyshennoi korrozionnoi ustoichivost'yu [Technological Approaches for Directed Structure Formation of Nanocomposites for Construction Purposes with Increased Corrosion Resistance]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve — Nanotechnologies in Construction*, 2019, Vol. 11, No. 2, pp. 153–164. [in Russian].

7. Zhuravleva M.I., Ivanova O.V., Khalikov R.M. Upravlenie tekhnologicheskimi kharakteristikami vyazhushchikh materialov polikarboksilatnymi superplastifikatorami [Management of Technological Characteristics of Binding Materials with Polycarboxylate Superplasticizers]. *Sbornik XII Mezhdunarodnoi konferentsii «Aktual'nye problemy nauki i tekhniki — 2019»* [Collection of XII International Conference «Actual Problems of Science and Technology — 2019»]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2019, Vol. 2, pp. 111–113. [in Russian].

8. Perkins I., Skitmore M. Three-Dimensional Printing in Construction Industry: A Review. *International Journal of Construction Management*, 2015, Vol. 15, No. 1, pp. 1–9.

9. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S. i dr. 3D-pechat' v stroitel'stve [3D-Printing in Construction]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii — Construction of Unique Buildings and Structures*, 2017, No. 1 (52), pp. 27–46. [in Russian].



Солодилова Н. З.
Solodilova N. Z.

*доктор экономических наук, профессор,
директор Института экономики и сервиса,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Ахмеджанов Ф. М.
Akhmedzhanov F. M.

*кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология и конструирование
одежды», ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Крымский В. Г.
Krymskiy V. G.

*доктор технических наук, профессор
Института экономики и сервиса,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Будеева О. Н.
Budeeva O. N.

*кандидат исторических наук, заведующая
кафедрой «Технология и конструирование
одежды», ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 004.89:687.1

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-50-62

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ. Часть 1. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДСИСТЕМ СЕНСОРОВ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье приводится анализ ситуации, складывающейся в отношении разработки аппаратного и программного обеспечения интеллектуальной одежды.

Интеллектуальная одежда в настоящее время должна быть частью информационной системы, функционирующей в рамках Интернета вещей. Такая система обладает определенной архитектурой, включающей ряд основных подсистем (сенсоров, исполнительных элементов, управления, передачи информации и других).

Первая часть статьи посвящена рассмотрению особенностей аппаратного обеспечения (АО) интеллектуальной одежды применительно к двум значимым подсистемам: сенсоров и исполнительных органов. Многие компоненты АО в этом случае выполняются на тканевой основе, что соответствует привлечению технологии «умной ткани» (или «электронной ткани»). Показано, что в зависимости от назначения можно выделить большие группы сенсоров и исполнительных элементов, в функционировании которых применяются разные физические принципы. При этом большинство из них представлено вариантами, реализованными на тканевой основе. Для всех указанных компонентов предусмотрены способы передачи полученной информации в другие подсистемы для ее дальнейшей обработки и использования с целью поддержки принятия решений.

Проведенный анализ дает возможность для дальнейшего исследования перспектив и тенденций развития АО интеллектуальной одежды в условиях быстро меняющихся требований со стороны потребителей.

Ключевые слова: интеллектуальная одежда, аппаратное и программное обеспечение, электронная ткань, подсистема сенсоров, подсистема исполнительных элементов.

FUNDAMENTALS OF THE DEVELOPMENT OF HARDWARE AND SOFTWARE FOR INTELLIGENT CLOTHING. Part 1. ANALYSIS OF FEATURES OF HARDWARE FOR SUBSYSTEMS OF SENSORS AND ACTUATORS

The paper analyzes state-of-the-art in the area of the development of hardware and software for smart garment.

Smart garment should now be a part of information system operating within the Internet of things. Such a system has specific architecture including a number of basic subsystems (sensors, control, communication, etc.).

The first part of the paper focuses on consideration of the hardware features for two important subsystems of sensors and actuators. In this case, many hardware components are made as textile-based ones, which corresponds to the involvement of «smart textile» (or «e-textile») technology. It is shown that, depending on the purpose, it is possible to distinguish large groups of sensors and actuators, in the functioning of which different physical principles are applied. Moreover, most of them are presented by options implemented on a textile basis. For all these components, methods are provided for transferring the received information to other subsystems for its further processing and use to support decision making.

The performed analysis makes it possible to further study the prospects and development trends of intelligent clothing hardware in the context of rapidly changing requirements from consumers.

Key words: smart garment, hardware and software, e-textile, sensing subsystem, actuator subsystem.

Введение

Интеллектуальная одежда, также известная как «умная» одежда, по существу представляет собой тканевую основу, в которую встраиваются разнообразные смарт-аксессуары (СА). В свою очередь, СА могут включать в себя наборы текстильных и /или нетекстильных сенсоров, электронные модули обработки их сигналов, средства аудио- или визуального отображения, полученной таким образом информации и, при необходимости, средства поддержки принятия решений [1, 2]. Различают СА пассивные (способны только фиксировать характеристики внешней среды и параметры челове-

ского тела), активные (вырабатывают реакции на измеренные величины) и «сверхумные» (обеспечивают адаптацию к изменяющимся внешним условиям) [2].

На сегодняшний день многие СА обеспечивают передачу данных по компьютерным сетям или сетям мобильной связи. По этой причине можно говорить о появлении «Интернета умной одежды» как важного компонента «Интернета вещей» (Internet-of-Things, или IoT) [3]. Предметы такой одежды общаются друг с другом и с другими объектами, в том числе — и с удаленными серверами, в единой цифровой среде. В результате применение интеллектуальной одежды соз-

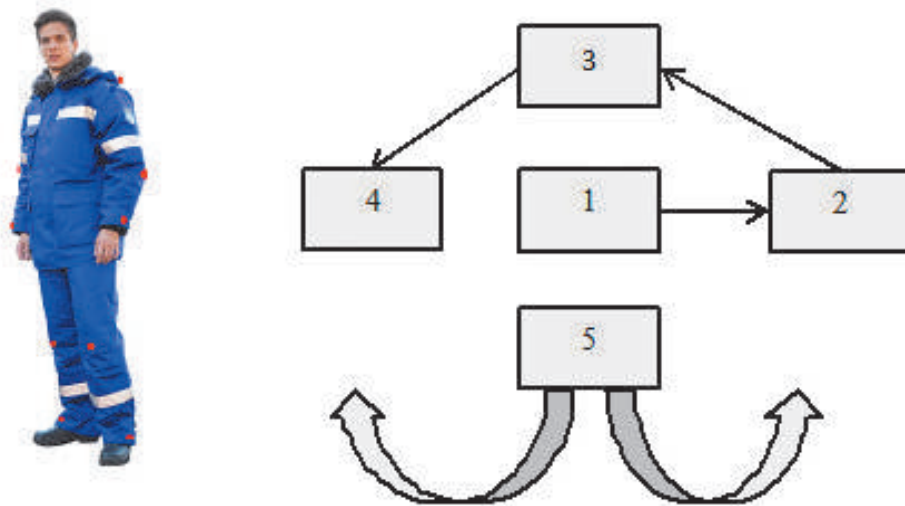


Рисунок 1. Система «умной» антиэлектростатической защиты (информация с Интернет-сайта компании «БВН инжиниринг»)

дает беспрецедентные возможности для решения глобальных проблем в целом ряде областей: мониторинг состояния здоровья [4], возрастные изменения и реабилитация [5], безопасность труда [6] и другие.

В частности, характерным примером интеллектуальной одежды, спроектированной для повышения безопасности труда, может служить специализированный костюм (рисунок 1) со встроенной системой антиэлектростатической защиты разработки компании «БВН инжиниринг» (г. Новочеркасск Ростовской области, Россия). Эта система (рисунок 1) содержит:

- сенсор 1, воспринимающий электростатическое поле;
- анализатор 2, сравнивающий измеренное значение контролируемого параметра с заданным критическим значением;
- управляющий блок 3, который в случае превышения отмеченного критического уровня передает импульс на блок оповещения 4;
- собственно блок оповещения 4, который при получении импульса с помощью звукового сигнала оповещает об опасности возникновения электростатического разряда;
- автономный источник питания 5.

Данная разработка позволяет осуществлять непрерывный контроль ситуации в условиях производств, характеризующихся повышенным риском образования электростатических разрядов и искр. При получении оповещения об опасности работник может

предотвратить возникновение искр или взрыва простым изменением положения тела.

Согласно техническому отчету Европейской комиссии по указанной тематике [7], сложились все предпосылки к тому, что СА и интеллектуальная одежда будут использоваться в ближайшем будущем во все возрастающем масштабе. Соответствующие устройства и предметы одежды должны быть гибкими, модными и, в некоторых случаях, невидимыми. Кроме того, необходимо, чтобы при эксплуатации СА обеспечивалось эффективное управление энергопитанием, а также осуществлялись высокопроизводительные вычислительные технологии [8].

С точки зрения функционирования в рамках IoT системам, включающим в себя предметы интеллектуальной одежды, присуща определенная архитектура, примерный вид которой показан на рисунке 2 (приведен в публикации [9]). Обозначения на этом рисунке поясняются в таблице 1.

Такая архитектура подразумевает наличие соответствующего аппаратного и программного обеспечения (АО и ПО), с помощью которых реализуются требуемое функционирование всех подсистем и их взаимодействие с целью решения общих задач, стоящих перед системой. При разработке АО и ПО интеллектуальной одежды необходимо опираться на накопленный опыт и учитывать наиболее перспективные тенденции развития данного направления.

Таблица 1. Пояснения обозначений на рисунке 2

Обозначение	Смысл обозначения
Smart Garment	Интеллектуальная одежда
Control Subsystem	Подсистема управления
Sensing Subsystem	Подсистема сенсоров
Location Subsystem	Подсистема контроля местоположения
Actuator Subsystem	Подсистема исполнительных элементов
Display Subsystem	Подсистема визуального воспроизведения информации
Power Subsystem	Подсистема энергопитания
Communication Subsystem	Подсистема коммуникаций
Storage Subsystem	Хранилище данных
Blockchain Module	Блокчейн-модуль
Communication Gateway	Коммуникационный шлюз
Internet or Internal LAN	Интернет или локальная сеть
Cloud Services	Облачные сервисы
Blockchain	Блокчейн
Smart Contracts	«Умные контракты»
Remote Users	Удаленные пользователи информации

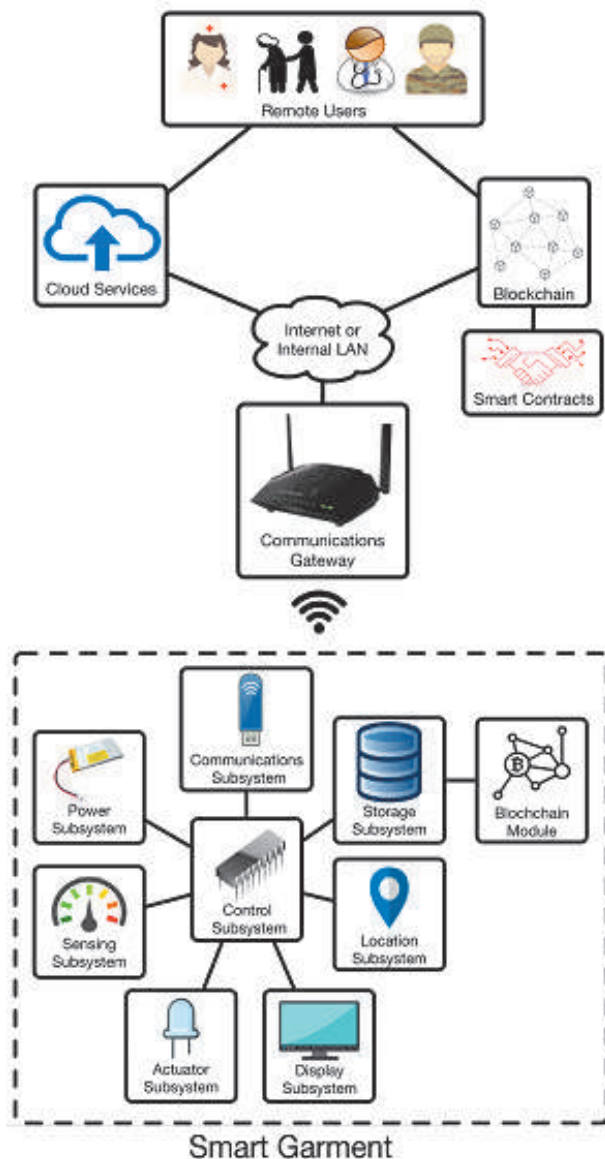


Рисунок 2. Обобщенная архитектура систем с участием предметов интеллектуальной одежды

Ниже дается краткий анализ ситуации, сложившейся применительно к указанной проблематике.

Разработка аппаратного обеспечения интеллектуальной одежды: подсистемы сенсоров и исполнительных элементов

Основным признаком, по которому классифицируются компоненты АО интеллектуальной одежды, является тот факт, выполнены ли они на тканевой основе (Textile-Based) или состоят из «внешних» по отношению к ткани устройств, использующих другие многообразные материалы. В первом случае речь идет о привлечении технологий «умной ткани» (Smart Textile, e-Textile), которые на современном этапе позволяют получать на тканевой основе многие электронные узлы. Примером может служить образование полевого транзистора на базе тканевых нитей, покрытых специальным полимером PEDOT: PSS (рисунок 3, приведенный в работе [10]). Одна из этих нитей образует электрод затвора (Gate), а вторая — электроды стока и истока (Drain) транзистора. На пересечении двух нитей помещается электролит (Electrolyte).

Проанализируем специфику формирования АО интеллектуальной одежды для подсистем сенсоров и исполнительных элементов, которые входят в общую архитектуру системы, включающей интеллектуальную одежду (рисунок 2).

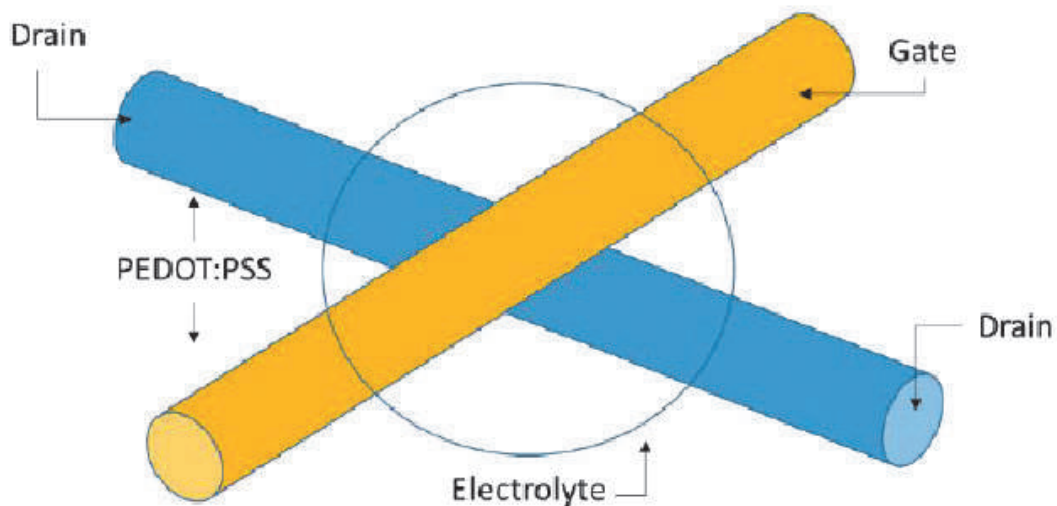


Рисунок 3. Обобщенная архитектура систем с участием предметов интеллектуальной одежды

Подсистема сенсоров

Такие подсистемы могут включать несколько типов сенсоров, которые отслеживают различные события окружающей среды и параметры человеческого организма [10–12]. Здесь следует выделить:

- *Сенсоры для контроля движения.* Наиболее часто используются акселерометры и гироскопы. Инфракрасные или ультразвуковые сенсоры могут быть использованы для определения приближения к препятствию или удаления от него [13]. Пассивные инфракрасные (Passive Infrared, или PIR) сенсоры применяются для обнаружения движения людей или животных относительно пользователя. Кроме перечисленных, к этому классу сенсоров относятся датчики наклона, датчики вибрации и шагомеры.

- *Сенсоры для измерения температуры тела человека.* Существуют различные сенсоры, которые можно использовать для измерения температуры тела. В частности, широко применяются термисторы или резистивные датчики температуры (Resistance Temperature Detectors, или RTD). Они могут быть успешно выполнены на тканевой основе.

В качестве примера остановимся на тканевом (текстильном) термографе (рисунок 4, приведенный в публикации [14]). Он состоит из ряда чувствительных к температуре тканевых нитей (Temperature Sensing Yarns) из полиэстера, в структуру которых введены

микрокапсулы с термисторами (Micro-Pods Containing the Thermistors).

На рисунке 4 показаны общие размеры термографа.

Следует отметить, что погрешности измерения температуры с помощью таких устройств пока остаются довольно большими и могут достигать нескольких десятых градуса.

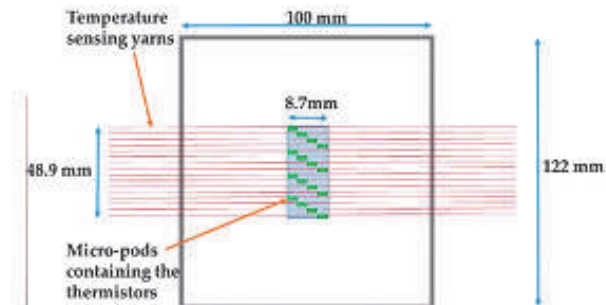


Рисунок 4. Схематическое изображение термографа на тканевой основе

- *Сенсоры для контроля показателей жизненно важных функций организма.* Эта группа устройств включает сенсоры для контроля частоты сердечных сокращений, частоты дыхания, артериального давления, насыщения крови кислородом, уровня глюкозы в крови, электродермальных характеристик и других параметров. Также встроенные сенсоры можно использовать для получения электрокардиограмм (ЭКГ) и электроэнцефалографии (ЭЭГ). Многие из них могут быть выполнены на тканевой основе [15–18].

Собственно для выполнения измерений используются разнообразные физические принципы. Так, на рисунке 5 (приведен в работе [16]) проиллюстрирован часто применяемый подход, основанный на изменении емкости искусственно сформированного конденсатора при выполнении измерений.

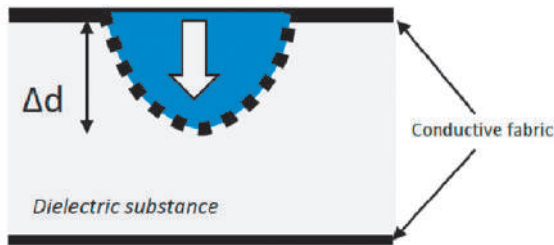


Рисунок 5. Иллюстрация емкостного принципа измерения показателей организма

Отмеченная емкость зависит от расстояния между пластинами конденсатора. Эти пластины выполняются из проводящей ткани (Conductive Fabric), например, содержащей волокна на базе соединений серебра. Между пластинами помещается диэлектрик (Dielectric Substance). При измерении, в частности, давления и фиксации одной из пластин за

счет жесткого вкладыша происходит деформация второй пластины.

Смещение ее части Δd приводит к соответствующему изменению емкости, что является информативной характеристикой измеряемого показателя.

Общая ситуация с контролем показателей функций человеческого организма при использовании интеллектуальной одежды отражена в содержании таблицы 2, составленной на основе данных, которые приведены в работе [16].

При этом возможности расширения спектра измеряемых показателей постоянно возрастают [18].

- *Сенсоры определения местоположения.* Это устройства, которые можно использовать для позиционирования «умного» предмета одежды, фиксации его абсолютных (например GPS) или относительных (удаление от дома или иного центра отсчета) координат. Одним из широко используемых здесь подходов является определение показателя уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator, или RSSI) [19].

Таблица 2. Сенсорный мониторинг состояния организма при использовании интеллектуальной одежды

№	Вид мониторинга	Контролируемые характеристики	Сенсор	Типология
1	ЭКГ	Электрические показатели сердечной деятельности, частота сердечных сокращений (ЧСС)	Электродный	На клею, на тканевой основе, в виде микроплаты
2	ЭЭГ	Электрические показатели деятельности мозга	Электродный	На клею, на тканевой основе
3	ЭМГ	Электрические показатели мускульной активности	Электродный	На клею, на тканевой основе
4	Респираторная функция	Частота дыхания, объемы вhaled и выhaled воздуха	Тензодатчик; электродный датчик для измерения импеданса	Аппаратные средства, на клею, на тканевой основе
5	Содержание газов в крови	SpO ₂ , CO ₂ , ЧСС	LED/оптический	Аппаратные средства, оптоволокно для передачи сигнала
6	Давление крови	Систолическое / диастолическое давления, ЧСС	Манжетный	Аппаратная система
7	Поверхностное давление (в частности при компрессионной терапии)	Контактное давление	Пьезорезистивный или емкостный	Тонкопленочные структуры с использованием так называемых «пьезорезистивных чернил»; емкостные датчики как на тканевой основе, так и нетекстильные
8	Сопротивление	Гальваническое сопротивление кожи (Galvanic Skin Resistance, или GSR), сопротивление тела	Электродный датчик для измерения импеданса	Аппаратная система

Подход обеспечивает достаточно хорошую точность при позиционировании в ограниченных пространствах (например в жилом помещении), но результаты зависят от условий работы и применяемого технического оснащения. Он основан на том, что при работе с сигналами в стандартах Wi-Fi или Bluetooth 4.0 справедливо соотношение [20]

$$P_s = P_0 - 10 \cdot n \cdot \lg(s/s_0),$$

где s — расстояние от приемника сигнала (предмета интеллектуальной одежды) до передатчика;

s_0 — расстояние от приемника до точки, где выполнялось измерение мощности P_0 его сигнала (выбранное единичное (калибровочное) расстояние, например, 1 м);

P_0 — мощность сигнала приемника, измеренная на единичном расстоянии s_0 от него (децибел);

n — коэффициент потерь мощности сигнала при распространении в среде (для воздуха $n=2$);

P_s — собственно RSSI (децибел).

При измеренных значениях мощностей это соотношение всегда можно разрешить относительно расстояния s от предмета интеллектуальной одежды до базовой станции или маяка. Это и позволяет осуществить требуемое позиционирование.

С точки зрения аппаратного обеспечения при данном подходе в ткань одежды вшивается соответствующий чип, с помощью которого реализуется приемник, укомплектованный вязаной антенной. Она содержит «впле-

тенные» в структуру ткани медные нити толщиной 0,3 мм. Такая антенна допускает деформации в процессе ношения одежды.

Существуют и другие технологии, позволяющие определять координаты предметов интеллектуальной одежды. К ним можно отнести использование инфракрасных систем [21], систем на основе ультразвука [22], технологии сверхширокополосной связи [23] или систем инерциальной навигации [24].

- *Сенсоры взаимодействия.* Они предназначены для обнаружения прикосновений с помощью механических переключателей или переключающих тактильных датчиков. На рисунке 6, который приводится в публикации [25], схематически показано устройство такого датчика, выполненного на тканевой основе. Сенсор содержит четыре слоя. Самый верхний и самый нижний слой – проводящие, содержат компоненты из серебра. Второй сверху слой является сетчатым. При отсутствии воздействия (силы F) он обеспечивает разрыв контактов с третьим сверху слоем, выполненным из пьезорезистивного материала. При нажатии, в то же время, те или иные сопротивления R_{force} оказываются включенными в цепь, что влияет на результирующее сопротивление R_{sum} .

Также для аналогичных целей могут использоваться емкостные или резистивные сенсорные экраны. В настоящее время существуют тканевые/лазерные клавиатуры и даже 2D сенсорные панели [26].

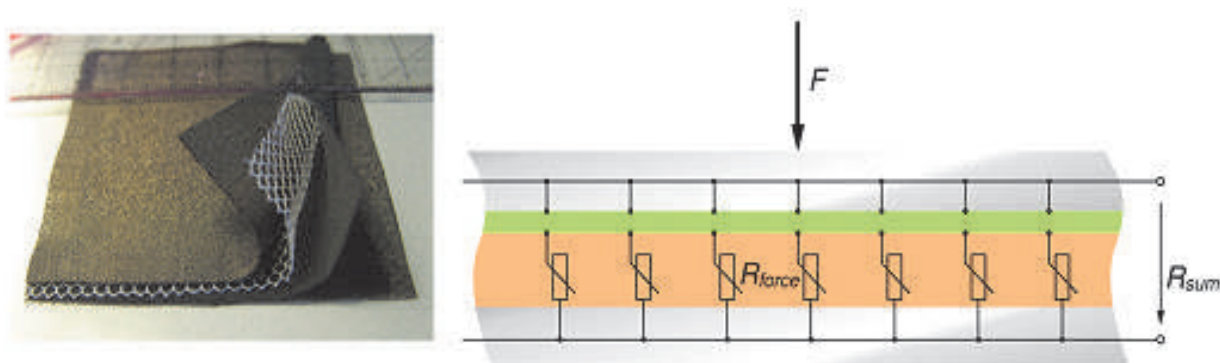


Рисунок 6. Устройство тактильного датчика на тканевой основе

- *Сенсоры для контроля окружающей среды.* Они собирают информацию о параметрах окружающей среды: температуре воздуха, высоте над уровнем моря, уровне освеще-

щения (в частности, на основе светозависимых резисторов (Light-Dependent Resistances, или LDR) либо фотодиодов), уровне ультрафиолетового облучения, уровне звука/шума

(микрофоны, устройства распознавания речи), атмосферном давлении, влажности. Также к этому классу следует отнести сенсоры, определяющие присутствие в окружающей среде вредных газов (например угарного газа).

Примером могут служить газовые сенсоры на тканевой основе, позволяющие улавливать опасные вещества в воздухе и выполняющие по существу функции «электронного носа» (рисунок 7, приведенный в работе [27]).

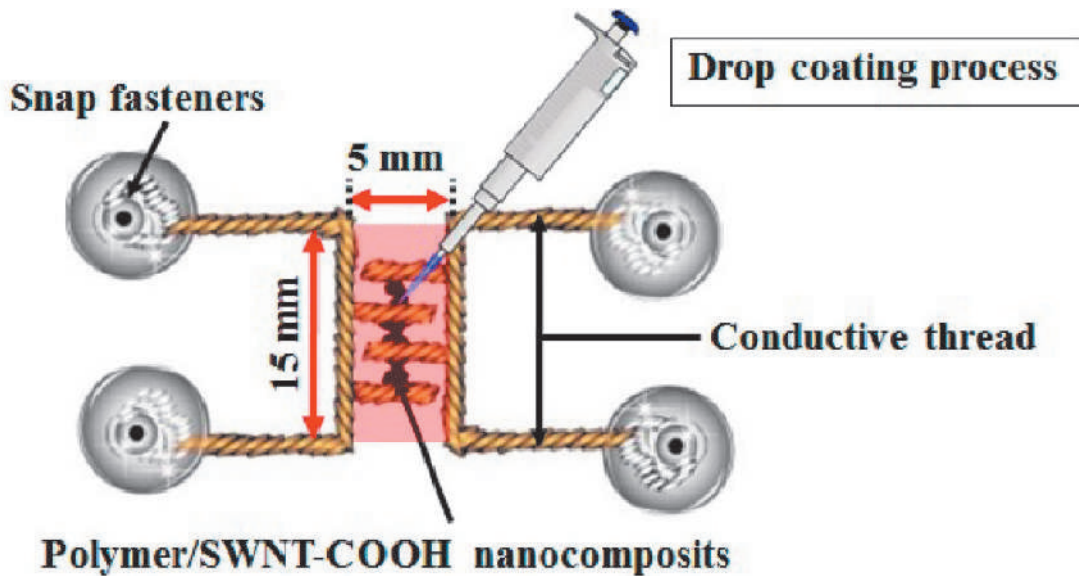


Рисунок 7. Газовый сенсор на тканевой основе

Сенсор содержит ряд вышитых на ткани электродов, на которые с помощью специальной технологии (Drop Coating Process) наносится смесь выбранного полимера (чувствительного к тому или иному газу) и нанокompозитов SWNT-COOH. Проводящие нити (Conductive Threads) и кнопки (Snap Fasteners) используются для обеспечения контактов сенсора с внешними цепями. При появлении молекул детектируемого газа за счет изменения свойств полимера меняется сопротивление сенсора. Это является информативным признаком для идентификации опасности.

В более широком смысле в сенсорную подсистему могут быть включены разнообразные устройства для обнаружения химических, биологических, радиоактивных и взрывчатых (Chemical, Biological, Radioactive, Nuclear, Explosive, или CBRNE) веществ [28].

- *Сенсоры для распознавания окружения.* Этот класс сенсоров используется для распознавания объектов, которые окружают пользователя. Здесь могут применяться металлооксидные полупроводники (Complementary Metal-Oxide Semiconductors, или CMOS), приборы с зарядовой связью (Charge

Coupled Devices, или CCD) и инфракрасные камеры. Кроме того, если к объектам, находящимся в окружении пользователя, прикреплены метки радиочастотной идентификации (Radio Frequency Identification, или RFID) и ближнего поля (Near-Field Communication, или NFC), то они могут считываться с помощью встроенного в интеллектуальную одежду считывающего устройства [29].

Подсистема исполнительных элементов

Исполнительные элементы дают возможность пользователям интеллектуальной одежды и различным компонентам соответствующей информационной системы выполнять определенные действия с предметами этой одежды либо с другими объектами. Применительно к интеллектуальной одежде в число исполнительных элементов принято включать как собственно устройства для выполнения действий, так и средства отображения информации, «помогающие» пользователю перейти к тем или иным действиям. Ниже дается краткая характеристика некоторых значимых групп таких элементов.

- *Визуальные индикаторы.* Данные устройства отображают информацию с помо-

щью света и изображений, полученных за счет светодиодов, оптоволокон или с использованием дисплеев, например ЖК-дисплея или дисплея на основе электронных чернил. Здесь в качестве примера можно привести гибкий дисплей, выполненный непосредственно в ткани с включением в ее состав оптоволокон (рисунок 8, опубликованный в работе [30]). Этот дисплей разработки компании France Telecom R&D обеспечивает воспроизведение статических изображений либо анимированной графики.

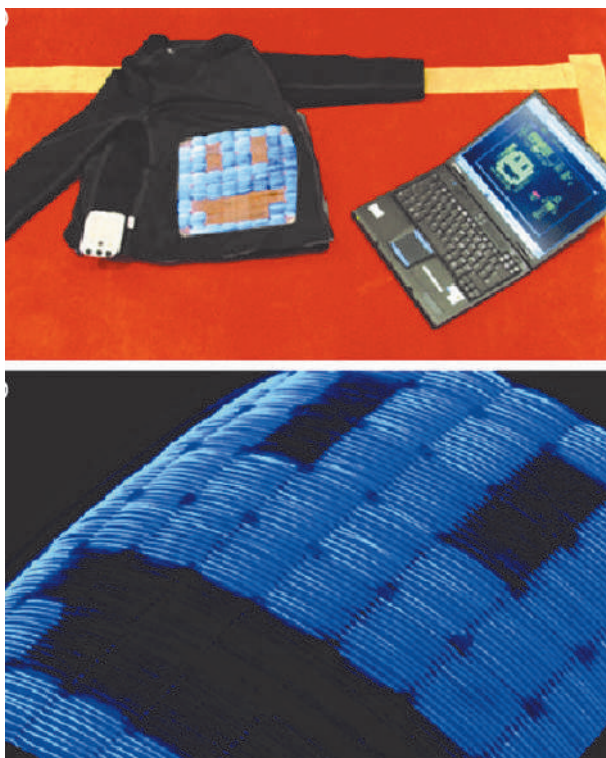


Рисунок 8. Гибкий тканевый дисплей с использованием оптоволокон разработки компании France Telecom R&D

Для использования оптоволокон в дисплее его подвергают обработке (механической, химической или с помощью лазера) с тем, чтобы создать неоднородности и обеспечить «утечки» света в различных точках этого волокна. Таким путем формируется гибкий светящийся экран.

- *Устройства генерации, передачи и преобразования звука.* Эти устройства излучают звук и голос через зуммеры, динамики, наушники или синтезаторы речи. Многие из них реализуются на тканевой основе [31].

Представляют также интерес элементы интеллектуальной одежды, которые реаги-

руют на звуковые сигналы, преобразуя их, например, в вибрации.

Такая разработка выполнена, в частности, фирмой CuteCircuit совместно с Молодежным симфоническим оркестром Гамбурга (Германия). Предложенный вариант блузы содержит 30 микро-преобразователей звука в вибрации (рисунок 9, фотография с сайта <https://inhabitat.com>).

По утверждениям авторов, подобная интеллектуальная одежда способна создать у слушателей музыки яркие и необычные ощущения.



Рисунок 9. Интеллектуальная одежда с преобразователями «музыка — вибрации»

- *Преобразователи электроэнергии в перемещения и вибрации, а также в нагрев и охлаждение.* Для целей получения перемещений или вибраций чаще всего используют встроенные в одежду электродвигатели, вибрационные двигатели, соленоиды или электромагнитные клапаны в микро-исполнении [32].

Для обеспечения функций регулирования температуры могут применяться резистивные нагреватели [33]. При этом тепло, выделяемое на резистивных элементах, можно сделать зависимым от внешней температуры, основываясь на информации об этом параметре, которую выдают соответствующие компоненты блока сенсоров.

Перечисленные здесь группы исполнительных элементов далеко не исчерпывают всего разнообразия таких устройств в составе АО интеллектуальной одежды. Тем не менее, они дают представление о подходах, которые применяются в указанной области.

Вывод

По замыслу авторов, данная статья открывает цикл публикаций, содержащих аналитические обзоры существующих тенденций в формировании аппаратного и программного обеспечения сложных информационных систем, включающих предметы интеллектуальной одежды.

Здесь рассмотрены особенности построения АО для двух значимых подсистем: сенсоров и исполнительных элементов. Анализ показал, что большая часть отмеченных компонентов имеет варианты исполнения, реализованные непосредственно на тканевой основе. Этот факт означает, что прогресс в сфере разработки интеллектуальной одежды во многом связан с успешностью создания новых материалов, относящихся к «умной ткани», или «электронной ткани».

Список литературы

1. Wu Y., Chen R., Wang J., Sun X., She M. Intelligent Clothing for Automated Recognition of Human Physical Activities in Free-Living Environment // *The Journal of the Textile Institute*. 2012. Vol. 103. No. 8. P. 806–816.
2. Ramasamy K.M. Smart and Intelligent Textile // *Proceedings of International Seminar on Smart Textile in Modern Era – SMARTEX FASHION'18*. Tamil Nadu, India: SHANLAX Publ., 2018. 4 p.
3. Fernández-Caramés T.M., Fraga-Lamas P. A Review on Human-Centered IoT-Connected Smart Labels for the Industry 4.0 // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 25939–25957.
4. Haghi M., Thurow K., Stoll R. Wearable Devices in Medical Internet-of-Things: Scientific Research and Commercially Available Devices // *Health Inf. Res.* 2017. Vol. 23. P. 4–15.
5. Bhömer M., Tomico O., Hummels C. Smart Textile Services to Support Rehabilitation // *Proceedings of the Nordic Design Research Conference (NORDES 2013)*. Copenhagen, Denmark: The Royal Danish Academy of Fine Arts, 2013. Vol. 9. P. 12.
6. Bonfiglio A., Curone D., Secco E.L., Magenes G., Tognetti A. Emergency and Work // *Wearable Monitoring Systems*. Springer Science & Business Media, 2011. P. 205–219.
7. European Commission. Smart Wearables: Reflection and Orientation Paper:

С другой стороны, все подсистемы, поддерживающие выполнение интеллектуальной одеждой требуемых функций, так или иначе участвуют в процессах получения и обработки информации. По этой причине АО должно предусматривать достижение необходимых показателей при совместной работе с программным обеспечением [34, 35].

Эти и других вопросы должны быть рассмотрены в последующих публикациях цикла.

Авторы также планируют провести исследование возможностей интеллектуальной одежды производственного назначения с точки зрения ее влияния на безопасность труда и повышение надежности человека – оператора. Для этого предполагается использование оригинальных модификаций методик расчета указанной надежности [36, 37].

Technical Report. Brussels, Belgium: European Commission, 2016. 31 p.

8. Mattana G. Realization and Characterization of Organic Electronic Devices for E-Textiles Applications: Ph.D. Thesis. Cagliari, Italy: University of Cagliari, 2011. 93 p.
9. Fernández-Caramés T.M., Fraga-Lamas P. Towards the Internet-of Smart-Clothing: A Review on IoT Wearables and Garments for Creating Intelligent Connected E-Textiles // *Electronics*. 2018. Vol. 7. No. 405. 36 p.
10. Stoppa M., Chiolerio A. Wearable Electronics and Smart Textile: A Critical Review // *Sensors*. 2014. Vol. 14. P. 11957–11992.
11. Smart Clothes and Wearable Technology (J. McCann, D. Bryson - Eds.) // Sawston/Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2009. 484 p.
12. Wang Z., Yang Z., Dong T. A Review of Wearable Technologies for Elderly Care that Can Accurately Track Indoor Position, Recognize Physical Activities and Monitor Vital Signs in Real Time // *Sensors*. 2017. Vol. 17. No. 341. 36 p.
13. Mohammad T. Using Ultrasonic and Infrared Sensors for Distance Measurement // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009. Vol. 3. P. 273–278.
14. Lugoda P., Hughes-Riley T., Morris R., Dias T. A Wearable Textile Thermograph // *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 2369. 22 p.

15. Liu Y., Wang H., Zhao W., Zhang M., Qin H., Xie Y. Flexible, Stretchable Sensors for Wearable Health Monitoring: Sensing Mechanisms, Materials, Fabrication Strategies and Features // *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 645. 35 p.
16. Andreoni G., Standoli C.E., Perego P. Defining Requirements and Related Methods for Designing Sensorized Garment Garments // *Sensors*. 2016. Vol. 16. No. 769. 16 p.
17. Tao X., Huang T.-H., Shen C.-L., Ko Y.-C., Jou J. G.-T., Koncar V. Bluetooth Low Energy-Based Washable Wearable Activity Motion and Electrocardiogram Textronic Monitoring and Communicating System // *Advanced Materials Technologies*. 2018. Vol. 3. Publ. 1700309.
18. Hatamie A., Angizi Sh., Kumar S., Pandey Ch.M., Simchi A., Willander M., Malhotra B.D. Review-Textile Based Chemical and Physical Sensors for Healthcare Monitoring // *Journal of the Electrochemical Society*. 2020. Vol. 167. Publ. 037546.
19. He S., Chan S.H.G. Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 18. P. 466-490.
20. Park J.J., Yang L.T., Lee C. Future Information Technology // 6th International Conference on Future Information Technology, FutureTech 2011: Proceedings. New York: Springer, 2011. P. 89-90.
21. Gu Y., Lo A., Niemegeers I. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2009. Vol. 11. P. 13-32.
22. Ureña J., Gualda D., Hernández A., García E., Villadangos J.M., Pérez M.C., García J.C., García J.J., Jiménez A. Ultrasonic Local Positioning System for Mobile Robot Navigation: From Low to High Level Processing // *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. Curran Associates, Inc., 2015. P. 3440-3445.
23. Osman M.A.R., Rahim M.K.A., Azfar M., Samsuri N.A., Zubir F., Kamardin K. Design, Implementation and Performance of Ultra-Wideband Textile Antenna // *Progress in Electromagnetics Research*. 2011. Vol. 27. P. 307–325.
24. Nawrat A., Jędrasiak K., Daniec K., Koterak R. Inertial Navigation Systems and Its Practical Applications // *New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems*. London: InTech, 2012.
25. Büscher G.H., Kôiva R., Schürmann C., Haschke R., Ritter H.J. Flexible and Stretchable Fabric-Based Tactile Sensor // *Robotics and Autonomous Systems*. 2015. Vol. 63. P. 244–252.
26. Ferri J., Fuster C.P., Llinares L.R., Moreno J., Garcia-Breijo E. Integration of a 2D Touch Sensor with an Electroluminescent Display by Using a Screen-Printing Technology on Textile Substrate // *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 3313. 13 p.
27. Seesaard T., Lorwongtragool P., Kerdcharoen T. Development of Fabric-Based Chemical Gas Sensors for Use as Wearable Electronic Nose // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 1885–1892.
28. Castano L.M., Flatau A.B. Smart Fabric Sensors and E-Textile Technologies: A Review // *Smart Materials and Structures*. 2014. Vol. 23. 27 p.
29. Kamišalić A., Fister I., Turkanović M., Karakatić S. Sensors and Functionalities of Non-Invasive Wrist-Wearable Devices: A Review // *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 1714. 33 p.
30. Cochrane C., Meunier L., Kelly F.M., Koncar V. Flexible Displays for Smart Clothing: Part I — Overview // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. 2011. Vol. 36. P. 422–428.
31. Li Y., Torah R., Wei Y., Grabham N., Tudor J. Dispenser-Printed Sound-Emitting Fabrics for Applications in the Creative Fashion and Smart Architecture Industry // *Journal of the Textile Institute*. 2018. Vol. 110. No. 1. P. 1-9.
32. *Smart Textiles: Fundamentals, Design, and Interaction* (S. Schneegass, O. Amft — Eds.). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2017. 405 p.
33. Wang F., Gao C., Kuklane K. A Review of Technology of Personal Heating Garments // *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*. 2010. Vol. 16. No. 3. P. 387–404.
34. Самарин А. Электроника, встроенная в одежду, — технологии и перспективы // *Новые технологии*. 2007. № 4. С. 221–228.
35. Самарин А. Электроника, встроенная в одежду, — технологии и перспективы (окончание) // *Новые технологии*. 2007. № 5. С. 146–152.

36. Ахмеджанов Ф.М., Крымский В.Г. Интервально-вероятностный алгоритм оценки человеческой надежности: новая модификация методики SPAR-H // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т. 13. № 4. С. 81–90.

37. Ахмеджанов Ф.М., Крымский В.Г. Алгоритм оценки надежности человека-оператора на основе модифицированной методики HEART // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15. № 1. С. 60–69.

References

1. Wu Y., Chen R., Wang J., Sun X., She M. Intelligent Clothing for Automated Recognition of Human Physical Activities in Free-Living Environment. *The Journal of the Textile Institute*, 2012, Vol. 103, No. 8, pp. 806–816.
2. Ramasamy K.M. Smart and Intelligent Textile. *Proceedings of International Seminar on Smart Textile in Modern Era — SMARTEX FASHION'18*. Tamil Nadu, India: SHANLAX Publ., 2018. 4 p.
3. Fernández-Caramés T.M., Fraga-Lamas P. A Review on Human-Centered IoT-Connected Smart Labels for the Industry 4.0. *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, pp. 25939–25957.
4. Haghi M., Thurow K., Stoll R. Wearable Devices in Medical Internet-of-Things: Scientific Research and Commercially Available Devices. *Health Inf. Res.*, 2017, Vol. 23, pp. 4–15.
5. Bhömer M., Tomico O., Hummels C. Smart Textile Services to Support Rehabilitation. *Proceedings of the Nordic Design Research Conference (NORDES 2013)*. Copenhagen, Denmark: The Royal Danish Academy of Fine Arts, 2013. Vol. 9. P. 12.
6. Bonfiglio A., Curone D., Secco E.L., Magenes G., Tognetti A. *Emergency and Work. Wearable Monitoring Systems*. Springer Science & Business Media, 2011, pp. 205–219.
7. European Commission. *Smart Wearables: Reflection and Orientation Paper: Technical Report*. Brussels, Belgium, European Commission, 2016. 31 p.
8. Mattana G. *Realization and Characterization of Organic Electronic Devices for E-textiles Applications: Ph.D. Thesis*.

Cagliari, Italy, University of Cagliari, 2011. 93 p.

9. Fernández-Caramés T.M., Fraga-Lamas P. Towards the Internet-of Smart-Clothing: A Review on IoT Wearables and Garments for Creating Intelligent Connected E-Textiles. *Electronics*, 2018, Vol. 7, No. 405, 36 p.

10. Stoppa M., Chiolerio A. Wearable Electronics and Smart Textile: A Critical Review. *Sensors*, 2014, Vol. 14, pp. 11957–11992.

11. *Smart Clothes and Wearable Technology* (J. McCann, D. Bryson - Eds.). Sawston/Cambridge, UK, Woodhead Publishing, 2009. 484 p.

12. Wang Z., Yang Z., Dong T. A Review of Wearable Technologies for Elderly Care that Can Accurately Track Indoor Position, Recognize Physical Activities and Monitor Vital Signs in Real Time. *Sensors*, 2017, Vol. 17, No. 341, 36 p.

13. Mohammad T. Using Ultrasonic and Infrared Sensors for Distance Measurement. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, Vol. 3, pp. 273–278.

14. Lugoda P., Hughes-Riley T., Morris R., Dias T. A Wearable Textile Thermograph. *Sensors*, 2018, Vol. 18, No. 2369, 22 p.

15. Liu Y., Wang H., Zhao W., Zhang M., Qin H., Xie Y. Flexible, Stretchable Sensors for Wearable Health Monitoring: Sensing Mechanisms, Materials, Fabrication Strategies and Features. *Sensors*, 2018, Vol. 18, No. 645, 35 p.

16. Andreoni G., Standoli C.E., Perego P. Defining Requirements and Related Methods for Designing Sensorized Garment Garments. *Sensors*, 2016, Vol. 16, No. 769, 16 p.

17. Tao X., Huang T.-H., Shen C.-L., Ko Y.-C., Jou J. G.-T., Koncar V. Bluetooth Low Energy-Based Washable Wearable Activity Motion and Electrocardiogram Textronic Monitoring and Communicating System. *Advanced Materials Technologies*, 2018, Vol. 3, Publ. 1700309.

18. Hatamie A., Angizi Sh., Kumar S., Pandey Ch.M., Simchi A., Willander M., Malhotra B.D. Review-Textile Based Chemical and Physical Sensors for Healthcare Monitoring. *Journal of the Electrochemical Society*, 2020, Vol. 167, Publ. 037546.

19. He S., Chan S.H.G. Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, Vol. 18, pp. 466–490.
20. Park J.J., Yang L.T., Lee C. Future Information Technology. *6th International Conference on Future Information Technology, FutureTech 2011: Proceedings*. New York, Springer, 2011, pp. 89–90.
21. Gu Y., Lo A., Niemegeers I. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, Vol. 11, pp. 13–32.
22. Ureña J., Gualda D., Hernández A., García E., Villadangos J.M., Pérez M.C., García J.C., García J.J., Jiménez A. Ultrasonic Local Positioning System for Mobile Robot Navigation: From Low to High Level Processing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. Curran Associates, Inc., 2015, pp. 3440–3445.
23. Osman M.A.R., Rahim M.K.A., Azfar M., Samsuri N.A., Zubir F., Kamardin K. Design, Implementation and Performance of Ultra-Wideband Textile Antenna. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, Vol. 27, pp. 307–325.
24. Nawrat A., Jędrasiak K., Daniec K., Koteras R. Inertial Navigation Systems and Its Practical Applications. *New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems*. London, InTech, 2012.
25. Büscher G.H., Kõiva R., Schürmann C., Haschke R., Ritter H.J. Flexible and Stretchable Fabric-Based Tactile Sensor. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, Vol. 63, pp. 244–252.
26. Ferri J., Fuster C.P., Llinares L.R., Moreno J., Garcia-Breijo E. Integration of a 2D Touch Sensor with an Electroluminescent Display by Using a Screen-Printing Technology on Textile Substrate. *Sensors*, 2018, Vol. 18, No. 3313, 13 p.
27. Seesaard T., Lorwongtragool P., Kerdcharoen T. Development of Fabric-Based Chemical Gas Sensors for Use as Wearable Electronic Nose. *Sensors*, 2015, Vol. 15, pp. 1885–1892.
28. Castano L.M., Flatau A.B. Smart Fabric Sensors and E-Textile Technologies: A Review. *Smart Materials and Structures*, 2014, Vol. 23, 27 p.
29. Kamišalić A., Fister I., Turkanović M., Karakatić S. Sensors and Functionalities of Non-Invasive Wrist-Wearable Devices: A Review. *Sensors*, 2018, Vol. 18, No. 1714, 33 p.
30. Cochrane C., Meunier L., Kelly F.M., Koncar V. Flexible Displays for Smart Clothing: Part I — Overview. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 2011, Vol. 36, pp. 422–428.
31. Li Y., Torah R., Wei Y., Grabham N., Tudor J. Dispenser-Printed Sound-Emitting Fabrics for Applications in the Creative Fashion and Smart Architecture Industry. *Journal of the Textile Institute*, 2018, Vol. 110, No. 1, pp. 1–9.
32. *Smart Textiles: Fundamentals, Design, and Interaction* (S. Schneegass, O. Amft — Eds.). Berlin/Heidelberg, Germany, Springer, 2017. 405 p.
33. Wang F., Gao C., Kuklane K. A Review of Technology of Personal Heating Garments. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, 2010, Vol. 16, No. 3, pp. 387–404.
34. Samarin A. Elektronika, vstroennaya v odezhdu, – tekhnologii i perspektivy [Electronics Built into Clothes – Technologies and Prospects]. *Novye tekhnologii – New Technologies*, 2007, No. 4, pp. 221–228. [in Russian].
35. Samarin A. Elektronika, vstroennaya v odezhdu, — tekhnologii i perspektivy (okonchanie) [Electronics Built into Clothes — Technologies and Prospects (Continuation)]. *Novye tekhnologii — New Technologies*, 2007, No. 5, pp. 146–152. [in Russian].
36. Akhmedzhanov F.M., Krymskii V.G. Interval'no-veroyatnostnyi algoritm otsenki chelovecheskoi nadezhnosti: novaya modifikatsiya metodiki SPAR-H [An Interval-Probabilistic Algorithm for Assessing Human Reliability: a New Modification of Spar-H Methodology]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksty i sistemy – Electrical and Data Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 4, pp. 81–90. [in Russian].
37. Akhmedzhanov F.M., Krymskii V.G. Algoritm otsenki nadezhnosti cheloveka-operatora na osnove modifitsirovannoi metodiki HEART [Heart Algorithm for Assessment of Human Operator Reliability Based on Modified Heart Methodology]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksty i sistemy — Electrical and Data Facilities and Systems*, 2019, Vol. 15, No. 1, pp. 60–69. [in Russian].



Муравьева Е. А.
Muraveva E. A.

*доктор технических наук,
профессор, заведующая кафедрой
«Автоматизированные технологические
и информационные системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет, филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация*



Квиринг М. Д.
Kviring M. D.

*студент кафедры «Автоматизированные
технологические и информационные
системы», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация*

УДК 004.896

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-63-69

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

На сегодняшний день на многих предприятиях одной из стадий производства является нагрев жидкости. И для достижения необходимой температуры жидкости чаще всего используются пластинчатые теплообменники благодаря своей высокой теплопередаче, надежности, меньшему объему по сравнению с другими аппаратами. Но могут возникнуть проблемы, связанные с неверной температурой жидкости на выходе из-за возникающих внешних воздействий на объект.

И для поддержания необходимой температуры жидкости без ошибок в системе в теплообменниках предлагается использование вместо ПИД-регуляторов — нечеткие регуляторы, которые позволяют создать регуляторы, способные в большей степени компенсировать возникающие возмущения, и получить более точный результат в условиях неопределенности. Данные нечеткие регуляторы способны повысить качество производства, сократить время нагрева воды, учитывая внешние воздействия и взаимные влияния, и адаптируясь к ним, что приводит к стабильному качеству производимой предприятием продукции.

В данной статье описана разработка адаптивного управления системой взаимосвязанных пластинчатых теплообменников на базе нечетких регуляторов. Представлена технологическая схема работы теплообменных аппаратов и описана их взаимосвязь. Также был реализован способ расчета температуры на выходе в зависимости от заданных входных параметров в теоретической форме, представленной формулами, и в практической форме в виде собранной схемы в среде Matlab Simulink.

В среде Matlab проведена разработка каждого fuzzy-контроллера, и для каждого из них составлены правила управления с учетом достижения поставленной задачи нагрева жидкости до необходимой температуры.

Была разработана схема адаптивного управления пластинчатыми теплообменниками и проведены исследования работы составленной модели в среде Matlab Simulink. Представлены графики зависимости выходной температуры от входной, а также графики термов входных параметров и выходных: степеней открытия и закрытия клапанов, частота преобразователя. Обработаны результаты проведенной работы.

Ключевые слова: теплообменник, нечеткий регулятор, параметр, температура, клапан, давление, управление, расход, частотный преобразователь, аппарат.

ENGINEERING OF ADAPTIVE FUZZY CONTROL IN MATLAB SIMULINK

Today, at many enterprises, one of the stages of production is the heating of the liquid. And to achieve the required liquid temperature, plate heat exchangers are most often used, due to their high heat transfer, reliability, and smaller volume compared to other devices. But there may be problems associated with the wrong temperature of the liquid at the outlet due to external influences on the object.

And to maintain the required temperature of the liquid without error in the system heat exchangers, the use instead of PID controllers — fuzzy controllers, which allow to create controllers capable of largely compensate for any disturbance, and to obtain a more accurate result in uncertainty. These fuzzy controllers can improve the quality of production, reduce the time of water heating, taking into account external influences and mutual influences, and adapting to them, which leads to a stable quality of products produced by the enterprise.

This article describes the development of adaptive control of a system of interconnected plate heat exchangers based on fuzzy controllers. The technological scheme of heat exchangers operation is presented and their interrelation is described. We also implemented a method for calculating the output temperature depending on the specified input parameters in a theoretical form, represented by formulas, and in a practical form as an assembled circuit in the Matlab Simulink environment.

In the Matlab environment, each fuzzy controller was developed, and control rules were compiled for each of them, taking into account the achievement of the task of heating the liquid to the required temperature.

A scheme for adaptive control of plate heat exchangers was developed and the work of the compiled model was studied in the Matlab Simulink environment. Graphs of dependencies of the output temperature from the input, as well as graphs of terms of the input parameters and output: the degrees of opening and closing valves, frequency Converter. The results of the work were processed.

Key words: heat exchanger, fuzzy controller, parameter, temperature, valve, pressure, control, consumption, frequency converter, apparatus.

Введение

В настоящее время большинство сфер промышленности, таких как нефтеперерабатывающая, химическая, нефтехимическая, энергетическая, используют в своих производствах теплообменные аппараты, так как нагревание жидкости до необходимой температуры — одна из важнейших стадий на производстве. Самыми распространёнными являются пластинчатые теплообменники благодаря своей высокой теплопередаче, надёжности, меньшему объёму по сравнению с другими аппаратами.

В подавляющем большинстве случаев технологический процесс нагрева жидкости в теплообменниках осуществляется под управлением классических ПИД-регуляторов, которые не всегда способны правильно оценить ситуацию и учесть в полной мере внешнее воздействие на систему и взаимное влияние параметров. Чаще всего, это происходит из-за того, что ПИД-регулятор не всегда спо-

обен компенсировать возникающие возмущения, следствием чего являются нестабильность объекта управления (системы трех теплообменных аппаратов) и отклонение температуры воды от заданной на выходе из системы теплообменников [1, 2]. Данная ситуация может привести к возникновению брака на производстве в связи с недостаточно нагретой или, напротив, перегретой водой.

Описание технологического процесса

Объектом управления адаптивного нечеткого регулятора (НР) является система из трех пластинчатых теплообменников. В качестве жидкости принята вода. На ее температуру в теплообменнике влияют такие параметры, как давление поступающего пара (теплоноситель), расход холодной воды, подаваемой на вход теплообменника, и расход выходящей нагретой воды. Значения параметров каждого из трех теплообменников должны находиться в следующих диапазонах: давление поступающего пара

P_n (200–300) кПа, расход холодной воды F_x (4,0–7,5) т/ч и расход выходящей нагретой воды F_2 (4,0–7,5) т/ч. Указанные параметры регулируются клапанами пара V_n и нагретой воды V_2 , а также частотным преобразователем $Ч_x$, служащим для подачи холодной воды в теплообменный аппарат, которые можно регулировать в диапазоне (0–100) %. Температура воды, которую необходимо поддерживать, составляет 70 ± 5 °С. Параметры идентичны для всех трех теплообменников.

В ситуации, когда один теплообменник не способен нагреть воду до необходимой тем-

пературы, вода поступает на несколько теплообменников сразу под управлением адаптивной нечеткой системы, благодаря чему возможно достижение требуемой тепловой мощности за меньшее время, что позволит сократить потребление энергоресурсов за счет управления каждым теплообменником в составе общей системы [3].

Была разработана технологическая схема взаимодействия теплообменных аппаратов (рисунок 1).

Из общей трубы, которая разветвляется далее на три другие, поступающие на каж-

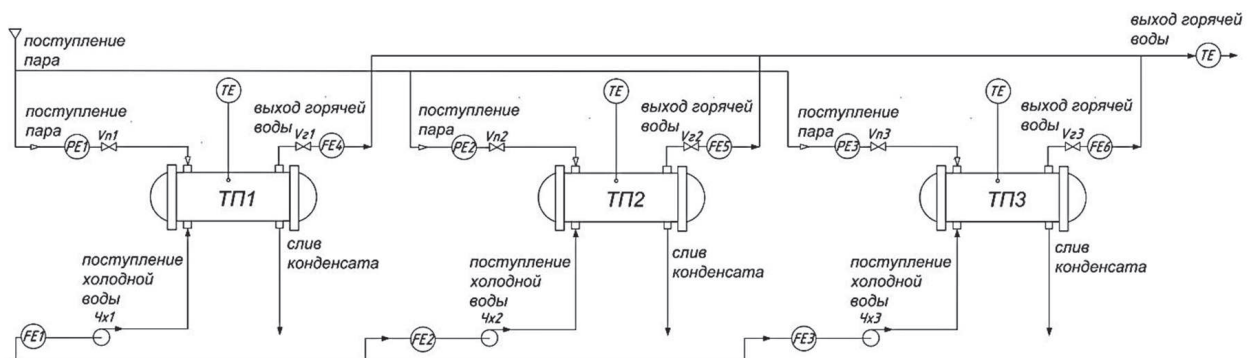


Рисунок 1. Технологическая схема работы системы пластинчатых теплообменников

дый теплообменник, подается пар. Из другой общей трубы, также разветвляющейся на три теплообменника, подается насосами холодная вода в каждый теплообменник. Также из каждого аппарата по трубе выходит нагретая жидкость, которая собирается в единую трубу, по которой горячая вода поступает на технологические нужды в следующий цех. Температура измеряется датчиком, установленным на трубе вывода горячей жидкости. Процесс регулирования температуры в трех теплообменниках происходит с помощью четырех нечетких регуляторов $HP1$, $HP2$, $HP3$, $HP4$.

$HP1$ служит для анализа сложившейся в системе теплообменников ситуации в зависимости от подачи давления пара, холодной воды и выхода нагретой жидкости. $HP2$ – $HP4$ служат для регулирования входных параметров, поданных на вход для достижения оптимальной температуры на выходе 70 ± 5 °С.

Разработка базы правил управления

Для реализации нечетких регуляторов представлены правила управления для каждого нечеткого регулятора, на основе кото-

рых будут производиться анализ и выдаваться значения выходных параметров [4]. В качестве примера представлено правило управления для $HP1$. Остальные правила составляются аналогичным способом.

Правило управления $HP1$

Если давление пара P_n высокое и предполагается повышение интенсивности подачи пара в диапазоне UP_n3 , и расход поступающей жидкости F_x высокий, и предполагается повышение интенсивности подачи холодной воды в диапазоне UF_x3 , и расход нагретой жидкости F_2 низкий, и предполагается понижение интенсивности выхода горячей воды в диапазоне UF_21 , и температура T высокая, то включен только $HP2$, который управляет теплообменником $ТП1$.

«ЕСЛИ $P_n = P_n3$ И $UP_n = UP_n3$ И $F_x = F_x3$ И $UF_x = UF_x3$ И $F_2 = F_21$ И $UF_2 = UF_21$ И $T = T3$, ТО $HP = HP2$ ».

Разработка нечетких регуляторов в среде Matlab

Следующим этапом после составления базы правил является их реализация в составе нечетких регуляторов. Для проекти-

рования регуляторов *HP1-HP4* с использованием нечеткой логики в среде Matlab используем команду *fuzzy*.

Разработка адаптивной нечеткой системы управления в среде Matlab Simulink

Для реализации адаптивной нечеткой системы управления использована среда Matlab Simulink с использованием *HP fuzzy-logic controller* (нечеткий логический регулятор), спроектированных ранее.

На примере правила управления для *HP1* «ЕСЛИ $P_n = P_{n3}$ И $U_{Pn} = U_{Pn3}$ И $F_x = F_{x2}$ И $U_{F_x} = U_{F_x2}$ И $F_z = F_{z2}$ И $U_{F_z} = U_{F_z2}$ И $T = T_3$, ТО $HP = HP_2$ » и правила управления для *HP2* «ЕСЛИ $P_n = P_{n3}$ И $F_x = F_{x2}$ И $F_z = F_{z2}$ И $T = T_3$, ТО $V_n = V_{n1}$ И $Ч_x = Ч_{x2}$ И $V_z = V_{z2}$ » рассмотрена работа системы адаптивного нечеткого управления.

На первом этапе нужно задать исходные параметры: давление пара $P_n = P_{n3}$ (constant), расход пара $F_n = F_{n3}$ (constant14), расход холодной воды $F_x = F_{x2}$ (constant1), расход выхода нагретой воды $F_z = F_{z2}$ (constant2), и температуру $T = T_3$ (constant3), в блоках *Slider Gain* (ползунковый регулятор), блоках *Const* (постоянная величина) равны единице, на дисплее высвечиваются введенные значения параметров.

Площади поперечных сечений задаются в блоках *Constant*, входящие в составные блоки «Расчет U_n », «Расчет U_{F_x} », «Расчет F_z ».

Заданные значения параметров и рассчитанные значения интенсивностей приведены на рисунке 2. Все сигналы соединяются в блоке *Mux* (мультиплексор).

Далее с блока *Mux* сигналы поступают на *HP1*, который анализирует сложившуюся

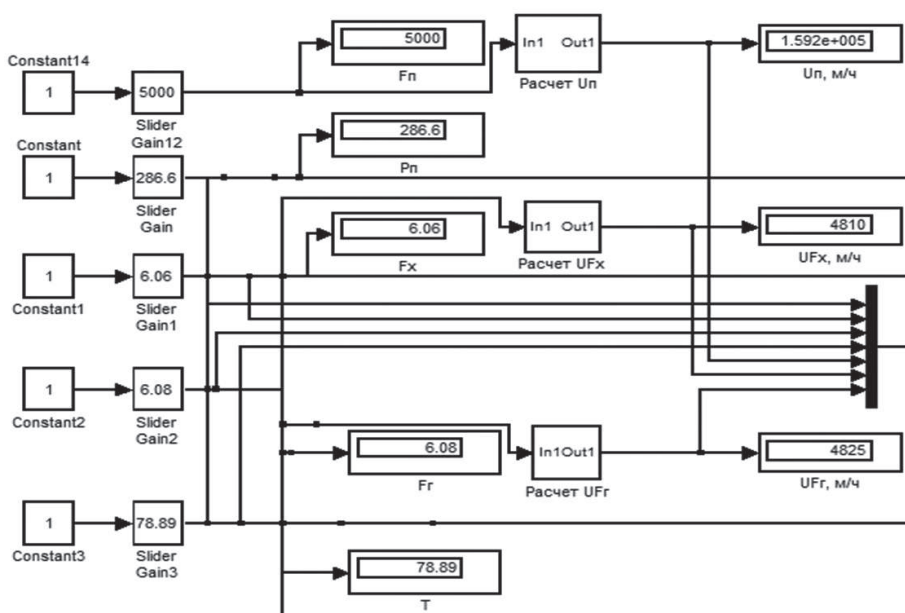


Рисунок 2. Блок задания исходных параметров

ситуацию и выбирает, сколько теплообменников необходимо включить. На его вход подаются следующие параметры: $F_n = F_{n3} = 5000$, $F_x = F_{x2} = 6.06$, $F_z = F_{z2} = 6.08$, $T = T_3 = 78.89$. На дисплее *ТП3* высветилось «1» (рисунок 3).

Это означает, что теплообменник *ТП3* включен, остальные теплообменники выключены, это соответствует правилу для *HP1*.

Следующим этапом является подача входных параметров на блок *HP2*. Они совпадают с входными значениями для *HP1*. Нечеткий регулятор определяет, каким диапазоном и

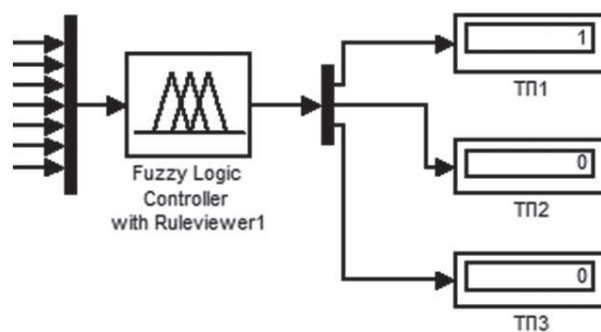


Рисунок 3. Блок вывода *HP1*

каким правилам соответствуют входные значения, и выдает показания степени открытия клапанов и частоту преобразования $Ч_x$ [5].

Значения высвечиваются на дисплеях (рисунок 4). $Vn = 42,5$ — полузакрыт, $Чх = 50$ — средняя частота, $Vz = 42,5$ — полузакрыт.

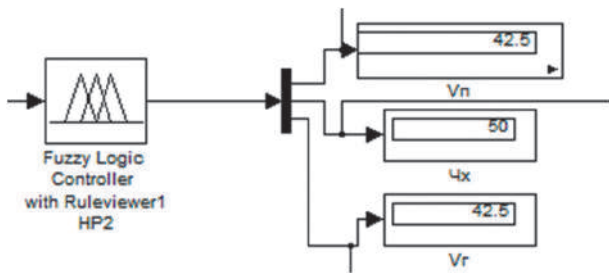


Рисунок 4. Блок вывода HP2

На основе входных и выходных параметров определяем температуру на выходе согласно следующим формулам:

$$P_{nk} = \frac{(P_{n2} - P_{n1}) * Vn}{100} + P_{n1} = \quad (1)$$

$$= (300 - 200) * 0,425 + 200 = 242,5,$$

P_{nk} — конечное давление пара;

P_{n2}, P_{n1} — конечное и начальное значения диапазона подачи давления соответственно;

Vn — степень открытия клапана пара на выходе;

$$\Delta P = \frac{P_{nk}}{P_n} = \frac{242,5}{286,6} = 0,846, \quad (2)$$

ΔP — отношение конечного давления пара к заданному.

Таким методом находят значения $\Delta Fx, \Delta Fz, \Delta Fx = 0,9488, \Delta Fz = 0,9$.

Далее находим среднее арифметическое найденных значений:

$$\begin{aligned} &Cp.арифм(\Delta P, \Delta Fz, \Delta Fx) = \\ &= \frac{\Delta P + \Delta Fz + \Delta Fx}{n} = \frac{2,695}{3} = 0,899. \end{aligned} \quad (3)$$

Для нахождения температуры умножаем найденное среднее арифметическое значение на начальную температуру. Найденное значение равно 70,9, оно входит в необходимый диапазон $[65; 75]$ °С.

$$\begin{aligned} T_{выход} &= Cp.арифм(\Delta P, \Delta Fz, \Delta Fx) * T = \quad (4) \\ &= 0,899 * 78,89 = 70,9. \end{aligned}$$

Схема для определения температуры составлена в Simulink и находится в составном блоке «Subsystem» с целью освободить пространство на основном поле схемы.

Конечная температура высвечивается на дисплее в основном окне (рисунок 5).

Результаты проведения исследования для HP1 и HP2

После сбора данных и реализации схемы адаптивного нечеткого управления в среде Matlab Simulink можно наблюдать графики правил для каждого HP [6].

Обработка результатов исследования

Для определения зависимости выходного значений температуры $T_{выход}$ от входной T произведено 9 измерений. Давление пара, расход холодной воды и расход горячей воды остаются неизменными, меняются только значения входной температуры в пределах от 72 °С до 80 °С (таблица 1).

Также на основе экспериментальных данных построен график зависимости $T_{выход}$ от T (рисунок 6). График представляет собой прямолинейную зависимость. При увеличении входной температуры пропорционально увеличивается температуры на выходе, при этом $T_{выход}$ входит в диапазон $[65; 75]$ °С. Графики зависимостей при использовании других правил для HP2, HP3, HP4 аналогичны, и также имеют прямолинейный характер.

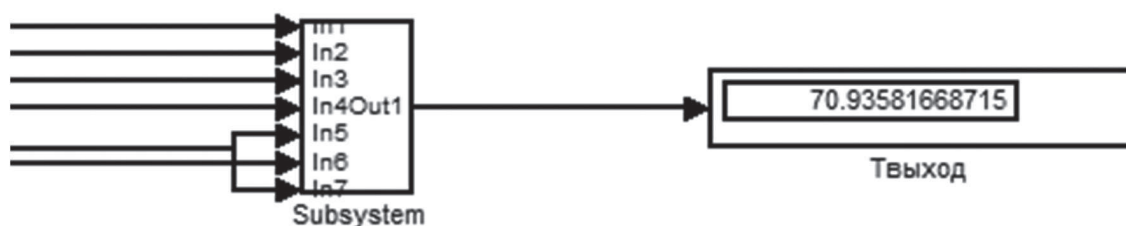
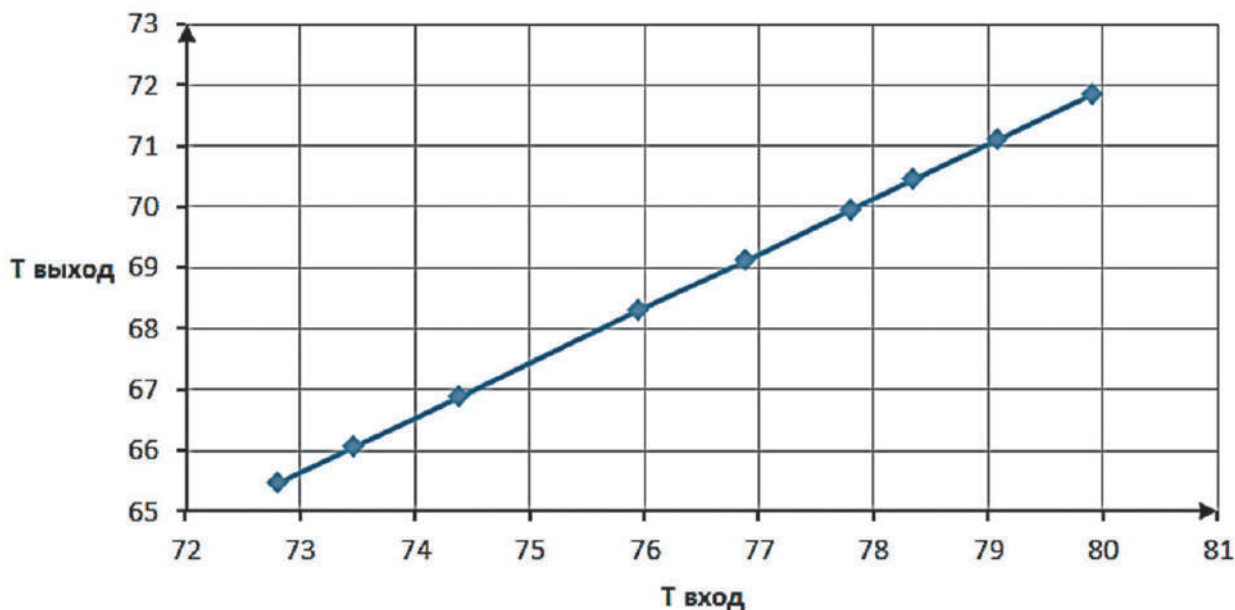


Рисунок 5. Вывод конечной температуры на дисплее

Таблица 1. Результаты изменения температуры для HP2

№ измерения	HP2	
	T	$T_{\text{выход}}$
1	72,80	65,46
2	73,46	66,05
3	74,38	66,87
4	75,94	68,29
5	76,87	69,10
6	77,79	69,94
7	78,34	70,44
8	79,08	71,10
9	79,90	71,84

Рисунок 6. График зависимости $T_{\text{выход}}$ от T

Вывод

В ходе исследования была разработана технологическая схема системы адаптивного управления теплообменными аппаратами на базе нечетких регуляторов, с помощью которых произведено регулирование температуры нагреваемой жидкости. Также были созданы базы правил управления. Проведено проектирование системы адаптивного нечеткого управления теплообменными аппаратами в среде Matlab Simulink, работа которой

показала, что полученные значения температуры удовлетворяют заданным.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная адаптивная нечеткая система управления системой из трех теплообменных аппаратов является эффективной для производств, использующих теплообменники, так как происходит сокращение потребления энергоресурсов за счет управления каждым теплообменником в составе общей системы.

Список используемых источников

1. Соловьев К.А., Муравьева Е.А., Султанов Р.Г. Адаптация нечеткого регулятора // Нефтегазовое дело. 2014. № 3. С. 123–128.
2. Прядко П.В., Муравьева Е.А. Система управления сушильной печью для цеолитсодержащих катализаторов на основе 5-мерного нечеткого регулятора с интервальной неопределенностью // 63-я научно-техниче-

ская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. 2012. С. 358.

3. Габитов Р.Ф., Каяшев А.И., Муравьева Е.А. Управление печью прокалики цеолитсодержащих катализаторов крекинга нефтепродуктов методом плавающего горизонта с использованием нейросетевой модели // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. № 12. С. 12–19.

4. Sreedharan D., Paul V., Thottungal R. Mathematical Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell and Fuzzy-Based Intelligent Controllers for Performance Enhancement // *Computers & Electrical Engineering*. July 2019. Vol. 77. С. 354–365.

5. Назаров И.С. Математическое моделирование нечеткого регулятора // *Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сб. науч. тр. V Междунар. науч. конф.* 2018. С. 113–118.

6. Мefeldова Ю.А., Моисеева Ю.Р. Применение нечеткой логики в системах управления // *Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий: сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 94–97.

References

1. Solov'ev K.A., Murav'eva E.A., Sultanov R.G. Adaptatsiya nechetkogo regul'yatora [Adaptation of a Fuzzy Controller]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2014, No. 3, pp. 123-128. [in Russian].

2. Pryadko P.V., Murav'eva E.A. Sistema upravleniya sushil'noi pech'yu dlya tseolitsoderzhashchikh katalizatorov na osnove 5-mernogo nechetkogo regul'yatora s interval'noi neopredelennost'yu [Control System of a Drying Oven for Zeolite-Containing Catalysts Based on a 5-Dimensional Fuzzy Controller with Interval Uncertainty]. *63-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh UGNTU* [63rd Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists of USPTU]. 2012, pp. 358. [in Russian].

3. Gabitov R.F., Kayashev A.I., Murav'eva E.A. Upravlenie pech'yu prokalki

tseolitsoderzhashchikh katalizatorov krekinga nefteproduktov metodom plavayushchego gorizonta s ispol'zovaniem neirosetevoi modeli [Control of the Furnace for Calcining Zeolite-Containing Catalysts for Cracking Petroleum Products by the Floating Horizon Method Using a Neural Network Model]. *Avtomatizatsiya, telemeekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti — Automation, Telemechanization and Communication in the Oil Industry*, 2010, No. 12, pp. 12–19. [in Russian].

4. Sreedharan D., Paul V., Thottungal R. Mathematical Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell and Fuzzy-Based Intelligent Controllers for Performance Enhancement. *Computers & Electrical Engineering*, July 2019, Vol. 77, pp. 354–365.

5. Nazarov I.S. Matematicheskoe modelirovanie nechetkogo regul'yatora [Mathematical Modeling of a Fuzzy Controller]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsial'noi sfere i meditsine»* [Collection of Scientific Papers of the V International Scientific Conference «Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine»]. 2018, pp. 113–118. [in Russian].

6. Mefeldova Yu.A., Moiseeva Yu.R. Primenenie nechetkoi logiki v sistemakh upravleniya [Application of Fuzzy Logic in Control Systems]. *Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: «Aktual'nye problemy i puti razvitiya energetiki, tekhniki i tekhnologii»* [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference: «Actual Problems and Ways of Development of Energy, Engineering and Technologies»]. 2018, pp. 94–97. [in Russian].



Феоктистов Е. А.
Feoktistov E. A.

*студент, ФГАОУ ВО
«Московский физико-технический
институт (национальный
исследовательский университет)»,
г. Долгопрудный, Российская Федерация*



Феоктистов Н. А.
Feoktistov N. A.

*заслуженный работник высшей
школы РФ, доктор технических наук,
профессор Московского государственного
университета дизайна и технологий,
г. Москва, Российская Федерация*

УДК 621.316

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-2-70-76

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНО-ВОДНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ СВАРКИ И ПАЙКИ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье рассмотрен вариант автоматизации управления электролизно-водного генератора (ЭВГ) по новому принципу, предложенному в авторском свидетельстве, с применением микропроцессорного блока. Это обеспечивает хранение и обработку информации с целью создания системы автоматической сварки и пайки при производстве и ремонте ювелирных и других металлических изделий. Представлены функциональная схема электронного устройства, а также электрическая схема микропроцессорной системы управления на базе микропроцессора PIC16F627 с двумя интегрирующими компараторами напряжения. За основу функционирования электролизера приняты состояния четырех датчиков: датчиков высокого и низкого давлений, температуры и уровня электролита. Предусмотрено подключение системы сбора исходных данных, обработки, вычисления и индикации расхода воды, смеси газов, кислорода и водорода и ЭВГ. Разработанный вариант системы реализован в аппарате «МЮОН-10». Предложен более компактный и упрощенный вариант электролизно-водного управления ЭВГ. Электролизер подключается к сети переменного тока через тиристорный блок, управление которым осуществляется через оптронную развязку от D-триггера. Представлен опытный образец микропроцессорного блока.

Ключевые слова: электролизно-водный генератор, автоматизация, сварка, пайка, микропроцессор, датчик, электрический ток, давление, температура, схема, модуль, электролизер, генератор кислородно-водородной смеси.

MICROPROCESSOR CONTROL OF ELECTROLYSIS-WATER GENERATOR FOR WELDING AND SOLDERING JEWEL

The article considers a variant of control automation of an electrolysis-water generator (EWG) based on a new principle proposed in the author's certificate, using a microprocessor unit. This ensures the storage and processing of information in order to create an automatic welding and soldering system for the production and repair of jewelry and other metal products. A functional diagram of an electronic device is presented, as well as an electrical diagram of a microprocessor control system based on a PIC16F627 microprocessor with two integrating voltage comparators. The operation of the electrolyzer is based on the states of four sensors: sensors of high and low

pressure, temperature and electrolyte level. The connection of a system for collecting initial data, processing, calculating and indicating the flow of water, a mixture of gases, oxygen and hydrogen, and EWG is provided. The developed version of the system is implemented in the MUON-10 device. A more compact and simplified version of the EWG electrolysis control is proposed. The electrolyzer is connected to the AC network via a thyristor unit, which is controlled via an optocoupler isolation from the D-trigger. A prototype of a microprocessor unit is presented.

Key words: electrolysis-water generator, automation, welding, soldering, microprocessor, sensor, electric current, pressure, temperature, circuit, module, electrolyzer, oxygen-hydrogen mixture generator.

В последние десятилетия большой интерес вызывают вопросы разработки и применения электролизно-водных генераторов (ЭВГ) в технологии сварки и пайки, установок, которые могут с успехом заменить традиционное газопламенное оборудование, использующее органические горючие материалы (ацетилен, пропан, бензин и др.). Такая замена обещает, во-первых, экономию материалов, цена на которые постоянно растет, во-вторых, улучшение экологической обстановки в месте проведения сварочных работ и, в-третьих, позволяет организовать технологический процесс на более высоком уровне [1].

Эффективно применение установок на основе генераторов кислородно-водородной смеси при производстве и ремонте ювелирных изделий: при ремонте цепочек с мелким звеньями, ремонте комбинированных изделий из платины, ремонте изделий без выкрепки камней (например изменение размера кольца), ремонте изделий с эмалью и в других случаях, когда требуется локальный нагрев изделия.

Достижения электронной техники позволяют создать новые принципы и аппаратуру управления и защиты ЭВГ и установок на их основе. Разработан и предложен вариант электронного устройства управления и защиты ЭВГ и бытовой установки на базе генератора, защищенного авторским свидетельством [2]. На рисунке 1 представлена функциональная схема электронного устройства управления и защиты. Устройство для газопламенной сварки и пайки содержит электронный контактор 1, выпрямительный мост 2, регулятор потребляемой мощности 3, электролизер с датчиками давления и температуры 4, предохранитель обратного удара 5,

регулятор давления газовой смеси 6, блок защиты по давлению 7, содержащий задатчик критического давления, и первую схему сравнения СС1, блок защиты по температуре, содержащий вторую схему сравнения СС2, задатчик критической температуры, транзисторный логический элемент «ИЛИ», ключ 10 для отключения электронного контактора 1. Один из газовых выходов электролизера соединен с регулятором давления 6, имеющим обратную связь с регулятором потребляемой мощности 3, а второй газовый выход через предохранитель обратного удара соединен с одним из газовых каналов горелки, при достижении определенного уровня давления, задаваемого задатчиком регулятора 6, регулятор потребляемой мощности 3 выключается, а при снижении давления ниже уровня регулятор потребляемой мощности 3 включается и через электролизер 4 протекает ток. Это позволяет поддерживать давление в системе на определенном заданном уровне. Сигнал защиты электролизера 4 при недопустимом по условиям эксплуатации давлении, вызванном, например, отказом элементов регулятора потребляемой мощности 3 или регулятора давления 6, формируется блоком защиты по давлению 7. Электрический сигнал с датчика давления поступает на вход схемы сравнения СС1 блока защиты 7 и сравнивается с электрическим сигналом задатчика критического давления КД, подаваемого на другой вход схемы сравнения СС1 блока 7. Если первый сигнал превышает второй, то на выходе блока 7 появится сигнал защиты. Сигнал защиты электролизера при недопустимой по условиям эксплуатации температуре его пластин формируется блоком температурной защиты 8. Электрический сигнал с датчика темпера-

туры, размещенного в электролизере 4, подается на вход схемы сравнения СС2 и сравнивается с электрическим сигналом датчика критической температуры ЗКТ, подаваемым на второй вход СС2 блока защиты 8. Если первый сигнал превысит по амплитуде второй, то на выходе блока 8 появится сигнал защиты. Так как выходы блоков 7, 8 имеют электрическую связь со входами транзистор-

ного логического элемента «ИЛИ» 9, то при появлении сигнала защиты на любом из выходов последнего на его входе возникает электрический сигнал, который приводит к выключению ключом 10 цепи управления контактора и запираанию электронного контактора 1, отключающего питание электролизера 4.

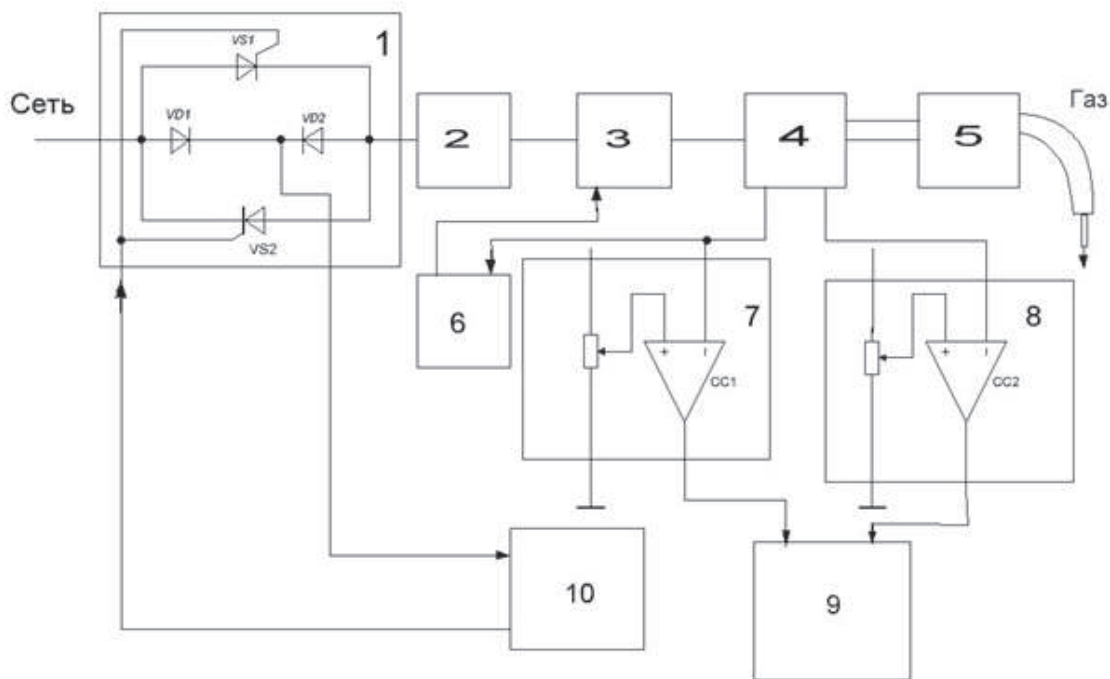


Рисунок 1. Функциональная схема защиты и релейного управления ЭВГ

На этом принципе разработаны схемы систем управления ЭВГ на электромеханических и электронных элементах различного назначения: ремонта бытовой и зубоветеринарной техники, специального назначения [3–6].

В данной статье приведены результаты разработки микропроцессорного управления

ЭВГ с целью создания аппарата малой мощности для производства и ремонта ювелирных изделий.

Блок-схема аппарата приведена на рисунке 2. Система состоит из следующих центров:

— импульсного блока питания, разработанного для данной схемы;

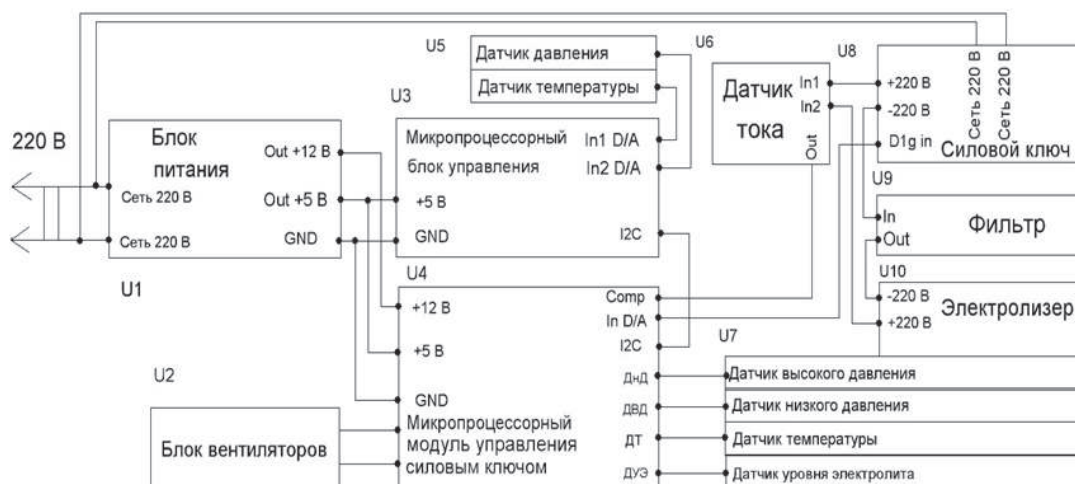


Рисунок 2. Блок-схема аппарата

- блока вентиляторов;
- датчиков (тока, давления, высокого давления, низкого давления, температур, уровня электролита);
- микропроцессорной системы управления.

Данная схема обладает следующими основными функциями:

- сбор данных с датчиков (тока, давления, высокого давления, низкого давления, температур, уровня электролита);

- звуковая и световая индикация при возникновении предупредительных и предаварийных ситуаций;

- изменение режимов проведения технологического процесса (по напряжению и току);

- выключение силового блока при возникновении предаварийных ситуаций.

Электрическая схема микропроцессорной системы управления изображена на рисунке 3.

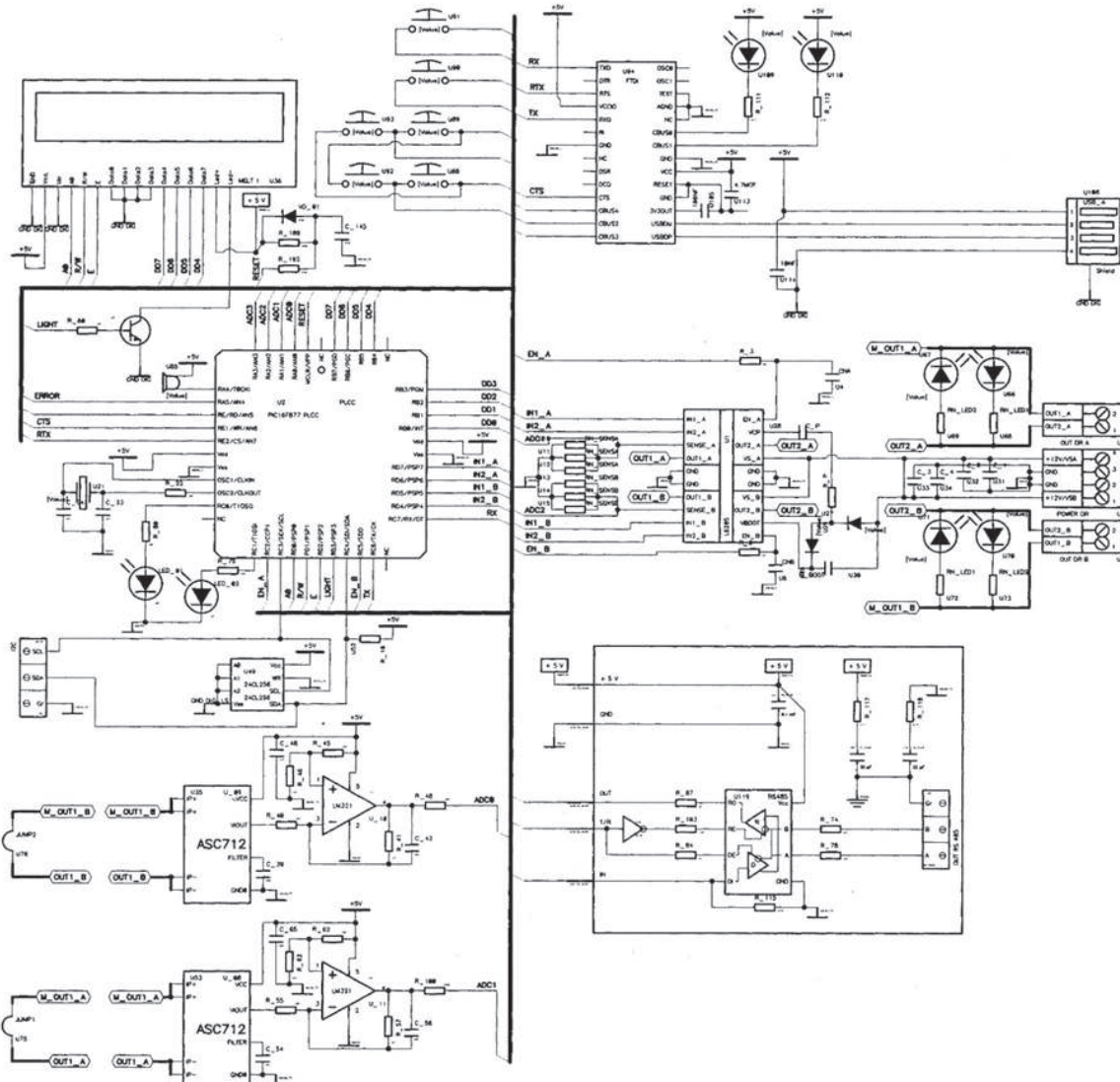


Рисунок 3. Электрическая схема микропроцессорной системы управления

Микропроцессорная система управления электролизёра выполнена на базе микропроцессора PIC16F627 с двумя интегрированными компараторами напряжения. Тактовый генератор работает на частоте 16 МГц. За основу функционирования электролизера берётся состояния четырех датчиков:

- датчик высокого давления;

- датчик низкого давления;
- датчик повышенной температуры электролизёра;
- датчик уровня электролита.

Все датчики имеют два состояния — замкнутое или разомкнутое.

По датчику высокого давления микропроцессор отключает симмистор, если давление

внутри электролизёра превышает допустимое значение. По показаниям датчика низкого давления микропроцессор определяет нижний порог величины давления при работе электролизёра, и при понижении ниже порога включает симмистор.

По показаниям датчика температуры электролизера микропроцессор включает вентилятор обдува электролизёра и запускает таймер аварийной остановки в случае, если обдув не охлаждает электролизёр в течение установленного времени (например при испорченном вентиляторе).

По датчику уровня электролита отслеживается уровень электролита. При пониженном уровне работа прекращается и подается звуковой сигнал.

Также предусмотрено подключение системы сбора исходных данных, обработки, вычисления и индикации расхода воды, смеси газов, кислорода и водорода в электролизно-водном генераторе.

Для гальванической развязки низковольтной части схемы применён оптодиод со встроенной функцией определения прохода напряжения через ноль (МОС3061), что уменьшает количество элементов в схеме. Данная функция требуется для понижения уровня электропомех. Данный симмистор в свою очередь управляет мощным симмистором (КУ132), нагрузочная способность которого составляет 50 А.

Для выпрямления тока используется диодный мост, включенный последовательно с мощным симмистором.

На проводнике, подводящем электрический ток к электролизёру, установлен датчик тока на основе эффекта Холла с гальванической развязкой. При сравнении напряжения с датчика тока и опорного напряжения с резистивного делителя микропроцессор контролирует максимально допустимый ток через электролизёр и при превышении порога останавливает работу устройства для предотвращения выхода из строя элементов схемы и самого электролизёра.

Модуль контроля электролизёра имеет цифровой вход I2C, через который можно осуществлять внешнее управление работой модуля, получать информацию о состоянии

датчиков (например изменять средний ток через электролизёр для получения требуемых параметров электролизёра). На данный вход предусмотрена установка модуля для внешнего управления. Предварительно спектр его задач может быть:

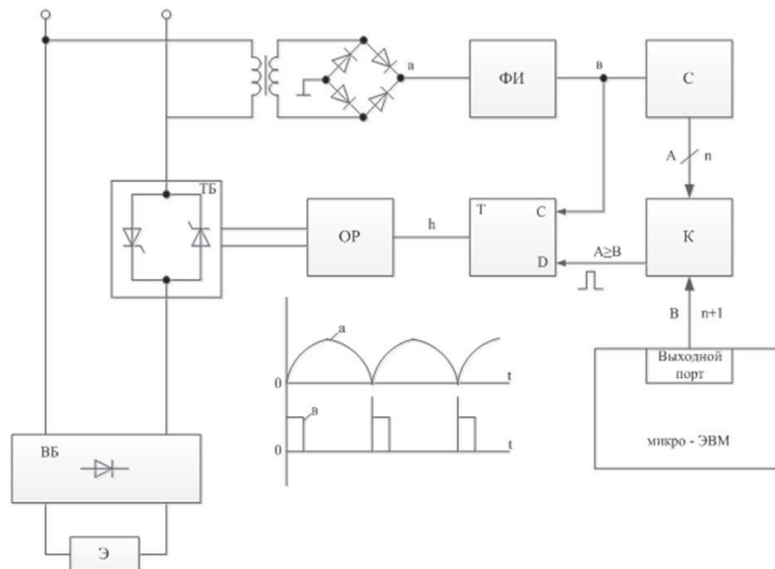
- индикация данных в цифровом виде;
- индикация режима;
- индикация событий в цифровом виде;
- изменение режимов ведения технологического процесса (напряжения, тока);
- сохранение текущих событий до сброса их оператором;
- настройка порогов срабатывания предупредительных и предаварийных ситуаций;
- архивирование данных на контроллере с отображением архива данных;
- значение тока и напряжения у электролизера;
- показания температур электролита, водорода и кислорода.

На рисунке 4 показана блок-схема ЭВГ, позволяющая с помощью микро-ЭВМ управлять средней мощностью, выделяемой в электролизере.

Электролизер подключается к сети переменного тока через тиристорную схему, управление которой осуществляется через оптронную развязку от D-триггера.

Выпрямленное напряжение (а) поступает на формирователь ФИ, с выхода которого снимаются импульсы (в), которые запоминаются с выхода компаратора К в D-триггере и прибавляют единицу к текущему содержанию счетчика С. При переполнении счетчика он начинает счет с нуля, а затем опять повторяется переполнение. Компаратор К сравнивает n-разрядное двоичное число А, поступающее со счетчика С, n+1 разрядным числом В, порта определяющим среднюю мощность нагрузки, из доступного порта микро-ЭВМ. Если $A \geq B$, на выходе компаратора К формируется логическая «1», а если $A < B$ — соответственно «0», т.е. если $A < B$, нагрузка отключается, а если $A \geq B$, нагрузка подключена к сети.

На рисунке 5 представлен блок микропроцессорной системы управления ЭВГ, разработанного на основе схемы, представленной на рисунке 3.



ТБ — тиристорный блок; ВБ — выпрямительный блок; ФИ — формирователь импульсов; С — счетчик; К — компаратор; Т — триггер; ОР — оптронная развязка

Рисунок 4. Электронное управление с помощью микро-ЭВМ

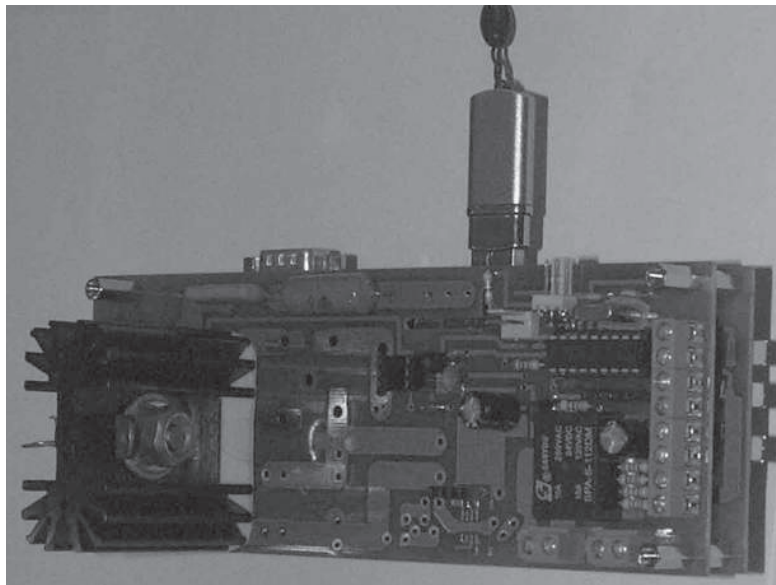


Рисунок 5. Микропроцессорный блок управления ЭВГ

Модуль внешнего управления электролизёром содержит следующие функциональные модули:

- ЖК-дисплей, на который выводится информация, необходимая пользователю для правильных настроек и мониторинга процесса работы электролизёра;
- клавиатура для изменение предварительных установок;
- порт RS-485 для управления удалёнными ведомыми модулями или подключения в качестве ведомого;
- USB-порт для ввода технологического алгоритма путем считывания с флеш-накопителя;

- порт I2C, используемый для коммуникации с силовым модулем электролизёра;
- интегрированный драйвер управления шаговым двигателем или двумя двигателями постоянного тока с возможностью отслеживания тока, протекающего через обмотки;
- два аналого-цифровых входа для снятия информации с датчиков температуры и давления и регулировки режимов работы не по крайним показаниям от датчиков давления и температуры, подключенных к силовому модулю электролизёра, а по пропорции с изменением температуры и давления в соответствии с данными, получаемыми от собственных датчиков.

Вывод

Предложен более компактный и упрощенный вариант электролизного управления ЭВГ. Электролизер подключается к сети перемен-

ного тока через тиристорный блок, управление которым осуществляется через оптронную развязку от D-триггера. Представлен опытный образец микропроцессорного блока.

Список литературы

1. Феоктистов Н.А. Научные основы создания ЭВГ для сварки и пайки // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2001. № 1. С. 60–63.

2. А.с. 1754798. Устройство автоматического управления процессом электролиза воды для получения водорода и кислорода / И.В. Варламов, Н.А. Феоктистов // Бюлл. изобр. 1992. № 30.

3. Феоктистов Н.А. Тиристорные устройства управления и защиты бытовых аппаратов и электротехнических установок. М., 1996. 222 с.

4. Варламов И.В., Феоктистов Н.А. Системы электропитания и управления электролизно-водными генераторами. М.: ИТК, 2012. 202 с.

5. Феоктистов Н.А., Варламов И.В., Феоктистов А.Н. Системы управления и автоматического регулирования режимов работы ЭВГ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 3, Т. 9. С. 31–36.

6. Сторожев В.В., Феоктистов Н.А. Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования / Под ред. проф. Н.А. Феоктистова. М.: ИТК, 2015. 412 с.

References

1. Feoktistov N.A. Nauchnye osnovy sozdaniya EVG dlya svarki i paiki [Scientific Bases of Creation of EWG for Welding and Soldering]. *Teoreticheskie i prikladnye problemy servisa* —

Theoretical and Applied Problems of Service, 2001, No. 1, pp. 60-63. [in Russian].

2. Varlamov I.V., Feoktistov N.A. *Ustroistvo avtomaticheskogo upravleniya protsessom elektroliza vody dlya polucheniya vodoroda i kisloroda* [Device for Automatic Control of the Water Electrolysis Process to Produce Hydrogen and Oxygen]. A.s. 1754798, 1992. [in Russian].

3. Feoktistov N.A. *Tiristornye ustroystva upravleniya i zashchity bytovykh apparatov i elektrotekhnicheskikh ustanovok* [Thyristor Devices for Control and Protection of Household Appliances and Electrical Installations]. Moscow, 1996. 222 p.

4. Varlamov I.V., Feoktistov N.A. *Sistemy elektropitaniya i upravleniya elektrolizno-vodnymi generatorami* [Power Supply and Control Systems for Electrolysis-Water Generators]. Moscow, ITK Publ., 2012. 202 p. [in Russian].

5. Feoktistov N.A., Varlamov I.V., Feoktistov A.N. *Sistemy upravleniya i avtomaticheskogo regulirovaniya rezhimov raboty EVG* [The Control System and Automatic Control Modes of Electrolytic Water Generator Using a Micro-Computer]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy —Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, No. 3, Vol. 9, pp. 31-36. [in Russian].

6. Storozhev V.V., Feoktistov N.A. *Sistemotekhnika i mekhatronika tekhnologicheskikh mashin i oborudovaniya* [System Engineering and Mechatronics of Technological Machines and Equipment]. Moscow, ITK Publ., 2015. 412 p. [in Russian].



Бордюг А. С.
Bordyug A. S.

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-77-82

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Современные транспортные суда имеют передовые системы управления динамическим позиционированием, генерированием и распределением электроэнергии, а также грузовыми операциями и т.д. Хорошо известно, что ошибки программного обеспечения могут привести к задержкам операций судна по времени, а также поставить под угрозу безопасность судна и экипажа. В настоящее время режим испытаний и верификации конструкций и систем судна хорошо налажен, большинство компьютерных систем на современных судах вводятся в эксплуатацию без независимых испытаний и проверок. Циклическое тестирование аппаратного обеспечения — это хорошо зарекомендовавшая себя методология тестирования во многих отраслях промышленности. Циклическое тестирование аппаратного обеспечения облегчает систематическое тестирование философии проектирования систем управления, функциональности, производительности и возможности обработки отказов как в нормальных, так и в нерабочих условиях эксплуатации и проводится на виртуальном испытательном стенде, где нет риска для человека, судна или оборудования. Автоматические системы управления, которые работают на программном обеспечении в нормальном режиме работы, состоят из комбинации компонентов, поставляемых несколькими поставщиками. Это означает, что программное обеспечение системы управления от нескольких поставщиков должно работать вместе как интегрированная система для поддержания безопасности и достижения желаемых эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: циклическое тестирование аппаратного обеспечения, человеко-машинный интерфейс, системы управления, судно, информационно-измерительные системы, электроэнергетика.

APPLICATION OF CYCLIC TESTING OF MARINE CONTROL HARDWARE

Modern transport ships have advanced control systems for dynamic positioning, power generation and distribution, as well as cargo operations, etc. It is well known that software errors can lead to time delays in ship operations and jeopardize the safety of the ship and crew. At present, the regime for testing and verifying ship structures and systems is well established, most of the computer systems on modern ships are put into operation without independent tests and checks. Loop testing of hardware is a well-established testing methodology in many industries. Cyclic testing of hardware facilitates systematic testing of control system design philosophy, functionality, performance, and fault handling capability in both normal and non-operating conditions and is performed in a virtual test bench where there is no risk to humans, ships or equipment. Automatic control systems that run on software in normal operation are composed of a combination of components delivered by several suppliers. This means that control system software from multiple vendors must work together as an integrated system to maintain safety and achieve the desired performance.

Key words: cyclic testing of hardware, human-machine interface, control systems, ship, information-measuring systems, electric power industry.

Введение

За несколько десятилетий значительно возросла сложность систем управления и программного обеспечения на борту морских судов. Двигательные и маневровые системы, энергетические системы, системы распределения грузов и навигационные системы на современных судах являются примерами систем, которые часто представляют собой совокупность аппаратного и программного обеспечения различных производителей. Системы динамического позиционирования включают в себя системы определения положения и датчики, компьютерную систему, силовую установку, включая систему управления электроэнергетическим комплексом, локальные и дистанционные системы управления двигателем, а также все вспомогательные системы, необходимые для обслуживания этих систем, системы смазки, охлаждения, вентиляции и топлива. В основе этих подсистем лежат компьютерные системы управления, которые в свою очередь управляют сложным программным обеспечением. Это программное обеспечение имеет решающее значение для безопасности и эффективности операций. Для достижения желаемого уровня безопасности и производительности все эти аппаратные и программные компоненты должны работать как одна интегрированная система. Последние разработки привели к тому, что функции программного обеспечения все чаще распределяются между различными системами и производителями. Опыт других отраслей показал, что программное обеспечение неуловимо, и им трудно управлять должным образом. Программные системы на современном судне намного превосходят любую механическую, электрическую или гидравлическую систему.

Управление рисками для программного обеспечения морской системы управления

Как описано в стандарте ИМО по безопасному управлению и эксплуатации судов (ИМО 2010), устанавливаются требования к определению опасных режимов отказов оборудования и технических систем, и это относится как к программному обеспечению, так и к аппаратному обеспечению. Кроме того,

необходимы конкретные меры по повышению безопасности и надежности таких систем путем надлежащего управления безопасностью и регулярного тестирования функций безопасности. Существуют хорошо зарекомендовавшие себя процессы независимой оценки рисков конструкций и электро-механических аппаратных систем с использованием таких методов оценки рисков, как дерево отказов, количественная оценка рисков и уровни целостности безопасности. Некоторые из этих методов также подходят для оценки программного обеспечения, если они адаптированы к способу сбоя программного обеспечения [1]. Однако в то время как аппаратные компоненты имеют установленные режимы отказов и хорошо известную физику износа, две версии или конфигурации программного обеспечения могут отказывать совершенно по-разному. Это означает, что необходимо проверить анализ риска с помощью тестирования. Методы количественной оценки, используемые для аппаратного обеспечения, не могут быть применены к программному обеспечению. Стандарт для метода проверки уровней целостности безопасности фокусируется на разработке и тестировании программного обеспечения. Однако данный метод гораздо менее распространен в морской промышленности, чем в автомобильной, железнодорожной и атомной. Циклическое тестирование аппаратного обеспечения (ЦТАО) сегодня является основным инструментом тестирования программного обеспечения системы управления, и оно играет важную роль во всех областях совершенствования [2].

Применение циклического тестирования аппаратного обеспечения морских систем управления

ЦТАО — это хорошо зарекомендовавшая себя методология испытаний в автомобильной, авиа и космической промышленности, которая уже почти десять лет доступна для морской и оффшорной промышленности. Основная идея ЦТАО заключается в использовании современных тренажеров (рисунок 1), способных имитировать динамические характеристики судна с его силовой установкой, двигателями и другим соответствующим оборудованием.

Таким образом, система управления не будет испытывать никакой разницы между реальным миром и моделируемым миром. Имитаторы взаимодействуют с целевыми системами управления и способны моделировать широкий спектр сценариев, определяемых режимами работы, оперативными задачами, а также режимами одиночных и множественных отказов с целью проверки правильности функционирования и производительности в нормальных, ненормальных и неисправных условиях [3]. В себя включает проверку интерфейсов и интегрированных функциональных возможностей между компьютерной системой динамического позиционирования, системы управления электроэнергетическим комплексом и системами управления подруливающим устройством. Программные функции для специализированных операций, таких как разгрузка, прокладка труб, рытье траншей и т.д., еще более трудны для тестирования с помощью традиционных инструментов, особенно при рассмотрении проблем обработки отказов и вне проектных ситуаций. Тестирование такой функциональности в реальной жизни может быть как опасным, так и дорогостоящим. Для того чтобы правильно оценить и проверить системы управления от различных производителей и интеграцию между этими системами, необходима независимая технология тестирования.

В мировой практике морского судостроения DNV GL разработала добровольные обозначения класса DP-HIL, PMS-HIL, DrillHIL и Crane-HIL, а также стандарт сертификации испытаний ЦТАО (DNV, 2011), описывающий общие требования к испытаниям ЦТАО. Аналогичным образом ABS ввела добровольную нотацию классов (ABS, 2012), которая поддерживает расширенную проверку системы с помощью тестирования ЦТАО или ЦТПО (Циклическое тестирование программного обеспечения).

Типичные ЦТАО, выполняемые для системы динамического позиционирования (DP) [4]:

- DP-HIL фокусируется на системе управления DP и в основном на компьютерной системе DP;

- PMS-HIL специализируется на системе управления электропитанием;

- SPT-HIL (рулевое управление, двигатели) ориентированы на управление двигателем с помощью компьютера, включая дистанционное и локальное управление двигателем;

- Интеграционное тестирование систем управления DP, PMS и SPT фокусируется на физической и функциональной интеграции разных систем управления.

Наилучшая практика определения ЦТАО отдельных систем управления описана в стандартах и обозначениях классов, упомянутых выше. Когда речь заходит об интеграционном тестировании систем от нескольких поставщиков, опыт показывает, что спецификации для общей области ЦТАО должны быть понятны всем сторонам уже на начальном этапе проекта. Отказы, возникающие в системах управления, не нацеленных непосредственно на область испытаний, обнаружить невозможно. Например, в PMS-HIL целевой системой обычно является высокоуровневая система управления и ее операторские станции. Для низкоуровневых регуляторов, таких как регуляторы частоты вращения и локальных систем безопасности, физическое поведение моделируется, а управляющее программное обеспечение эмулируется. Для испытаний и утверждения основной проблемы класса является обработка системой управления единичных отказов. Однако другие проблемы, такие как эксплуатационная доступность, надежность и производительность, могут быть не менее важны для владельца судна. Кроме того, опыт показал, что неожиданные множественные сбои, часто сочетающиеся с некоторой степенью человеческой ошибки, могут иметь неблагоприятные последствия.

Таким образом, тестовая программа ЦТАО состоит из нескольких типов тестов:

- функциональное тестирование: проверка функций и режимов системы управления;

- тестирование режима отказа: тестирование обнаружения и обработки отказов системы управления;

- тестирование производительности: тестирование производительности системы



Рисунок 1. Принципиальная схема тренажера циклических аппаратных испытаний морских систем управления

управления в различных эксплуатационных и экологических условиях. Тестирование производительности требует высокой точности моделей и требует тщательного анализа точности и чувствительности моделей.

Автоматическое циклическое тестирование аппаратного обеспечения морских систем управления

ЦТАО, как оно проводится сегодня, является трудоемким. Оператор теста должен управлять системой управления через свой человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) так же, как управлять имитаторами ЦТАО вручную. Это включает в себя настройку тестовых сценариев, запуск тестовых случаев и режимов сбоев, а также запись результирующей производительности системы с точки зрения реакции и предупреждений/сигналов тревоги. Это ограничивает объем испытаний и число испытательных мероприятий, поскольку время и ресурсы для испытаний ограничены, особенно для судов, находящихся в эксплуата-

ции. Чтобы решить эту проблему, следующее поколение тестовых установок ЦТАО будет включать автоматизированное тестирование частей тестовой области. Чтобы использовать автоматическое тестирование, необходимы три ключевых элемента (рисунок 2) и сравнение со стандартной установкой ЦТАО (рисунок 1) [5]:

- оператор тестирования должен быть заменен специальным инструментом для автоматизированного тестирования и оценки результатов тестирования в дополнение к обычным инструментам тестирования ЦТАО;

- сигнальный интерфейс между системой управления и имитатором ЦТАО должен быть дополнен функциональным интерфейсом для обеспечения взаимодействия между инструментами ЦТАО и человеко-машинным интерфейсом системы управления. Этот тестовый интерфейс включает в себя доступ и управлению системой сигнализации DP, а также все регулярные действия оператора на

ЦТАО, такие как нажатие кнопок, движение джойстика/мыши и изменение настроек;

- ожидаемые результаты испытаний, в частности обработка сигналов тревоги, должны устанавливаться как часть ручного процесса ЦТАО. Автоматизированная испытательная установка ЦТАО может

использоваться в лабораторных условиях как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации, а также для некоторых систем, таких как компьютерная система DP, также на борту судна в качестве защитной сетки во время обновления программного обеспечения.

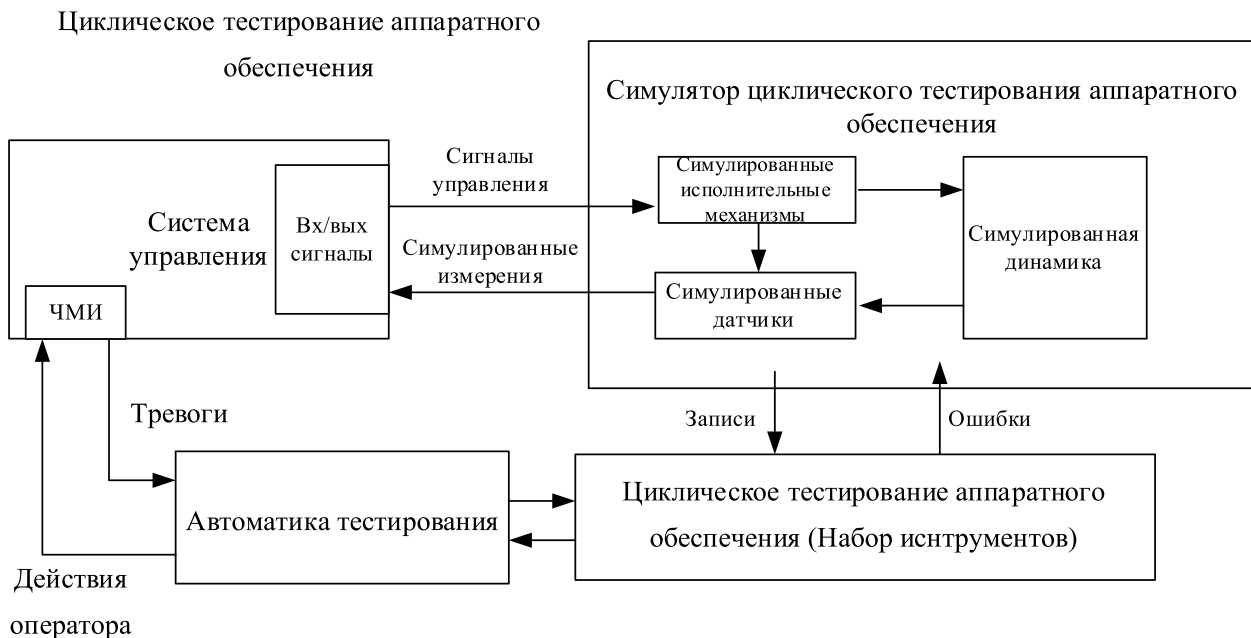


Рисунок 2. Принципиальная схема тренажера автоматических циклических аппаратных испытаний морских систем управления

Вывод

Сегодня системы управления и безопасности в значительной степени управляются программным обеспечением. Очень сложные логики, которые слишком сложны или их реализация дорога в аппаратном обеспечении, могут быть легко реализованы в программном обеспечении. Программное обеспечение чрезвычайно гибко, и легко вносит изменения в функциональность. Однако очень сложная и гибкая функциональность также связана с высоким риском ошибок, а программное обеспечение может быть чрезвычайно хрупким. Поэтому важно также сосредоточиться на программном обеспечении для управления безопасностью и оценок рисков. Традиционные методы оценки рисков

были разработаны для аппаратных средств, и при их применении к программному обеспечению следует проявлять осторожность. Некоторые методы вообще не подходят для программного обеспечения из-за фундаментальных различий в том, как отказывают аппаратное и программное обеспечение [6, 7]. Цель данной статьи состояла в том, чтобы подчеркнуть, как независимое ЦТАО может быть использовано для тестирования, проверки и валидации отдельных программных компонентов системы DP, а также полной интегрированной системы. В статье показано, как ЦТАО может быть включено в жизненный цикл судна для управления и снижения рисков программного обеспечения, как для новых, так и для судов в эксплуатации.

Список литературы

1. ABS (2012). Guide for Systems Verification (Including Hardware-in-the-Loop and Software-in-the-Loop Testing). 2012.

2. ABS (2014). Guide to Integrated Software Quality Management (ISQM). 20104.
3. DNV (2011). Standard for Certification of HIL testing. SfC No. 2.24. 2011.

4. DNV (2012). *Integrated Software Dependent Systems (ISDS) — Offshore Standard DNV-OS-D203*. 2012.

5. DNV (2013). *Rules for classification of Ships, Part 6 Ch 22 Enhanced System Verification (ESV)*. 2013.

6. Доровской В.А., Черный С.Г., Бордюг А.С. Компараторная идентификация частотных характеристик систем автоматического управления судовой энергетической установки // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 1 (45). С. 47–57.

7. Бордюг А.С., Железняк А.А., Чёрный С.Г. Проверка надежности электронной системы управления дизель-генераторного агрегата морских судов // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2019: матер. Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук. 2019. С. 344–347.

References

1. *ABS (2012). Guide for Systems Verification (Including Hardware-in-the-Loop and Software-in-the-Loop Testing)*. 2012.

2. *ABS (2014). Guide to Integrated Software Quality Management (ISQM)*. 20104.

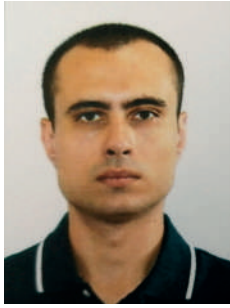
3. *DNV (2011). Standard for Certification of HIL Testing*. SFC No. 2.24. 2011.

4. *DNV (2012). Integrated Software Dependent Systems (ISDS) — Offshore Standard DNV-OS-D203*. 2012.

5. *DNV (2013). Rules for Classification of Ships, Part 6 Ch. 22 Enhanced System Verification (ESV)*. 2013.

6. Dorovskoi V.A., Chernyi S.G., Bordyug A.S. Komparatornaya identifikatsiya chastotnykh kharakteristik sistem avtomaticheskogo upravleniya sudovoi energeticheskoi ustanovki [Comparative Identification of Frequency Characteristics of Automatic Control Systems of Ship Power Station]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy — Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Radiotechnical and Infocommunication Systems*, 2020, No. 1 (45), pp. 47–57. [in Russian].

7. Bordyug A.S., Zheleznyak A.A., Chernyi S.G. Proverka nadezhnosti elektronnoi sistemy upravleniya dizel'-generatornogo agregata morskikh sudov [Checking the Reliability of the Electronic Control System of the Diesel Generator Set of Marine Vessels]. *Materialy mezhdunarodnoi-nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2019»*. [Materials of the International Scientific-Practical Conference «Transport of Russia: Problems and Prospects — 2019»]. FGBUN Institute for Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences. 2019, pp. 344–347. [in Russian].



Агуреев А. В.
Agureev A. V.

*инженер-конструктор 3-й категории,
АО «Таганрогский научно-
исследовательский институт связи»,
г. Таганрог, Российская Федерация*



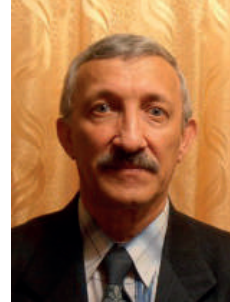
Губарев Д. Е.
Gubarev D. E.

*инженер-конструктор 3-й категории,
АО «Таганрогский научно-
исследовательский институт связи»,
г. Таганрог, Российская Федерация*



Кочубей А. С.
Kochubey A. S.

*инженер-конструктор 3-й категории,
АО «Таганрогский научно-
исследовательский институт связи»,
г. Таганрог, Российская Федерация*



Зикий А. Н.
Zikiy A. N.

*кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
доцент кафедры
«Информационная безопасность
телекоммуникационных систем»,
Институт компьютерных технологий и
информационной безопасности, ФГБОУ ВО
«Южный федеральный университет»,
г. Таганрог, Российская Федерация*

УДК 621.372

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-83-93

ДВА ФИЛЬТРА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Полосовые фильтры в приёмно-передающей аппаратуре являются важной составной частью, так как обеспечивают выделение полезного сигнала и подавление побочных каналов.

Целью работы является моделирование и экспериментальное исследование двух фильтров бегущей волны дециметрового диапазона. Частоты настройки фильтров равны 1090 и 837,5 МГц, а полосы пропускания 40 ± 5 и 30 ± 5 МГц соответственно.

Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования двухканального фильтра для управления воздушным движением. Показано, что минимальные потери в полосе пропускания не превышают 3,2 дБ, а максимальные потери в полосе про-

пускания составляют 6,2 дБ по уровню минус 3 дБ от максимума. Фильтры имеют ярко выраженные ложные полосы пропускания на третьей гармонике основной частоты и менее выраженные ложные полосы на второй гармонике основной частоты. Потери на частоте смежного канала составляют не менее 25 дБ. Проведено моделирование двух фильтров в среде Microwave Office, получены амплитудно-частотные характеристики фильтров в ближней и дальней зонах.

Представлены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики фильтров в ближней и дальней зонах. Эксперимент проводился с помощью векторного анализатора цепей типа PNA-L.

Амплитудно-частотные характеристики обоих фильтров достаточно симметричны и мало изрезаны, что говорит об удовлетворительном значении коэффициента стоячей волны по напряжению.

Конструктивно оба фильтра входят в состав модуля, в котором имеются ещё направленные ответвители и нагрузки. Фильтры выполнены на воздушно-полосковой линии передачи и могут выдерживать проходящую мощность более 10 Вт. Модуль выполнен в литом корпусе размерами 460 x 160 x 20 мм и закрывается крышкой. Модуль может быть использован в аппаратуре управления воздушным движением и соответствует ГОСТ 25260-83.

Ключевые слова: фильтр бегущей волны, полоса пропускания, воздушно-полосковая линия, гармоника, эксперимент, амплитудно-частотная характеристика.

TWO TRAVELING WAVE FILTERS

Bandpass filters in the receiving and transmitting equipment are an important part, since they provide the allocation of useful signal and suppression of side channels.

The aim of this work is to model and experimentally study two traveling wave filters in the decimeter range. The filter tuning frequencies are 1090 and 837.5 MHz, and the bandwidth is 40 ± 5 and 30 ± 5 MHz, respectively.

The results of modeling and experimental research of a two-channel filter for air traffic control are presented. It is shown that the minimum bandwidth loss does not exceed 3.2 dB, and the maximum bandwidth loss is 6.2 dB at the level of minus 3 dB from the maximum. Filters have pronounced false bandwidth on the third harmonic of the main frequency, and less pronounced false bandwidth on the second harmonic of the main frequency. The frequency loss of the adjacent channel is at least 25 dB. Two filters were simulated in the Microwave Office environment, and the amplitude-frequency characteristics of filters in the near and far zones were obtained.

Experimental amplitude-frequency characteristics of filters in the near and far zones are presented. The experiment was performed using a PNA-I type vector chain analyzer.

The amplitude-frequency characteristics of both filters are quite symmetrical and not cut enough, which indicates a satisfactory value of the standing wave voltage coefficient.

Structurally, both filters are part of the module, which also has directional couplers and loads. Filters are made on an air-strip transmission line and can withstand a passing power of more than 10 W. The module is made in a cast case with sizes 460 x 160 x 20 mm and closes with a lid. The module can be used in air traffic control equipment and complies with State Standard 25260-83.

Key words: traveling wave filter, bandwidth, air-strip line, harmonic, experiment, amplitude-frequency response.

Введение

Фильтры бегущей волны нашли широкое применение в аппаратуре связи, навигации и радиолокации, поэтому их исследование является актуальным [1–4].

Важным преимуществом фильтров такого типа является низкий коэффициент отражения за полосой пропускания. В ряде случаев это позволяет отказаться от вентилей и циркуляторов, работающих в дециметровом диа-

пазоне волн, так как они имеют большую массу и габариты.

Другим важным преимуществом фильтров бегущей волны на симметричной полосковой линии (СПЛ) является высокая допустимая мощность сигнала. Малогабаритные фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) не допускают такой мощности сигнала [5].

Целью данной работы является моделирование и экспериментальное исследование двух

фильтров бегущей волны для аппаратуры управления воздушным движением согласно

ГОСТ 25260-83. К фильтрам предъявляются требования, изложенные в таблице 1.

Таблица 1. Требования к фильтрам

Наименование параметра, размерность	Фильтр 1	Фильтр 2
Центральная частота полосы пропускания, МГц	1090	837,5
Ширина полосы пропускания по уровню — 3 дБ от максимума, МГц	40 ± 5	30 ± 5
Заграждение на частоте смежного канала, дБ	25,0 дБ на частоте 837,5 МГц	30,0 дБ на частоте 1090 МГц
Волновое сопротивление входа/выхода, Ом	50/50	50/50
Максимально допустимая входная мощность, Вт	10	10

Схема и конструкция

Исследуемые два фильтра входят в состав модуля, в котором имеются еще три направленных ответвителя и три нагрузки. Схема модуля показана на рисунке 1. Фото модуля можно видеть на рисунке 2.

Модуль имеет габариты 460 x 160 x 20 мм. Корпус чашечного типа и крышка изготовлены из лёгкого алюминиевого сплава и окрашены молотковой эмалью серого цвета. На передней панели установлены 4 соединителя, на задней панели установлены три соединителя. Модуль выполнен на симметричной воздушно-полосковой линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом. Для фиксации полосковых

линий передачи в середине между дном и крышкой через каждые 60–90 мм сверху и снизу установлены фторопластовые бобышки. Такая конструкция модуля имеет достаточно высокую жёсткость и позволяет эксплуатировать его в авиационной аппаратуре.

В модуле применены два типа соединителей: вилки по типу СР50-267Ф и розетки типа IV по ГОСТ 20265-83.

Геометрические размеры фильтров можно рассчитать по методике, изложенной в [1–3]. Результаты расчёта геометрических размеров приведены в таблицах 2 и 3. Позиционные обозначения в таблицах 2 и 3 привязаны к схеме на рисунке 3.

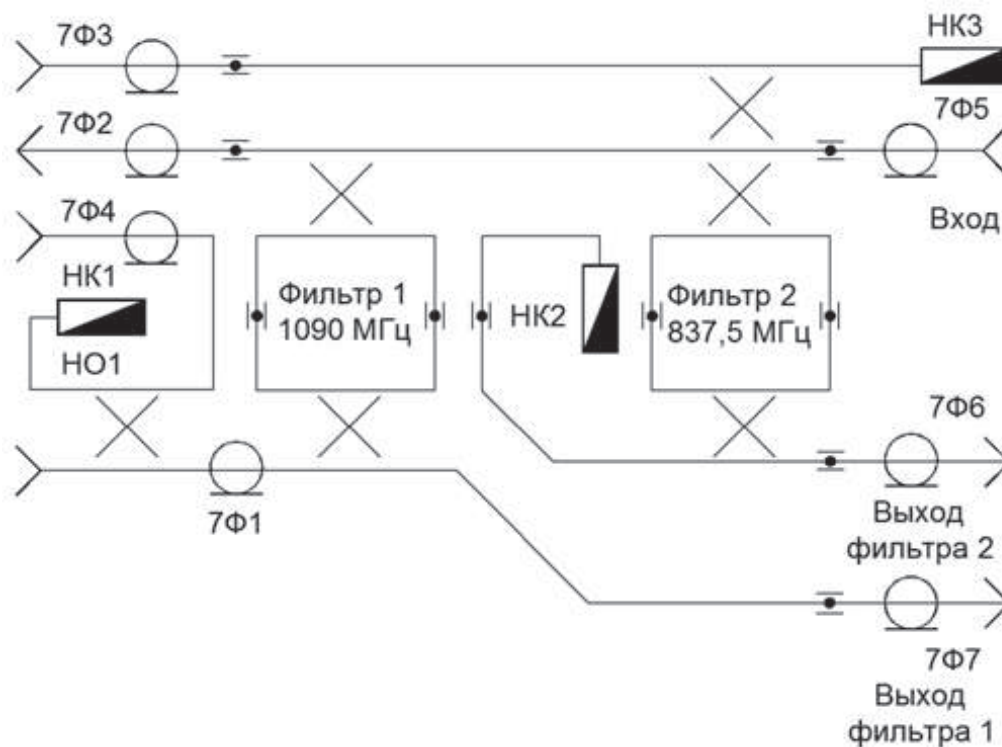


Рисунок 1. Принципиальная схема модуля

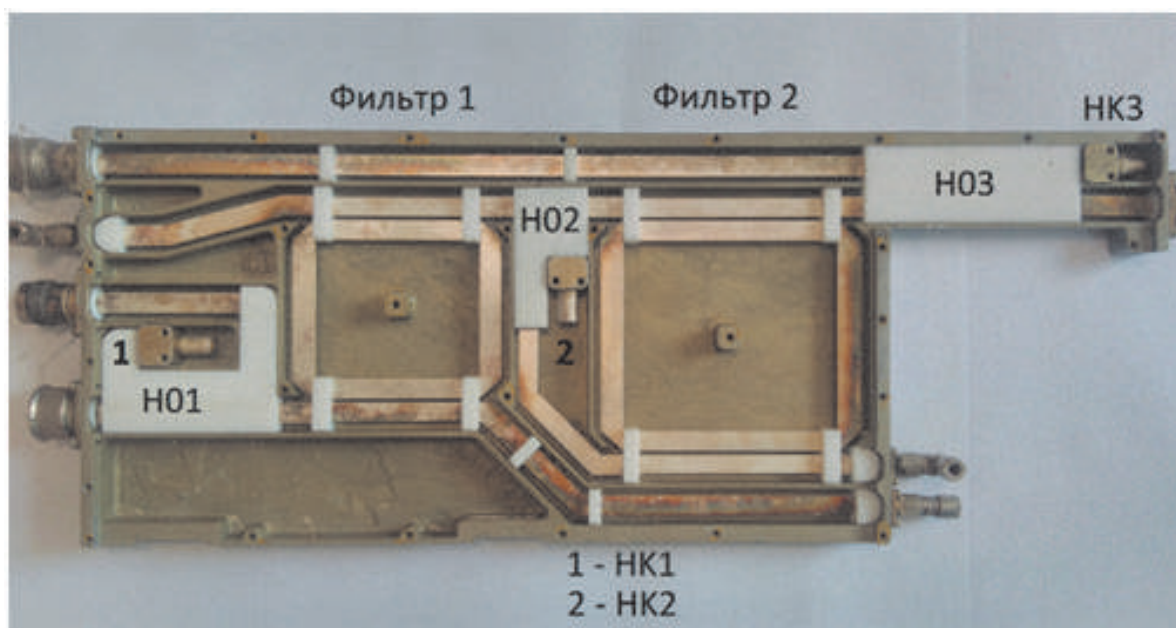


Рисунок 2. Фото конструкции модуля с двумя фильтрами бегущей волны

Таблица 2. Геометрические размеры фильтра № 1

Позиц. обознач.	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Наименование
W1	20	7,5	2	Проводник
W2	73	7,5	2	Проводник
W3	73	8	2	Проводник
W4	62,5	8,8	2	Проводник
W5	73	8	2	Проводник
W6	73	7,5	2	Проводник
W7	62,5	8,8	2	Проводник
W8	20	7,5	2	Проводник
W9	20	7,5	2	Проводник
S1, S2	73	1,8	2	Зазор
H1 = H2		5		Расстояние от центра проводника до крышки, мм

Таблица 3. Геометрические размеры фильтра № 2

Позиц. обознач.	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Наименование
W1	20	7,5	2	Проводник
W2	93,6	7,5	2	Проводник
W3	93,6	8	2	Проводник
W4	83,5	8,8	2	Проводник
W5	93,6	8	2	Проводник
W6	93,6	7,5	2	Проводник
W7	83,5	8,8	2	Проводник
W8	20	7,5	2	Проводник
W9	20	7,5	2	Проводник
S1, S2	93,6	1,8	2	Зазор
H1 = H2		5		Расстояние от центра проводника до крышки, мм

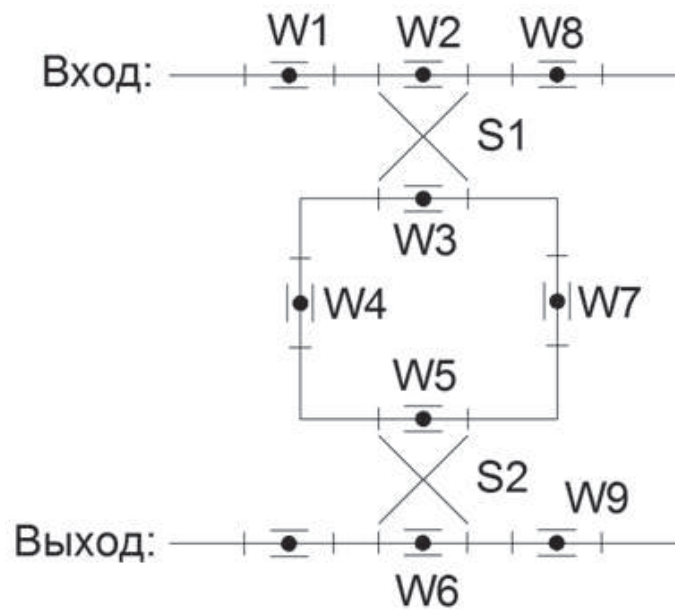


Рисунок 3. Принципиальная схема фильтра бегущей волны

Моделирование

Моделирование фильтров проводилось в среде Microwave Office [6–8]. Поскольку моделирование является предварительным этапом исследования, было принято решение упростить модели. Для этого каждый из фильтров моделировался отдельно. При этом предполагалось, что разнос частот настроек фильтров достаточно велик и их взаимным влиянием можно пренебречь в первом приближении. Окончательные выводы будут формулироваться с учётом эксперимента.

Модель фильтра 1 приведена на рисунке 4. Амплитудно-частотная характеристика фильтра 1 в ближней зоне приведена на рисунке 5. На рисунке 6 можно видеть АЧХ фильтра 1 в дальней зоне. Из рисунка 6 можно сделать вывод, что фильтр имеет ложную полосу пропускания на частоте $3f_0$ и $2f_0$.

Модель фильтра 2 показана на рисунке 7, амплитудно-частотная характеристика фильтра 2 в ближней зоне имеется на рисунке 8, на рисунке 9 можно видеть АЧХ фильтра 2 в дальней зоне.

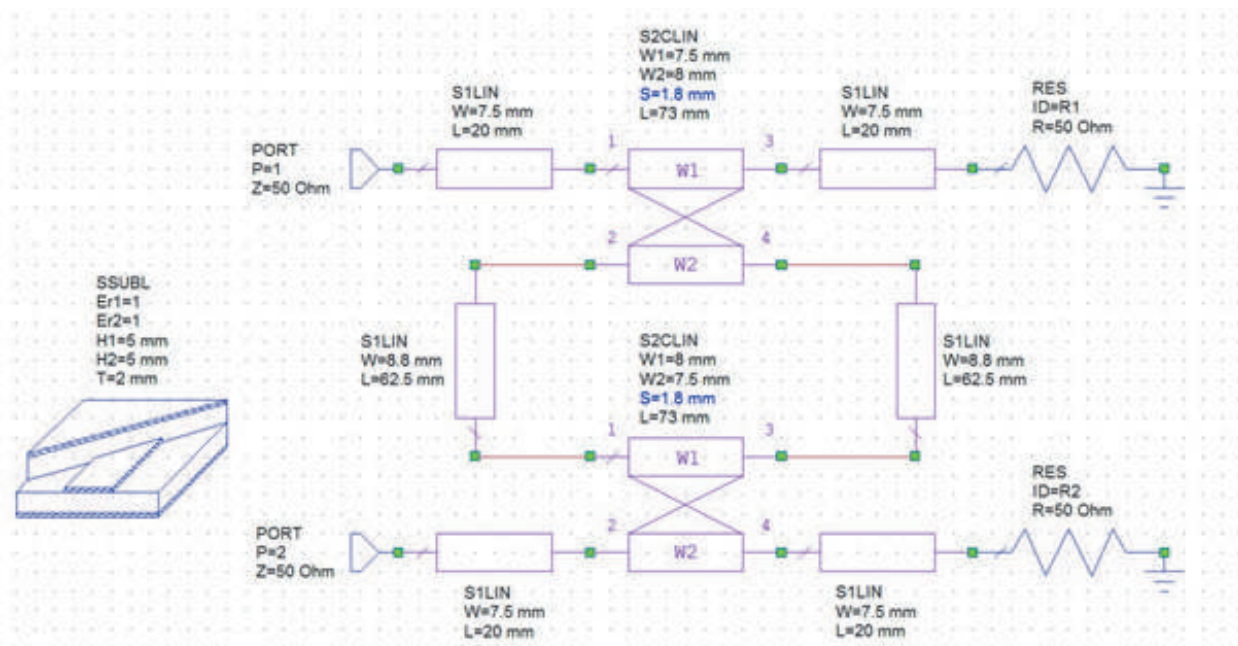


Рисунок 4. Модель фильтра 1 бегущей волны

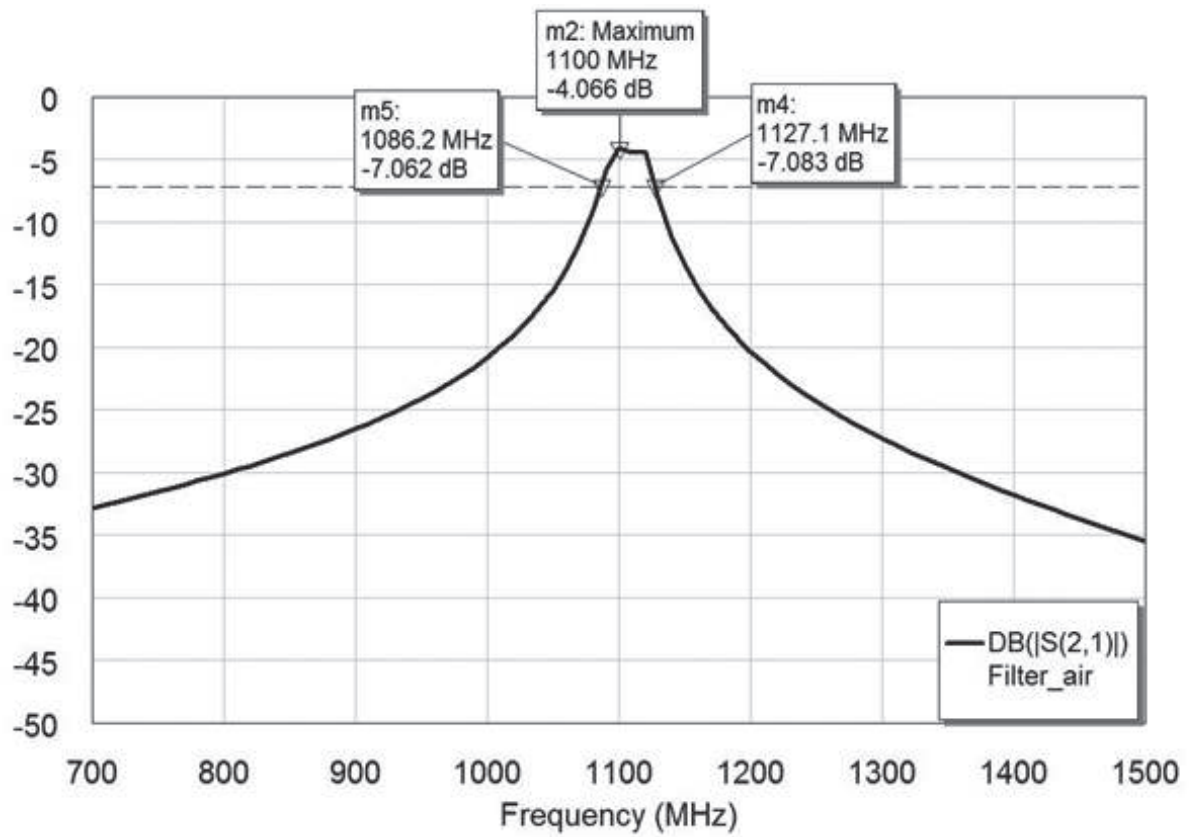


Рисунок 5. АЧХ фильтра 1 в узкой полосе из MWO

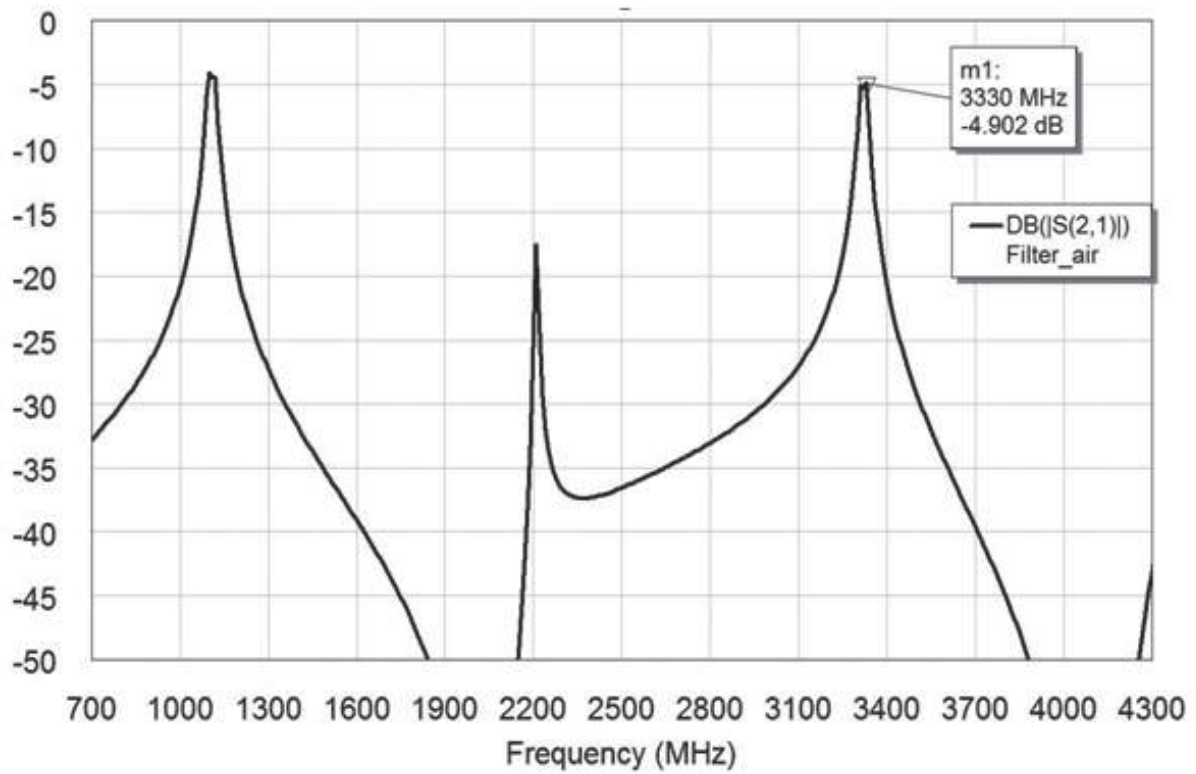


Рисунок 6. АЧХ фильтра 1 в широкой полосе из MWO

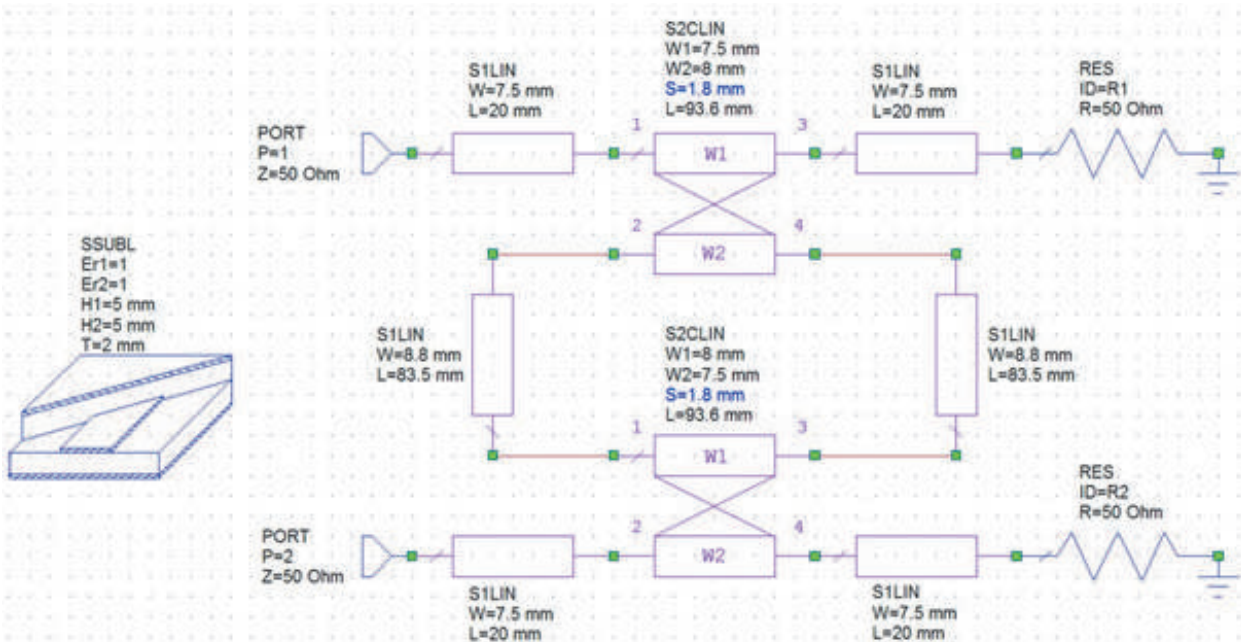


Рисунок 7. Модель фильтра 2 в MWO

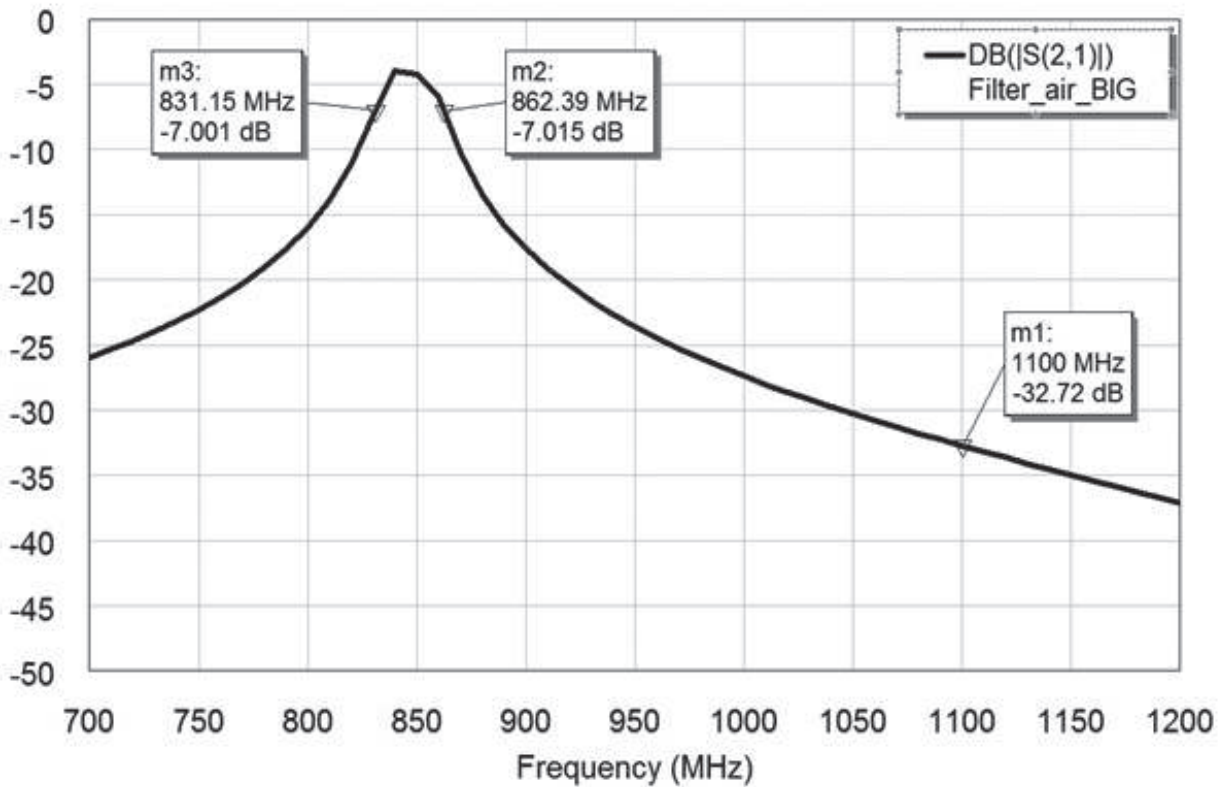


Рисунок 8. АЧХ фильтра 2 в узкой полосе

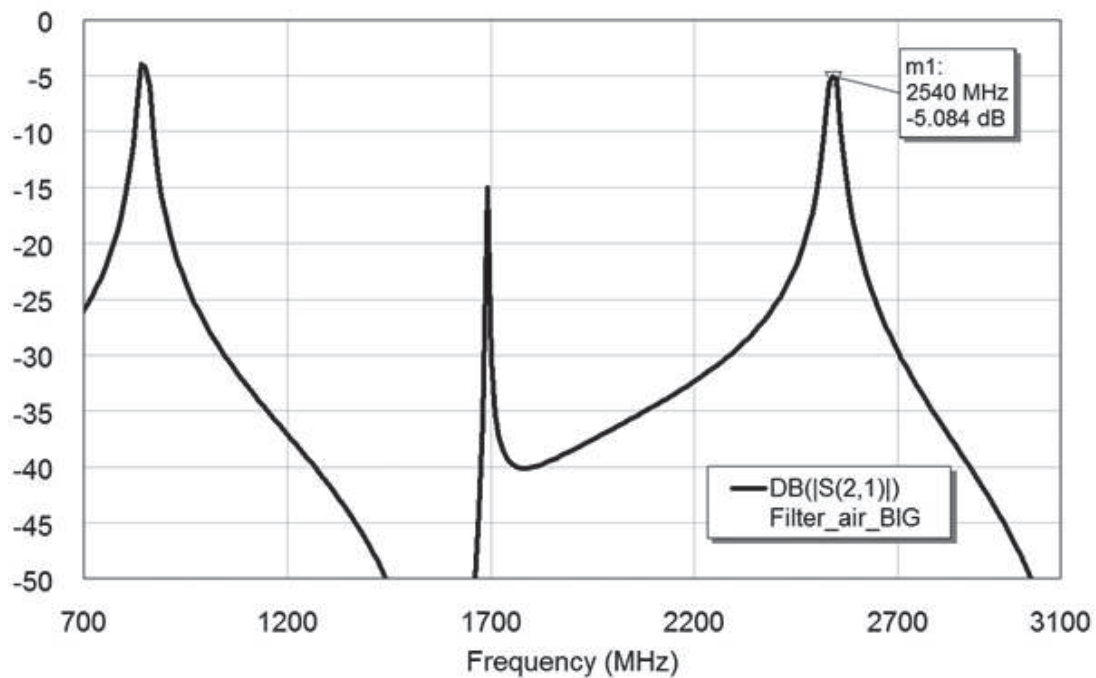


Рисунок 9. АЧХ фильтра 2 в широкой полосе

Эксперимент

Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой содержит основной инструмент — векторный анализатор цепей типа PNA-L. Кроме того, использованы согласованные нагрузки, переходы и кабели.

На рисунке 10 можно видеть АЧХ фильтра 1 в ближней зоне, а на рисунке 11 — в дальней зоне, на рисунке 12 показана АЧХ фильтра 2 в ближней зоне, а на рисунке 13 — в дальней зоне.

Рисунки 5, 6, 8–13 позволяют сформулировать количественные выводы.

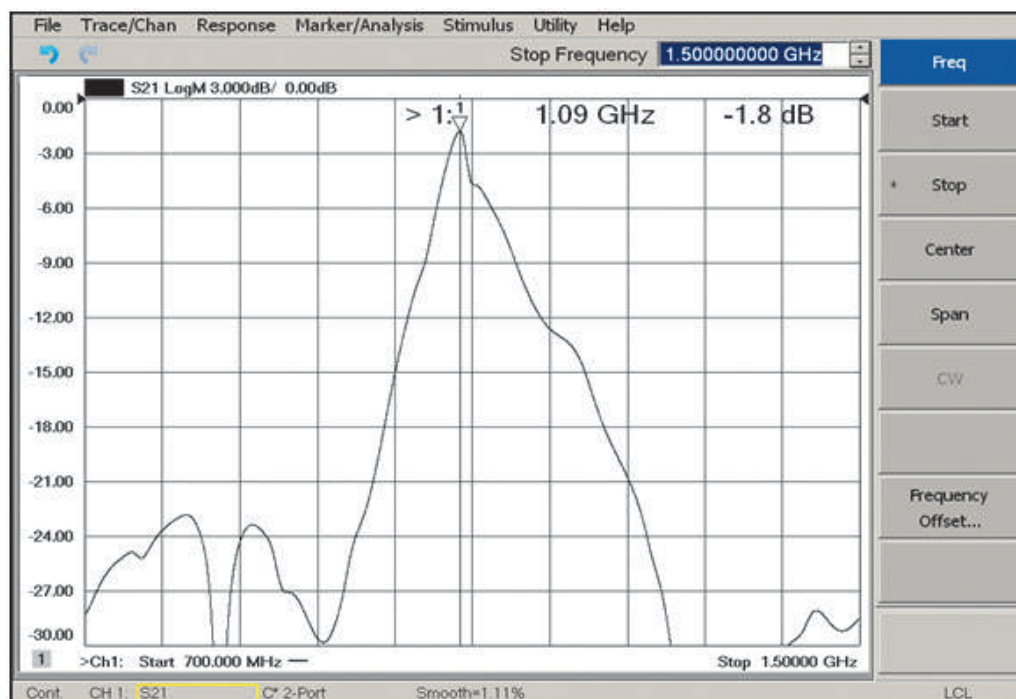


Рисунок 10. АЧХ фильтра 1 в полосе от 700 до 1500 МГц

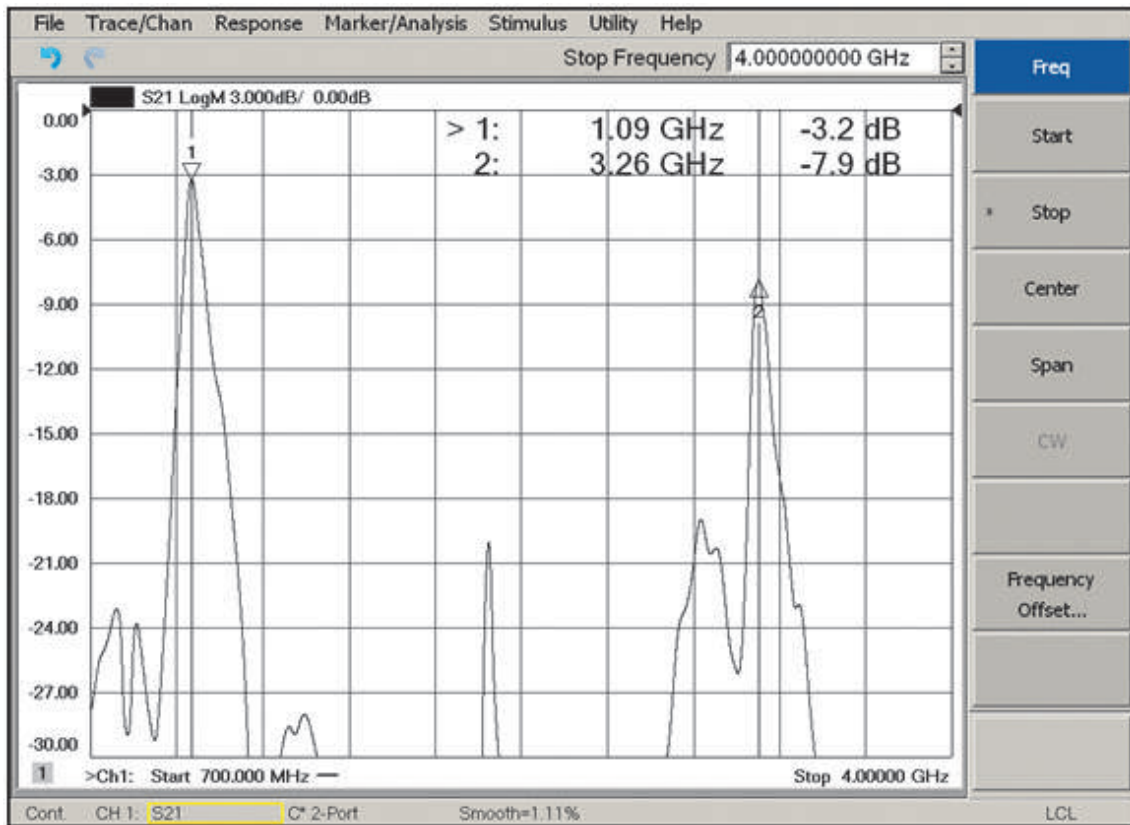


Рисунок 11. АЧХ фильтра 1 в полосе от 700 до 4000 МГц

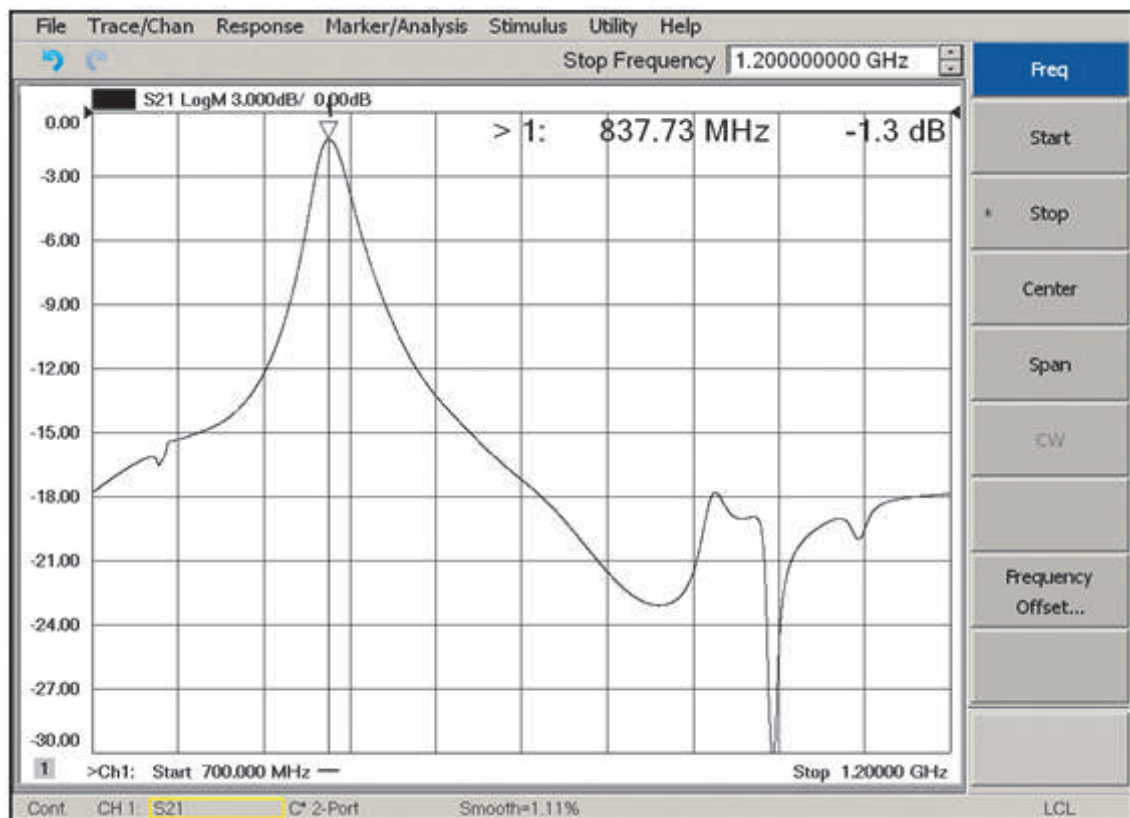


Рисунок 12. АЧХ фильтра 2 в полосе от 700 до 1200 МГц

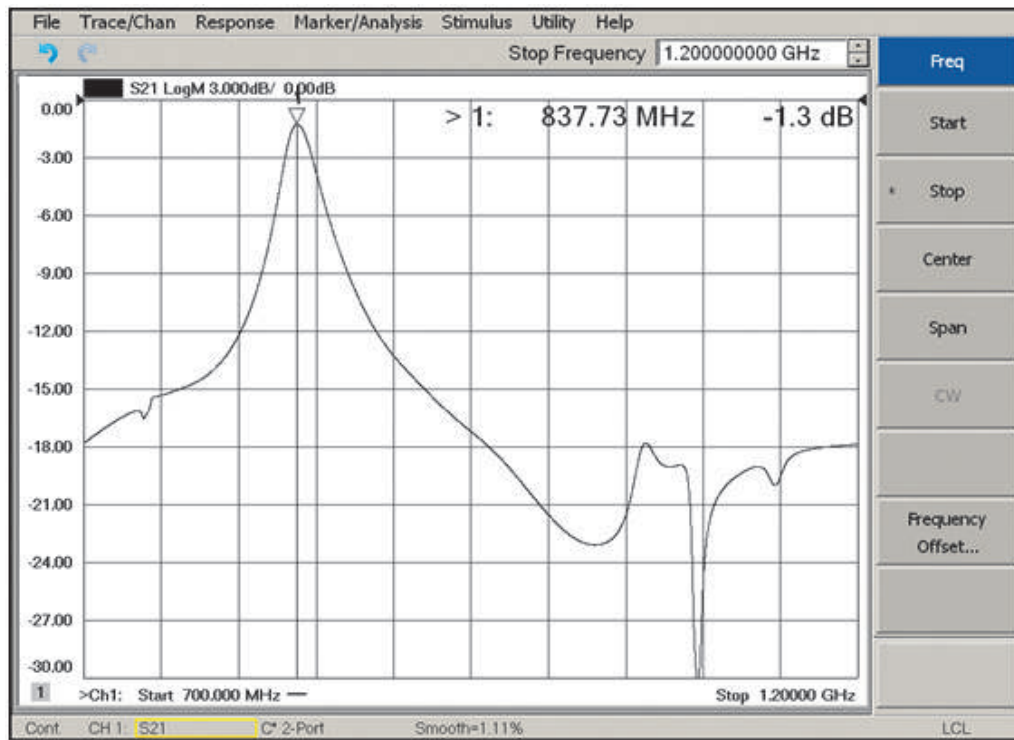


Рисунок 13. АЧХ фильтра 2 в полосе от 700 до 1300 МГц

В таблицах 4 и 5 приводится сравнение заданных и достигнутых параметров фильтров при моделировании и в эксперименте.

Из таблиц 4 и 5 видно, что все требования к фильтрам выполняются. Отличие частот

настройки фильтров при моделировании от заданных можно объяснить неучетом эффектов второго порядка, в том числе взаимным влиянием фильтров.

Таблица 4. Основные параметры фильтра 1

Наименование параметра, размерность	Задано	Моделирование	Эксперимент
Центральная частота полосы пропускания, МГц	1090	1109	1090
Ширина полосы пропускания по уровню — 3 дБ от максимума, МГц	40 ± 5	41	40
Заграждение на частоте смежного канала, дБ	28	28	30
Волновое сопротивление входа/выхода, Ом	50/50	50/50	50/50
Потери в полосе пропускания, дБ	7	7	4,8
Подавление ложной полосы пропускания на $2f_0$, дБ	—	17,5	20
Подавление ложной полосы пропускания на $3f_0$, дБ	—	4,9	7,9

Таблица 5. Основные параметры фильтра 2

Наименование параметра, размерность	Задано	Моделирование	Эксперимент
Центральная частота полосы пропускания, МГц	837,5	846,5	837,73
Ширина полосы пропускания по уровню — 3 дБ от максимума, МГц	30 ± 5	31	30
Заграждение на частоте смежного канала, дБ	30	32	30
Волновое сопротивление входа/выхода, Ом	50/50	50/50	50/50
Потери в полосе пропускания, дБ	7	7	5,6
Подавление ложной полосы пропускания на $2f_0$, дБ	—	15	16
Подавление ложной полосы пропускания на $3f_0$, дБ	—	5	5,9

Вывод

Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования двухка-

нального фильтра для управления воздушным движением.

Список литературы

1. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1971. Т. 2.
2. Машковцев Б.М., Цибизов К.Н., Емелин Б.Ф. Теория волноводов. М.: Наука, 1966.
3. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.Л. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. Радио, 1967. 652 с.
4. Справочник по расчёту и конструированию полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982. 326 с.
5. Зикий А.Н., Зламан П.Н., Власенко Д.В. Фильтр на ПАВ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9, № 3. С. 5–7.
6. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. М.: Солон-Пресс, 2003. 496 с.
7. Бахвалова С.А., Романюк В.А. Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office: учеб. пособие. М.: Солон-Пресс, 2016. 152 с.
8. Андрианов А.В., Быков С.А., Зикий А.Н., Пустовалов А.И. Моделирование и экспериментальное исследование трактового фильтра сантиметрового диапазона // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1 (44). С. 92.

References

1. Mattei D.L., Yang L., Dzhons E.M.T. *Fil'try SVCh, soglasuyushchie tsepi i tsepi svyazi* [Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures]. Moscow, Svyaz' Publ., 1971. Vol. 2. [in Russian].

2. Mashkovtsev B.M., Tsibizov K.N., Emelin B.F. *Teoriya volnovodov* [Theory of Waveguides]. Moscow, Nauka Publ., 1966. [in Russian].

3. Fel'dshtein A.L., Yavich L.R., Smirnov V.L. *Spravochnik po elementam volnovodnoi tekhniki* [Handbook of Waveguide Technology Elements]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1967. 652 p. [in Russian].

4. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu poloskovykh ustroystv* [Reference Guide for the Calculation and Design of Strip Devices]. Ed. by V.I. Vol'man. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 326 p. [in Russian].

5. Zikii A.N., Zlaman P.N., Vlasenko D.V. *Fil'tr na PAV* [Filter on Surface Acoustic Waves]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, Vol. 9, No. 3, pp. 5-7. [in Russian].

6. Razevig V.D., Potapov Yu.V., Kurushin A.A. *Proektirovanie SVCh ustroystv s pomoshch'yu Microwave Office* [Designing Microwave Devices Using Microwave Office]. Moscow, Solon-Press Publ., 2003. 496 p. [in Russian].

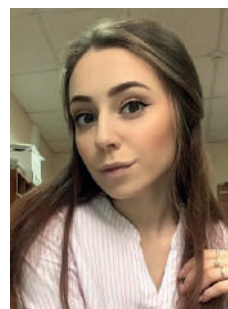
7. Bakhvalova S.A., Romanyuk V.A. *Osnovy modelirovaniya i proektirovaniya radiotekhnicheskikh ustroystv v Microwave Office: ucheb. posobie* [Fundamentals of Modeling and Design of Radio Engineering Devices in Microwave Office: Textbook]. Moscow, Solon-Press Publ., 2016. 152 p. [in Russian].

8. Andrianov A.V., Bykov S.A., Zikii A.N., Pustovalov A.I. *Modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie traktovogo fil'tra santimetrovogo diapazona* [Modelling and Experimental Research of Path Filter of C Range]. *Inzhenernyi vestnik Dona — Engineering Journal of Don*, 2017, No. 1 (44), pp. 92. [in Russian].



Шулаева Е. А.
Shulaeva E. A.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизированные
технологические и информационные
системы», ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет», филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация*



Сатчихина Л. А.
Satchikhina L. A.

*магистрант кафедры
«Автоматизированные технологические
и информационные системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
филиал, г. Стерлитамак,
Российская Федерация*

УДК 004.94

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-94-99

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРА-ПОЛИМЕРИЗАТОРА ДЛЯ ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА СУСПЕНЗИОННЫМ МЕТОДОМ

Данная работа посвящена анализу технологического процесса полимеризации поливинилхлорида (ПВХ) суспензионным методом, выявлены факторы, влияющие на процесс, проведен корреляционный анализ, созданы модели концептуального, топологического, параметрического и структурного уровней, проведена проверка на адекватность полученных моделей в программе среде VisSim.

Технологический процесс состоит из четырех основных стадий: полимеризации винилхлорида, дегазации ПВХ, выделения ПВХ из суспензии, сушки и классификации ПВХ. В данной работе будет рассматриваться первая стадия, так как она представляет наибольший интерес из-за существенного влияния на качество получаемой продукции.

Получаемый суспензионным способом ПВХ, представляет собой порошок белого цвета с размерами частиц от 50 до 350 мкм (в среднем 100–150 мкм). Частицы порошка ПВХ, которые часто называют зернами, имеют пористую структуру. В зависимости от величины пористости объемная плотность зерна составляет 1,1–1,3 г/см³ при плотности полимерной фазы 1,35–1,43 г/см³ определяемой молекулярной массы.

Процесс суспензионной полимеризации осуществляется в каплях эмульсии, полученных диспергированием винилхлорида в обессоленной воде в присутствии высокомолекулярных стабилизаторов эмульсии и растворимого в мономере инициатора.

Совершенствование и модернизация технологического процесса получения поливинилхлорида требует соответствующего развития компьютерно-моделирующих систем, обеспечивающих: определение и поддержание оптимальных режимов проведения технологических процессов, способствующих безаварийности функционирования, а также использование интеллектуальных систем моделирования и управления технологическими установками.

Целью данной работы являлось математическое моделирование реактора-полимеризатора на основе данных корреляционного анализа, вычисленных значений соответствующий каналов передачи воздействия, реализации моделей концептуального, топологического, структурно-параметрических уровней и проверки их на адекватность.

В результате данной работы были разработаны и проверены на адекватность структурно-параметрические модели для выходных параметров реактора, которые в дальнейшем могут

использоваться для реализации контуров каскадного регулирования и оптимизации процесса получения поливинилхлорида суспензионным методом.

Ключевые слова: поливинилхлорид, суспензионный метод, корреляционный анализ, моделирование, каналы передачи воздействий, реактор-полимеризатор, технологические параметры, статические зависимости, VisSim.

MATHEMATICAL MODELING OF A POLYMERIZER REACTOR FOR THE POLYVINYL CHLORIDE POLYMERIZATION PROCESS BY THE SUSPENSION METHOD

This work is devoted to analysis of technological process of polyvinyl chloride (PVC) suspension polymerization method, the identified factors influencing the process of correlation analysis, the model created the conceptual, topological, parametric and structural levels, a check on the adequacy of the obtained models in the software environment VisSim.

The technological process consists of four main stages: polymerization of vinyl chloride, PVC degassing, separation of PVC from suspension, drying and classification of PVC. In this paper, the first stage will be considered, since it is of the greatest interest due to its significant impact on the quality of the products obtained.

The PVC obtained by the suspension method is a white powder with particle sizes from 50 to 350 microns (on average, 100–150 microns). PVC powder particles have a porous structure often referred to as grains. The bulk density of the grain is 1.1–1.3 g/cm³ depending on the porosity and the density of the polymer phase is 1.35–1.43 g/cm³ of the determined molecular weight.

The suspension polymerization process is carried out in emulsion droplets obtained by dispersing vinyl chloride in desalted water in the presence of high-molecular emulsion stabilizers and a monomer-soluble initiator.

Improvement and modernization of the technological process for obtaining polyvinyl chloride requires the appropriate development of computer-modeling systems that provide: determination and maintenance of optimal modes of technological processes. These contribute the trouble-free operation, as well as the use of AI systems for modeling and controlling of technological equipments.

The aim of this work was modeling of the polymerization reactor based on correlation analysis data, computed values of the corresponding channels of impact transmission, implementation of models, topological, structural and parametric levels and checking their accuracy.

As a result of this work structural and parametric models for the output parameters of the reactor were developed and tested. They can be used later for implementing cascade control circuits and optimizing of the process of obtaining polyvinyl chloride by the suspension method.

Key words: polyvinyl chloride, suspension method, correlation analysis, modeling, impact transmission channels, polymerization reactor, process parameters, static dependencies, VisSim software.

Наиболее распространенным способом получения ПВХ является метод суспензионной полимеризации винилхлорида. Вместе с тем этот процесс по механизму формирования полимерных частиц, а также по кинетике очень близок процессу полимеризации винилхлорида в массе. Поэтому способ полимеризации винилхлорида в суспензии можно рассматривать как удобную для практического осуществления разновидность полимеризации в массе [1, 2].

В качестве технологического объекта управления выбран процесс производства поливинилхлорида, который состоит из

четырёх основных стадий. Выбрана первая стадия полимеризации винилхлорида [3–5].

Для улучшения показателей качества выходного продукта необходимо выполнить корреляционный анализ, разработать модели концептуального, топологического и структурного уровней. Все это необходимо для оптимизации процесса полимеризации винилхлорида, т.е. для получения однородного по молекулярной массе полимера.

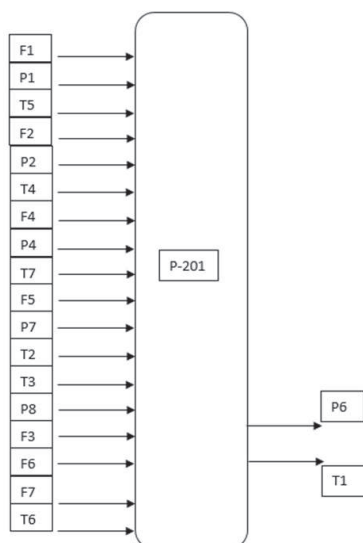
Строится модель концептуального уровня с разделением множества выбранных параметров на входные и выходные, которая содер-

Таблица 1. Входные и выходные параметры ректора-полимеризатора

Наименование технологических параметров	Переменная	Наименование технологических параметров	Переменная
Расход раствора В72	F1	Давление обессоленной воды	P7
Давление раствора В72	P1	Температура обессоленной воды	T2
Температура раствора В72	T5	Температура винилхлорида	T3
Расход раствора метоцела	F2	Давление винилхлорида	P8
Давление раствора метоцела	P2	Расход винилхлорида	F3
Температура раствора метоцела	T4	Расход раствора агидола	F6
Расход инициатора — триганокс WD-100	F4	Расход соды	F7
Давление инициатора	P4	Температура бикорбоната натрия	T6
Температура инициатора — триганокс WD-100	T7	Давление суспензии поливинилхлорида	P6
Расход обессоленной воды	F5	Температура суспензии ПВХ	T1

жит исходную информацию для дальнейшего расчета, представленную в таблице 1.

На основе данных, полученных по трендам, с таблицы сигнализаций и блокировок, а также исходя из функциональной схемы автоматизации, строится модель концептуального уровня (рисунок 1).

**Рисунок 1.** Концептуальная модель реактора-полимеризатора

На основе данной модели были определены основные технологические параметры протекающего процесса, что в дальнейшем будет использовано для выявления взаимосвязей данных параметров и определения коэффициентов корреляции.

На качество и характеристики полученной суспензии ПВХ влияют характеристики каждого из 8 входных компонентов. Для того чтобы выявить величину зависимости между входными и выходными параметрами компонентов необходимо разработать модель топо-

логического уровня и вычислить коэффициенты корреляции.

Для построения модели топологического уровня необходимо получить статистические зависимости между параметрами, полученными из промышленных данных. Были рассчитаны коэффициенты корреляции, которые характеризуют статистическую взаимосвязь двух и более величин: если изменение одной величины приводит к изменению другой, то между ними есть корреляция.

Задачей корреляционного анализа является выявление взаимосвязей между случайными переменными. Рассчитанные взаимосвязи представлены в таблице 2.

По результатам корреляционного анализа была сформирована модель топологического уровня для реактора-полимеризатора (рисунок 2).

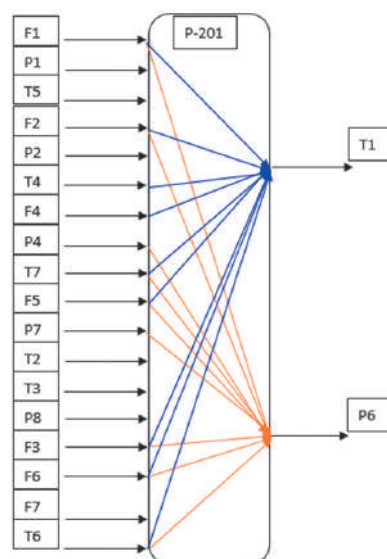
**Рисунок 2.** Модель топологического уровня для реактора-полимеризатора

Таблица 2. Результаты корреляционного анализа

Наименование технологических параметров	P6	T1	Наименование технологических параметров	P6	T1
F1	0,9885	0,9855	F5	1,0000	1,0000
P1	0,6062	0,5726	P7	0,9995	0,9994
T5	0,6037	0,5695	T2	0,7762	0,7130
F2	0,9992	0,9991	T3	0,6814	0,6019
P2	0,9973	0,9975	P8	0,8839	0,8950
T4	0,9927	0,9927	F3	1,0000	1,0000
F4	0,9952	0,9952	F6	-0,9915	-0,9917
P4	-0,9816	-0,9844	F7	-0,9843	-0,9801
T7	-0,9816	-0,9834	T6	0,9913	0,9887

На температуру получаемой суспензии ПВХ особенно сильно влияют следующие показатели: расход раствора В72, расход и температура раствора метоцела, расход и температура инициатора — триганокс, расход обессоленной воды, расход винилхлорида и раствора агидола, а также температура бикорбоната натрия, поступающего в реактор.

На давление получаемой суспензии ПВХ весьма сильно влияют следующие параметры входных компонентов: расход раствора В72, расход раствора метоцела, давление и температура инициатора, расход и давление обессоленной воды, расход винилхлорида и раствора агидола, а также температура бикорбоната натрия.

В дальнейшем на основе полученных зависимостей строятся модели структурного и параметрического уровней для реактора-полимеризатора. Для удобства реализации математической модели выбран полиномиальный вид функций, аппроксимирующий экспериментальные данные с трендов.

Модель представляет собой набор полиномов вида:

$$1) P_6 = a_{101} \cdot F_1 + a_{102} \cdot P_1 + a_{103} \cdot T_5 + a_{104} \cdot F_2 + a_{105} \cdot P_2 + a_{106} \cdot T_4 + a_{107} \cdot F_4 + a_{108} \cdot P_4 + a_{109} \cdot T_7 + a_{110} \cdot F_5 + a_{111} \cdot P_7 + a_{112} \cdot T_2 + a_{113} \cdot T_3 + a_{114} \cdot P_8 + a_{115} \cdot F_3 + a_{116} \cdot F_6 + a_{117} \cdot F_7 + a_{118} \cdot T_6,$$

$$2) T_1 = a_{201} \cdot F_1 + a_{202} \cdot P_1 + a_{203} \cdot T_5 + a_{204} \cdot F_2 + a_{205} \cdot P_2 + a_{206} \cdot T_4 + a_{207} \cdot F_4 + a_{208} \cdot P_4 + a_{209} \cdot T_7 + a_{210} \cdot F_5 + a_{211} \cdot P_7 + a_{212} \cdot T_2 + a_{213} \cdot T_3 + a_{214} \cdot P_8 + a_{215} \cdot F_3 + a_{216} \cdot F_6 + a_{217} \cdot F_7 + a_{218} \cdot T_6,$$

где a_{ij} — коэффициенты полиномов.

При аппроксимации заполняется матрица A и вектор B .

Матрица A определяется по значениям входных переменных по формуле:

$$A = \{a_{ij}\}, a_{ij} = \sum_{k=1}^m x_{ik} \cdot x_{jk}, \quad (1)$$

где x_{ik} — значение i -го входного параметра из k -ой строки.

Вектор B — по значениям входных и выходных переменных по формуле:

$$B = \{b_i\}, b_i = \sum_{k=1}^m x_{ik} Y_k, \quad (2)$$

где Y_k — значения аппроксимируемой функции, соответствующей X_{ik} .

Коэффициенты k_i определяются как решение матричного уравнения по формуле:

$$A \times K = B, \quad (3)$$

где $K = \{k_i\}$ — вектор коэффициентов полинома.

Между зависимыми параметрами находятся коэффициенты усиления соответствующих каналов передачи воздействий. Полученные данные упорядочены в таблице 3.

На основе моделей концептуального и топологического уровней были рассчитаны коэффициенты усиления соответствующих каналов передачи воздействий, что в дальнейшем позволило получить модели структурно-параметрического уровня для параметров исследуемого реактора-полимеризатора (рисунки 3, 4).

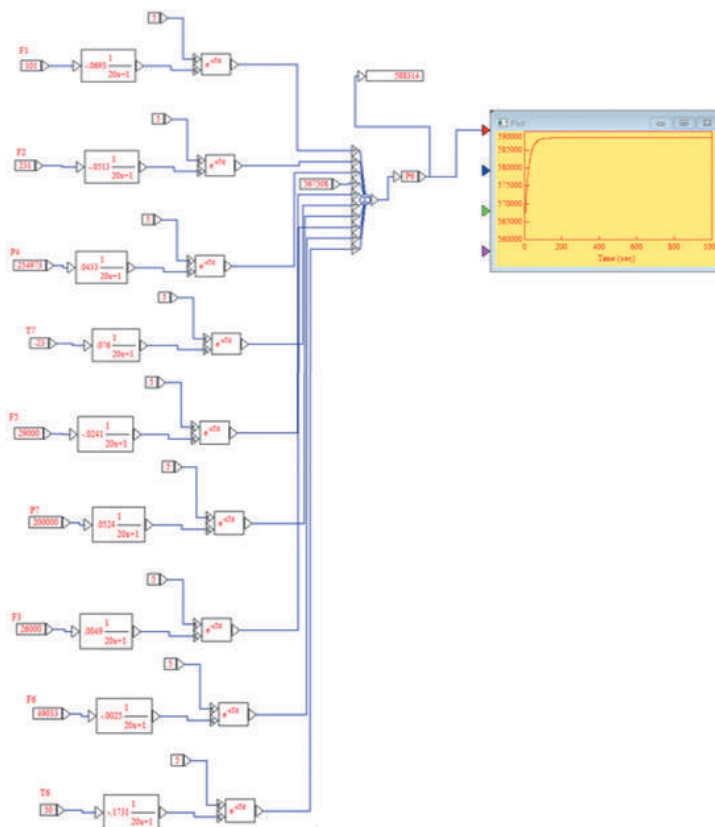
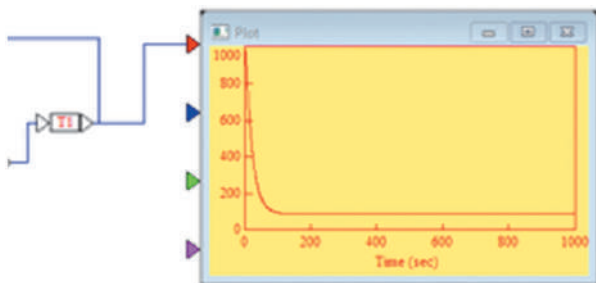
На основе полученных моделей выполняется программная реализация в рабочей среде программы VisSim и осуществляется проверка данных моделей на адекватность.

Объектом математического моделирования является реактор-полимеризатор.

На основе коэффициентов усиления соответствующих каналов передачи воздействия, а также на основе данных с трендов была проведена проверка структурных и параме-

Таблица 3. Коэффициенты усиления каналов передачи воздействий

Каналы передачи воздействий		P6	T1	Каналы передачи воздействий		P6	T1
(K1)	F1	-0,0693	-0,04	(K11)	P7	0,05237	0
(K2)	P1	0	0	(K12)	T2	0	0
(K3)	T5	0	0	(K13)	T3	0	0
(K4)	F2	-0,0513	-0,0519	(K14)	P8	0	0
(K5)	P2	0	0	(K15)	F3	0,00489	0,01749
(K6)	T4	0	-0,2974	(K16)	F6	-0,0025	-0,0169
(K7)	F4	0	-0,0772	(K17)	F7	0	0
(K8)	P4	0,04328	0	(K18)	T6	-0,1731	-0,1266
(K9)	T7	0,076	-0,055	Свободный член		567508	979,085
(K10)	F5	-0,0241	-0,0166				

**Рисунок 3.** Структурно-параметрическая модель параметра P6 реактора-полимеризатора**Рисунок 4.** Проверка на адекватность структурно-параметрической модели параметра T1 реактора-полимеризатора

трических моделей реактора-полимеризатора на адекватность. На выходе были получены установившиеся значения температуры суспензии ПВХ и давления суспензии поливинилхлорида.

Вывод

В ходе данной работы были выявлены входные и выходные параметры реактора, определены коэффициенты корреляции, выявлены сильные взаимосвязи параметров, рассчитаны коэффициенты усиления соответствующих каналов передачи воздействия, реализованы модели концептуального, топологического уровней, а также собрана и проверена на адекватность структурно-параметрическая модель.

В дальнейшем полученные модели будут использованы для реализации каскадного контура регулирования.

Список литературы

1. Шулаева Е.А. Совершенствование эффективных технологических производств на основе моделирования процессов химических технологий. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2018. 263 с.

2. Шулаева Е.А., Шулаев Н.С., Коваленко Ю.Ф. Моделирование производства поливинилхлорида суспензионным способом: учеб. пособие. Стерлитамак: Изд-во ООО «Полиграфия», 2017. 203 с.

3. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F., Shulaev N.S. Simulation and Modeling Software in Chemical Technology: Polymerization of Vinyl Chloride // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040. P. 581–584.

4. Shulaeva E.A., Shulayev N.S., Kovalenko Ju.F. Computer Modelling of Organic and Inorganic Chemistry Processes // *Advances in Intelligent Systems Research: 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019)*. 2019. Vol. 166. pp. 230–236.

5. Шулаева Е.А., Шулаев Н.С., Коваленко Ю.Ф. Компьютерное моделирование технологических процессов // *Бутлеровские сообщения*. 2018. Т. 54. № 4. С. 40–55.

References

1. Shulaeva E.A. *Sovershenstvovanie effektivnykh tekhnologicheskikh proizvodstv na*

osnove modelirovaniya protsessov khimicheskikh tekhnologii [Improvement of Effective Technological Production Based on Modeling of Chemical Technology Processes]. Ufa, Izd-vo «Neftegazovoe delo», 2018. 263 p. [in Russian].

2. Shulaeva E.A., Shulaev N.S., Kovalenko Yu.F. *Modelirovanie proizvodstva polivinilkhlorida suspenzionnym sposobom: ucheb. posobie* [Modeling of Polyvinyl Chloride Production by Suspension Method: Manual]. Sterlitamak, Izd-vo ООО «Poligrafiya», 2017. 203 p. [in Russian].

3. Shulaeva E.A., Kovalenko Yu.F., Shulaev N.S. Simulation and Modeling Software in Chemical Technology: Polymerization of Vinyl Chloride. *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 1040, pp. 581–584.

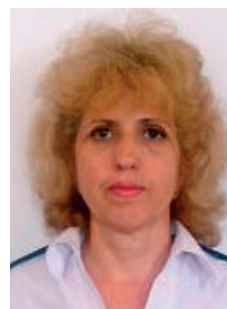
4. Shulaeva E.A., Shulayev N.S., Kovalenko Ju.F. Computer Modelling of Organic and Inorganic Chemistry Processes. *Materials of 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019) «Advances in Intelligent Systems Research»*. 2019. Vol. 166. pp. 230–236.

5. Shulaeva E.A., Shulaev N.S., Kovalenko Yu.F. Komp'yuternoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov [Computer Simulation of Technological Processes]. *Butlerovskie soobshcheniya — Butler's Messages*. 2018, Vol. 54, No. 4, pp. 40–55. [in Russian].



Дегтярев А. В.
Degtyarev A. V.

*аспирант, ФГБОУ ВО «Керченский
государственный морской
технологический университет»,
г. Керчь, Российская Федерация*



Козаченко Л. Н.
Kozachenko L. N.

*аспирант, ФГБОУ ВО «Керченский
государственный морской
технологический университет»,
г. Керчь, Российская Федерация*



Соболев А. С.
Sobolev A. S.

*аспирант, ФГБОУ ВО «Керченский
государственный морской
технологический университет»,
г. Керчь, Российская Федерация*



Антипенко И. В.
Antipenko I. V.

*аспирант, ФГБОУ ВО «Керченский
государственный морской
технологический университет»,
г. Керчь, Российская Федерация*

УДК 681.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-3-100-105

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МАНЕВРИРОВАНИЯ СУДНА В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННО СЛОЖНОЙ СИТУАЦИИ

Ранее предпринятые попытки разработать систему поддержки принятия решения к успеху не привели из-за отсутствия методологического обеспечения по большинству решаемых задач выбора маневра. В силу указанных причин требуются специальные знания об объекте управления и понимание объективных законов маневрирования судов, которые позволят приобрести теоретические знания по методологии проведения морских операций. Отсутствие единого подхода к изучению и исследованию процессов маневрирования, методов учета данных о динамических свойствах судна при планировании его движения, а также единой концепции организации и функционирования системы управления сдерживает развитие новой техники судостроения. При сложившихся обстоятельствах исследования, направленные на совершенствование теоретической базы по созданию математического обеспечения для адаптивных систем управления судном при маневрировании, являются актуальными. Целью исследования являлась разработка кинематической модели процесса движения судна в условиях информационно сложных ситуаций. Объект исследования — процессы маневрирования морским судном при выполнении морских операций в различ-

ных условиях плавания. Предмет исследования — параметры движения судна при управлении его маневрированием. Методом анализа, систематизации и схождения от общего к частному установлены факторы и причины возникновения навигационных аварий, а методы теории систем позволили определить глобальную задачу исследований и разработать концепцию ее решения для создания предпосылок по обеспечению безопасного управления маневрированием.

Ключевые слова: кинематическая модель, процесс маневрирования, судно, условия информационных сложных ситуаций.

KINEMATIC MODEL OF THE PROCESS OF SHIP MANEUVERING IN THE CONDITIONS OF AN INFORMATIONALLY COMPLEX SITUATION

Previous attempts to develop a decision support system did not lead to success due to the lack of methodological support for most of the tasks to be solved for choosing a maneuver. For these reasons, special knowledge about the object of control and understanding of the objective laws of maneuvering of ships are required, which will allow acquiring theoretical knowledge of the methodology of conducting maritime operations. The lack of a unified approach to the study and study of maneuvering processes, methods of accounting for data on the dynamic properties of a vessel when planning its movement, as well as a unified concept of organization and functioning of the control system hinders the development of new shipbuilding technology. Under the current circumstances, studies aimed at improving the theoretical base for the creation of mathematical support for adaptive control systems of a ship during maneuvering are relevant. The aim of the study was to develop a kinematic model of the process of ship movement in conditions of informationally difficult situations. The object of the research is the processes of maneuvering a sea vessel when performing sea operations in various sailing conditions. The subject of research is the parameters of the ship's movement when controlling its maneuvering. Research methods. By the method of analysis, systematization and convergence from the general to the particular, the factors and causes of the occurrence of navigation accidents were established, and the methods of systems theory made it possible to determine the global problem of research and develop a concept for its solution to create the prerequisites for ensuring safe maneuvering control.

Key words: kinematic model, maneuvering process, vessel, conditions of information complex situations.

Актуальность и цель исследования

Маневрирование связано с обработкой оператором морского объекта (МО) все увеличивающегося объема информации об объекте управления, окружающей среде и возникающих препятствиях. Это приводит к его значительной психологической напряженности при принятии решений и вызывает необходимость непрерывной адаптации к изменяющимся условиям плавания. Снижение напряженности в работе оператора достигается за счет использования навигационных систем, однако они еще далеки от совершенства из-за недостаточности и несвоевременности поступления информации, требуемой для принятия решений. Ранее предпринятые попытки разработать систему поддержки принятия решения к успеху не

привели из-за отсутствия методологического обеспечения по большинству решаемых задач выбора маневра [1–4]. В силу указанных причин требуются специальные знания об объекте управления и понимание объективных законов маневрирования судов, которые позволят приобрести теоретические знания по методологии проведения морских операций. Отсутствие единого подхода к изучению и исследованию процессов маневрирования, методов учета данных о динамических свойствах судна при планировании его движения, а также единой концепции организации и функционирования системы управления сдерживает развитие новой техники судостроения. При сложившихся обстоятельствах исследования, направленные на совершенствование теоретической базы по

созданию математического обеспечения для адаптивных систем управления судном при маневрировании, являются актуальными.

Целью исследования являлась разработка кинематической модели процесса движения судна в условиях информационно сложных ситуаций.

Объект исследования — процессы маневрирования морским судном при выполнении морских операций в различных условиях плавания.

Предмет исследования — параметры движения судна при управлении его маневрированием.

Методы исследований

Методом анализа, систематизации и схождения от общего к частному установлены факторы и причины возникновения навигационных аварий, а методы теории систем позволили определить глобальную задачу исследований и разработать концепцию ее решения для создания предпосылок по обеспечению безопасного управления маневрированием.

Результаты исследований

Приближенная кинематическая модель построена на основании проведенного исследования процесса движения при швартовках, по результатам натурных испытаний по определению маневренных характеристик. Было произведено изучение закономерностей изменения элементов движения при выполнении швартовных операций в порту и открытом море, а также из анализа опубликованных результатов других авторов по оценке характера изменения параметров [5–7], таких как курс и скорость циркуляции, угол дрейфа от порота α_n , угловая скорость ω , элементы циркуляции l_1, l_2, D_r, D_y и торможения $S(t)$ и $V(t)$, позволяют принимать следующие основные допущения.

1. Угловая скорость постоянна в процессе всей циркуляции, т.е. $\omega = \text{const}$ (рисунок 1, а):

$$d\theta = \omega \cdot dt. \quad (1)$$

2. Характер изменения скорости при циркуляции учитывается приближенно в соответствии с графиком (рисунок 1, б).

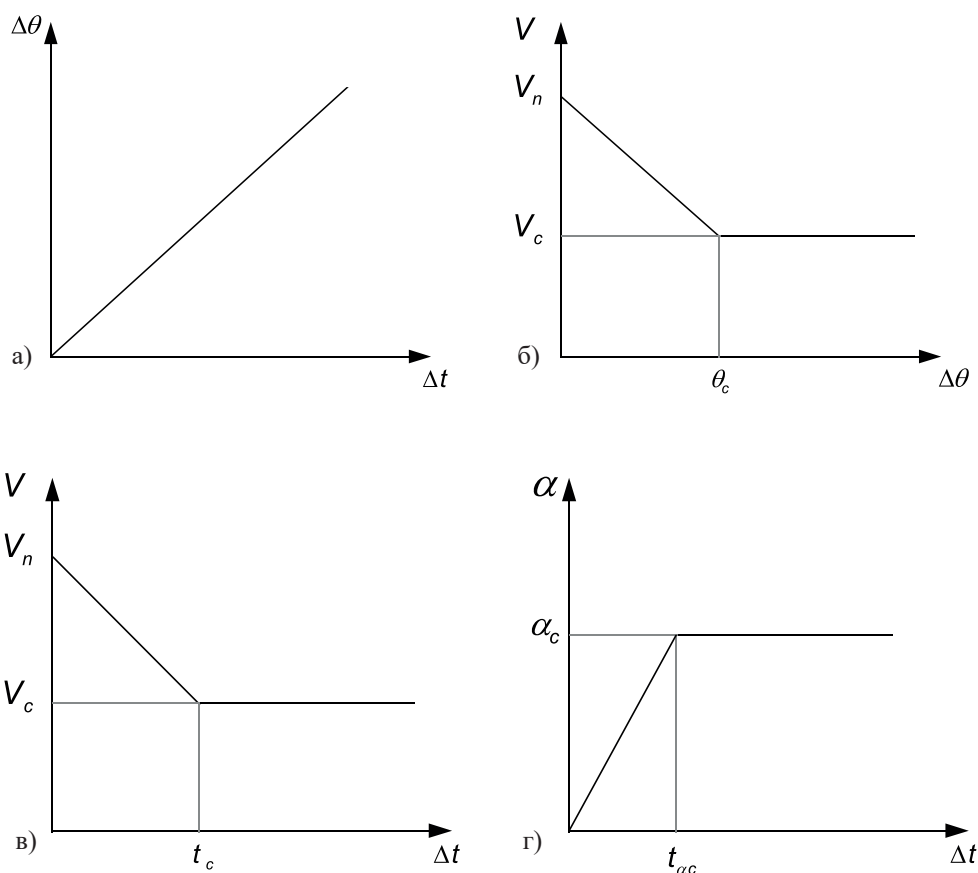


Рисунок 1. Приближенный характер изменения параметров циркуляции: угла курса во времени (а); скорости от угла изменения курса (б); скорости во времени (в); угла дрейфа во времени (г)

3. Поскольку $\omega = \text{const}$, можно все элементы движения на циркуляции выражать не в функции курса, а в функции времени Δt .

После преобразования зависимость пути S от угла изменения курса θ принимает следующий вид:

$$S(\theta) = \frac{-V_n}{4\pi \cdot \omega} \cdot \theta^2 + V_n \theta, \quad (2)$$

а при повороте на 180° уравнение принимает вид:

$$S(\pi) = \frac{3\pi}{4} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot V_n. \quad (3)$$

После преобразования уравнения движения судна на циркуляции зависимость скорости от времени будет иметь следующий вид:

$$V(t) = \frac{V_c - V_n}{\theta_c} \cdot \omega \cdot t + V_n, \quad (4)$$

где V_n — начальная скорость перед вхождением в циркуляцию;

V_c — скорость установившейся циркуляции с учетом перекладки руля δ ;

θ_c — угол, на который повернется судно, когда скорость достигнет установившегося значения;

$$\alpha = \frac{\alpha_c \cdot (V_c - V_n) \cdot \omega \cdot t}{\theta_c \cdot \left[-V_n \mp \sqrt{V_n^2 + \frac{2 \cdot (V_c - V_n)}{\theta_c} \cdot \left(\frac{V_c - V_n}{2 \cdot \theta_c} \cdot \theta_{ac}^2 + V_n \cdot \theta_{ac} \right)} \right]} \quad (6)$$

где θ_{ac} — угол, на который повернется судно, когда угол дрейфа достигнет установившегося значения.

Обработка экспериментальных данных 30 судов показывает, что при циркуляции с переложением на борт рулем угол дрейфа достигает установившегося значения α_c примерно при повороте на 90° , после преобразования уравнения (6) получаем следующую зависимость:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \alpha_c}{\pi} \cdot \omega \cdot t. \quad (7)$$

5. Приближенно можно считать процесс торможения равнозамедленным, т.е. коэффициент активности торможения можно считать равным 1. С учетом этого уравнение торможения принимает следующий вид:

$$V(t) = -\frac{V_n^2}{2 \cdot S_{ар}} \cdot t + V_n, \quad (8)$$

$$\omega — \text{угловая скорость, } \omega = \frac{V_c}{D_y / 2};$$

D_y — диаметр установившейся циркуляции.

Обработка экспериментальных данных 30 судов показывает, что при циркуляции с рулем на борту скорость падает до половины примерно при повороте на угол $\theta = 180^\circ$.

С учетом уравнения (2) и после преобразования уравнения движения судна на циркуляции с рулем на борту уравнение (4) примет вид:

$$V(t) = \frac{-V_n}{2\pi} \cdot \omega \cdot t + V_n. \quad (5)$$

4. Характер изменения угла дрейфа на циркуляции от 0° до установившегося угла дрейфа α_c относительно времени учитывается в соответствии с графиком (рисунок 1, з).

Учитывая, что ω линейно нарастает при повороте на угол до 20° , а затем имеет постоянное значение в процессе всей циркуляции, и после преобразований уравнений (3)–(5) изменение угла дрейфа на циркуляции относительно времени примет следующий вид:

где $S_{ам}$ — тормозной путь, определяется экспериментально-расчетным методом.

На основании вышеизложенного была разработана кинематическая математическая модель движения судна, структурная схема которой приведена на рисунке 2. С учетом приведенных зависимостей разработана программа KINMO на языке C++. Она разработана с использованием принципов объектно-ориентированного программирования. Программа позволяет проигрывать маневры расхождения с несколькими судами одновременно. Она позволяет также получить пеленги и дистанции до встречных судов в момент маневрирования собственного судна. Необходимые изменяющиеся параметры движения судов можно непосредственно видеть на экране монитора, а также вызывая файл записи результатов маневрирования

после остановки программы. Наличие человека в контуре управления морского объекта (МО) приводит к существенной зависимости результатов управления от его психофизиологических и эвристических характеристик. При наличии ограничений активности и при множественных возмущениях для ОМО создаются информационно-сложные ситуации (ИСС), обусловленные дефицитом времени, значительными объемами необходимых вычислений, неполнотой и неопределенностью исходной информации, отсутствием обоснованных формальных процедур управления, что препятствует своевременному выявлению активности взаимодействующих МО, прогнозированию их поведения и вероятных событий в процессе маневрирования.

Указанные обстоятельства создают значительную психологическую напряженность и затрудняют принятие адекватных решений по управлению отдельными МО в целом в условиях ИСС, поскольку такие решения принимаются лицом, принимающим решения (ЛПР), в значительной мере на основе

собственного опыта и «здравого смысла», что приводит к возникновению различного рода инцидентов и критических ситуаций, которые принято классифицировать как «влияние человеческого фактора». Как следствие, создается риск экономических, экологических и даже человеческих потерь — известно, что цена ошибки ОМО в таких ситуациях может быть непомерно высока. Примеры тому могут быть обнаружены во многих технических, организационно-технических, военно-технических, организационно-экономических и других системах. Так, существует обширный класс подвижных объектов: морских надводных и подводных, воздушных, сухопутных, целенаправленно перемещающихся в пространстве и управляемых оператором или группой операторов. Актуальным способом снижения зависимости от «человеческого фактора», минимизации возможных ошибок в ИСС, и, следовательно, количества критических и опасных ситуаций, является автоматизация процессов управления.

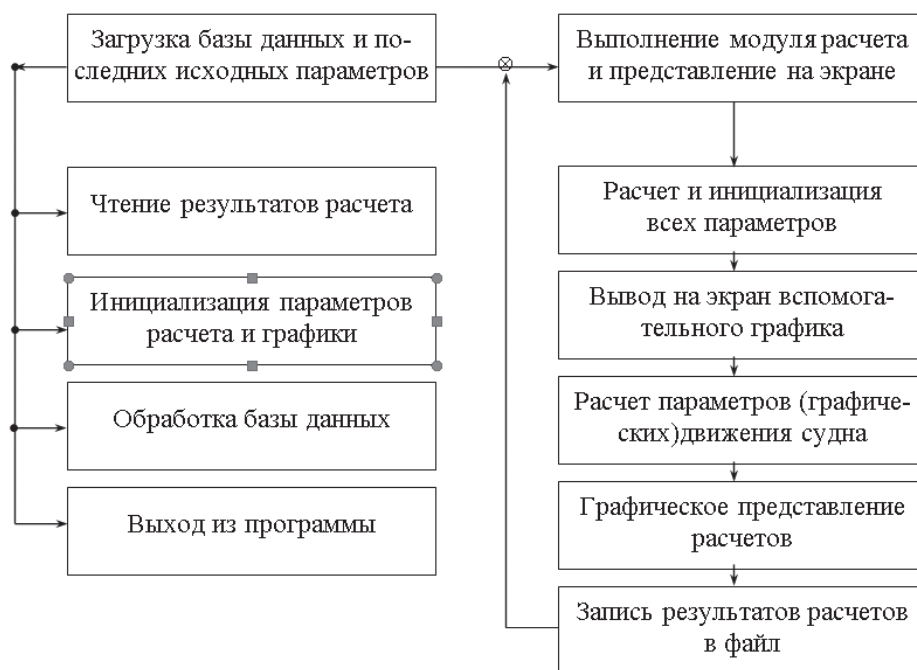


Рисунок 2. Структурная схема кинематической математической модели

Выводы

В результате полученных исследований установлено: точность планирования траектории маневрирования по координатам характерных

опорных точек, характеристикам торможения и поворотливости обеспечивается путем определения исходной точки начала маневрирования по координатам конечной (инверсный метод).

Список литературы

1. Бекенский Б.В. Практические расчеты мореходных качеств судна. М.: Транспорт, 1974. 264 с.
2. Благовещенский С.Н., Холодилилин А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Л.: Судостроение, 1975. Т. 2. Динамика корабля. 176 с.
3. Благовещенский С.Н., Холодилилин А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Л.: Судостроение, 1976. Т. 1. Статика корабля. 336 с.
4. Васильев А.В. Управляемость судов. Л.: Судостроение, 1989. 328 с.
5. Жиленков А.А., Черный С.Г. Система отказоустойчивого управления критически важными объектами морского транспорта с элементами интеллектуального управления // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 6 (163). С. 38–42.
6. Бородин Е.Л., Биденко С.И., Черный С.Г., Елизаров Д.А., Шестаков В.М. Идентификация оптических образов объектов в системах наблюдения беспилотных подводных аппаратов // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 1 (94). С. 83–87.
7. Вынгра А.В., Комиссаров Д.Р., Черный С.Г. Физическое моделирование автоматизированной системы управления креном судна // Системы управления и обработки информации. 2020. № 3 (50). С. 40–49.

References

1. Bekenskii B.V. *Prakticheskie rascheti morekhodnykh kachestv sudna* [Practical Calculations Seaworthy Qualities of the Vessel]. Moscow, Transport Publ., 1974. 264 p. [in Russian].
2. Blagoveshchenskii S.N., Kholodilin A.N. *Spravochnik po statike i dinamike korablya*

[Handbook of Ship Statics and Dynamics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975. Vol. 2. *Dinamika korablya* [Ship Dynamics]. 176 p. [in Russian].

3. Blagoveshchenskii S.N., Kholodilin A.N. *Spravochnik po statike i dinamike korablya* [Handbook of Ship Statics and Dynamics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1976. Vol. 1. *Statika korablya* [Ship Statics]. 336 p. [in Russian].

4. Vasil'ev A.V. *Upravlyaemost' sudov* [Ship Handling] Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989. 328 p. [in Russian].

5. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Sistema otkazoustoichivogo upravleniya kriticheski vazhnymi ob'ektami morskogo transporta s elementami intellektual'nogo upravleniya [Fault-Tolerant Control System for Critical Objects of Sea Transport with Intelligent Control Elements]. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya — Legislative and Applied Metrology*, 2019, No. 6 (163), pp. 38-42. [in Russian].

6. Borodin E.L., Bidenko S.I., Chernyi S.G., Elizarov D.A., Shestakov V.M. Identifikatsiya opticheskikh obrazov ob'ektov v sistemakh nablyudeniya bespilotnykh podvodnykh apparatov [Identification of Optical Images of Objects in Observation Systems of Unmanned Underwater Vehicles]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta — Operation of Marine Transport*, 2020, No. 1 (94), pp. 83–87. [in Russian].

7. Vyngra A.V., Komissarov D.R., Chernyi S.G. Fizicheskoe modelirovanie avtomatizirovannoi sistemy upravleniya krenom sudna [Physical Modeling of an Automated Ship Roll Control System]. *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii — Control Systems and Information Processing*, 2020, No. 3 (50), pp. 40–49. [in Russian].

ОБ АВТОРАХ

Агуреев Александр Владимирович

инженер-конструктор 3-й категории, Акционерное общество «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», г. Таганрог, Российская Федерация

Антипенко Инна Викторовна

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Ахмеджанов Фарит Маратович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование одежды», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Бордюг Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Будеева Ольга Николаевна

кандидат исторических наук, заведующая кафедрой «Технология и конструирование одежды», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Васильев Петр Игоревич

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Гарафутдинов Дамир Разифович

студент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Губарев Дмитрий Егорович

инженер-конструктор 3-й категории, Акционерное общество «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», г. Таганрог, Российская Федерация

Дегтярев Андрей Владимирович

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Зайнутдинова Лариса Хасановна

доктор педагогических наук, действительный член Академии электротехнических наук РФ, профессор кафедры электротехники, электроники и автоматики, руководитель научно-образовательного центра «Альтернативная энергетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет», г. Астрахань, Российская Федерация

Зикий Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация

Иванова Ольга Владимировна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Квиринг Маргарита Дмитриевна

студент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Козаченко Любовь Николаевна

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Короткова Людмила Николаевна

кандидат химических наук, доцент кафедры «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Кочубей Алексей Сергеевич

инженер-конструктор 3-й категории, Акционерное общество «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», г. Таганрог, Российская Федерация

Крымский Виктор Григорьевич

доктор технических наук, профессор Института экономики и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Купцов Даниил Викторович

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Марченко Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Муравьева Елена Александровна

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированные технологические информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Саттаров Роберт Радикович

доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Сатчихина Любовь Александровна

магистрант кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

Соболев Александр Сергеевич

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Солодилова Наталья Зиновьевна

доктор экономических наук, профессор, директор Института экономики и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Труднев Сергей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические установки и электрооборудование судов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Фаттахов Мухарям Миннирович

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги и технология строительного производства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Феоктистов Евгений Алексеевич

студент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», г. Долгопрудный, Российская Федерация

Феоктистов Николай Алексеевич

заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор Московского государственного университета дизайна и технологий, г. Москва, Российская Федерация

Хазиева Регина Тагировна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Халиков Рауф Музагитович

кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Хлебцов Алексей Павлович

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет», г. Астрахань, Российская Федерация

Шилин Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация

Шулаева Екатерина Анатольевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Agureev Aleksandr V.

Design Engineer, Joint Stock Company «Taganrog Scientific-Research Institute of Communication», Taganrog, Russian Federation

Akhmedzhanov Farit M.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Technology and Design of Clothes Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Antipenko Inna V.

Post-Graduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Bordyug Aleksandr S.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Equipment for Ships and Production Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Budeeva Olga N.

Cand. Sci. Hist., Head of Technology and Design of Clothes Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Degtyarev Andrey V.

Post-Graduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Fattachov Mucharyam M.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Roads and Construction Technology Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Feoktistov Evgeny A.

Student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)», Dolgoprudny, Russian Federation

Feoktistov Nikolay A.

Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. Sci. Tech., Professor of the Moscow State University of Design and Technology, Moscow, Russian Federation

Garafutdinov Damir R.

Student of Electromechanics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Gubarev Dmitry E.

Design Engineer, Joint Stock Company «Taganrog Scientific-Research Institute of Communication», Taganrog, Russian Federation

Hazieva Regina T.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Ivanova Olga V.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Management and Service in Technical Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Khalikov Rauf M.

Cand. Sci. Chem., Associate Professor, Assistant Professor of Roads and Construction Technology Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Khlebtsov Alexey P.

Post-Graduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan State University», Astrakhan, Russian Federation

Kochubey Alexey S.

Design Engineer, Joint Stock Company «Taganrog Scientific-Research Institute of Communication», Taganrog, Russian Federation

Korotkova Lyudmila N.

Cand. Sci. Chem., Associate Professor, Assistant Professor of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Kozachenko Lyubov N.

Post-Graduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Krymsky Viktor G.

Dr. Sci. Tech., Professor of Institute of Economics and Service, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Kupcov Daniil V.

Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Kviring Margarita D.

Student of Automated Process and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Sterlitamak Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Marchenko Alexey A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Power Plants and Electrical Equipment of Ships Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Muraveva Elena A.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Automated Process and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Satchikhina Lyubov A.

Undergraduate Student of Automated Technological and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Sattarov Robert R.

Dr. Sci. Tech., Professor of Electromechanics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation

Shilin Aleksandr N.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Electrical Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University», Volgograd, Russian Federation

Shulaeva Ekaterina A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Automated Technological and Information Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

Sobolev Aleksandr S.

Post-Graduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kerch State Maritime Technological University», Kerch, Russian Federation

Solodilova Natalia Z.

Dr. Econ., Professor, Director of the Institute of Economics and Service, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Trudnev Sergey Yu.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Power Plants and Electrical Equipment of Ships Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kamchatka State Technical University», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

Vasiliev Petr I.

Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Zainutdinova Larisa Kh.

Dr. Sci. Ped., Full Member of the Academy of Electrical Sciences of RF, Professor of Electrical Engineering, Electronics and Automation Department, Head of the Scientific and Educational Center «Alternative Energy», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan State University», Astrakhan, Russian Federation

Zikiy Anatoliy N.

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher, Assistant Professor of Information Security of Telecommunication Systems Department, Institute of Computer Technologies and Information Security, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», Taganrog, Russian Federation

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.