

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 2, т. 18, 2022

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)



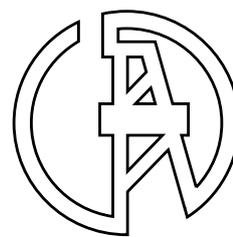
Electrical and data processing facilities and systems

№ 2, т. 18, 2022



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



УГНТУ

№ 2, т. 18, 2022

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

Учредитель

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

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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

Члены редакционной коллегии:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



Зам. главного редактора:

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

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте www.ugnes.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, 2022.

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

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 03.08.2022 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18.25.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 105.

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.

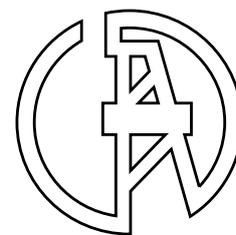
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

№ 2, v. 18, 2022

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

Founder

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

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

International standard serial number ISSN 1999-5458.

Editorial board:

Editor-in-chief:

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

Members of an editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Deputy editor-in-chief:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



Assistant editor: P. I. Vasiliev
Technical editor: S. V. Khalitova

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

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

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2022.

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

Tel. (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 03.08.2022 Paper format 60×84/8. Offset printing. 18.25 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 105.

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Андреев А.А.</i> Моделирование переходного процесса в распределительной сети 10 кВ при однофазном замыкании на землю	5
<i>Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Каекбирдина И.Д., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т.</i> Разработка схемы и моделирование резонансного трансформатора на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента	13
<i>Баширова Э.М., Жаринов Ю.А., Терентьев А.А.</i> Применение нейронных сетей для решения задач прогнозирования технического состояния электроэнергетического оборудования	21
<i>Ковалев В.З., Хусаинов Э.И., Балыклов Е.С., Архипова О.В., Хамитов Р.Н., Глазырин А.С.</i> Цифровой двойник погружного электродвигателя на основе методов планирования эксперимента	32
<i>Сираев Ф.Ф., Хазиева Р.Т.</i> Исследование частотно-регулируемого электропривода с асинхронным электродвигателем	45
<i>Сорокин А.В., Шабанов В.А.</i> Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью	52
<i>Ле Ван Тунг, Данг Нгок Хюу, До Чи Тхань, Буй Чунг Кьен.</i> Повышение коэффициента мощности и уменьшение гармоник тока источника питания в системе электропривода конвейеров	63
<i>Шабанов В.А., Басырова А.А., Кантюков Н.Р.</i> Оценка устойчивости синхронных двигателей в плоскости двух углов	73
<i>Яшин А.Н., Бодылев А.С., Хазиева Р.Т., Хакимьянов М.И.</i> Лабораторная установка для исследования применения возобновляемых источников энергии	82
ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	
<i>Беляев А.С., Филипас А.А., Курганов В.В., Поберезкин Н.И.</i> Четырехтрехосовая система обезвешивания с управлением по вектору силы	98
<i>Зайцева А.А., Дудаев Н.О., Зайцев Е.А., Кильмаков Д.К.</i> Высокопроизводительный вычислительный комплекс для интеллектуальной транспортной системы	107
<i>Зиненко А.И., Каримов Н.А.</i> Анализ способов проектирования структурированных кабельных систем	121
<i>Крымский В.Г., Ахмеджанов Ф.М.</i> Использование интервальных моделей неопределенностей для оценки надежности человека-оператора с помощью метода SLIM	128
<i>Сибатуллин Р.Р.</i> Информационная система для развития инновационной среды Компании	139
Об авторах	148

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Andreev A.A.</i> Simulation of a transient process in a 10 kV distribution network with a single-phase earth fault	5
<i>Aflyatunov R.R., Vasilyev P.I., Kaekbirdina I.D., Kirillov R.V., Khazieva R.T.</i> Development of the circuit and simulation of a resonant transformer based on a multifunctional integrated electromagnetic component	13
<i>Bashirova E.M., Zharinov Yu.A., Terentyev A.A.</i> Application of neural networks for solving problems of forecasting technical conditions of electric power equipment	21
<i>Kovalev V.Z., Husainov E.I., Balyklov E.S., Arhipova O.V., Khamitov R.N., Glazyrin A.S.</i> Digital twin of a submersible electric motor based on design of experiments methods	32
<i>Siraev F.F., Khazieva R.T.</i> Investigation of a frequency-regulatory electric drive with asynchronous electric motor	45
<i>Sorokin A.V., Shabanov V.A.</i> Algorithm for determining the damaged phase during a single-phase earth fault in networks with an isolated neutral	52
<i>Le Van Tung, Dang Ngoc Huy, Do Chi Thanh, Bui Trung Kien.</i> Improving the power factor and reducing the harmonics of the power supply current in the electric drive system of conveyors	63
<i>Shabanov V.A., Basyrova A.A., Kantyukov N.R.</i> Assessment of the stability of synchronous motors in the plane of two angles	73
<i>Yashin A.N., Bodayev A.S., Khazieva R.T., Khakimyanov M.I.</i> Laboratory facility for studying the application of renewable energy sources	82

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Belyaev A.S., Filipas A.A., Kurganov V.V., Poberezkin N.I.</i> Four-rope suspension system with force vector control	98
<i>Zaitseva A.A., Dudaev N.O., Zaitsev E.A., Kilmakov D.K.</i> High-performance computing complex for intelligent transport system	107
<i>Zinenko A.I., Karimov N.A.</i> Analysis of methods for designing structured cable systems	121
<i>Krymsky V.G., Akhmedzhanov F.M.</i> Application of interval models of uncertainties to assessing human operator reliability by SLIM method	128
<i>Sibagatullin R.R.</i> Information system for the development of the innovative environment of the Company	139
About the Authors	148



Антон Андреевич Андреев
Anton A. Andreev

аспирант,
Тольяттинский государственный университет,
Тольятти, Россия

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-5-12

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 10 КВ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

Актуальность

В настоящий момент отыскание однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью является проблемой с неоднозначными решениями. Существующие устройства защиты от замыканий на землю актуальны только в частных случаях. В сетях с большим количеством отходящих присоединений и разветвленной схемой данные защиты не способны обеспечить абсолютно селективного срабатывания, поэтому обозначенная проблема особенно актуальна для городских электрических сетей, так как эти сети характеризуются и массовостью линий, и разнородным характером нагрузки. Сложностью в выявлении повреждения также является скрытность пролегания линий электропередачи, так как в данных сетях они преимущественно выполнены кабелями. Для однозначного определения замыкания на землю в городских распределительных сетях чаще всего применяются защиты от замыканий на землю в совокупности с методом последовательного отключения. Применение данного метода значительно облегчает определение замыкания на землю, но при этом он носит деструктивный характер по отношению к электроснабжению потребителей. Так как городские распределительные сети осуществляют снабжение электрической энергией густонаселённых районов, то данный недостаток ещё больше обостряет сложившуюся проблему. Для того, чтобы ограничить данные негативные последствия, возможно производить переключения по перегруппированию сети на участки. Подобные переключения позволят быстрее определить поврежденную линию и исключить кратковременные отключения потребителей в ходе поиска замыкания на землю. Однако применение данного метода сопровождается переключениями в распределительной сети во время однофазного замыкания на землю. Поэтому необходимо исследование переходного процесса, возникающего при подобных переключениях в распределительных сетях 10 кВ, с целью проверки применимости подобных переключений. Также данное исследование задаст вектор дальнейшим научным исследованиям в этой области.

Цель исследования

Моделирование переходного процесса, возникающего при объединении сетей 10 кВ на параллельную работу во время однофазного замыкания на землю.

Методы исследования

Методологической основой в данной статье является математическое имитационное моделирование.

Результаты

Рассмотрены перенапряжения, возникающие при переключениях в сети 10 кВ, во время замыкания на землю. Произведен их анализ и условия применимости

переключений, выполняемых при определении замыкания на землю в распределительных кабельных сетях.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, электроснабжение, изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль, кабельные линии

SIMULATION OF A TRANSIENT PROCESS IN A 10 KV DISTRIBUTION NETWORK WITH A SINGLE-PHASE EARTH FAULT

Relevance

At the moment, finding single-phase earth faults in networks with isolated and compensated neutral is still a problem with ambiguous solutions. Existing earth fault protection devices are relevant only in special cases. In networks with a large number of outgoing connections and an extensive circuit, these protections are not able to provide absolutely selective triggering. Therefore, this problem is especially relevant for urban electric networks, since these networks are characterized by both the mass of lines and the heterogeneous nature of the load. Also, the difficulty in detecting damage is the secrecy of the transmission lines, since in these networks they are mainly made by cables. To unambiguously determine the earth fault, in urban distribution networks, earth fault protection is most often used in conjunction with the sequential shutdown method. The use of this method greatly facilitates the determination of an earth fault, but at the same time it is destructive in relation to the power supply of consumers. Since urban distribution networks supply densely populated areas with electric energy, this disadvantage further exacerbates the existing problem. In order to limit these negative consequences, it is possible to make switches by regrouping the network into sections. Such switching will allow you to quickly identify a damaged line and eliminate short-term disconnections of consumers during the search for a ground fault. However, the application of this method is accompanied by switching in the distribution network during a single-phase earth fault. Therefore, it is necessary to study the transient process that occurs during such switching in 10 kV distribution networks in order to verify the applicability of such switching. Also, this study will set the vector for further scientific research in this area.

Aim of research

Simulation of the transient process that occurs when combining 10 kV networks for parallel operation during a single-phase earth fault.

Research methods

The methodological basis in this article is mathematical simulation modeling.

Results

Overvoltages arising during switching in a 10 kV network during a ground fault are considered. Their analysis and the conditions of applicability of the switches performed when determining the earth fault in distribution cable networks are carried out.

Keywords: single-phase earth faults, power supply, isolated neutral, compensated neutral, cable lines

Исходя из статистических данных и накопившегося опыта электроснабжающих организаций, известно, что наиболее повреждаемыми элементами системы электроснабжения являются линии электропередачи (ЛЭП) [1]. В свою очередь, наиболее распространенным видом повреждения ЛЭП являются однофазные

замыкания на землю (ОЗЗ) [2]. Устранение данных повреждений занимает особое место в распределительных сетях, работающих с изолированным и компенсированным режимами нейтрали, так как существующие устройства защиты до сих пор не способны обеспечить абсолютной селективной работы [3]. Это особенно

актуально для городских распределительных сетей, выполненных кабельными линиями, так как ОЗЗ в сети нежелательно отключать до момента выявления поврежденной линии. При возникновении ОЗЗ на отходящем присоединении условной городской подстанции срабатывает защита контроля изоляции соответствующей секции. Так как данная защита указывает только на наличие замыкания на землю, то она будет в работе до тех пор, пока поврежденное присоединение не будет отключено, и не прекратится смещение нейтрали [4]. Соответственно, для выявления поврежденного кабеля необходимо предварительно произвести либо соответствующие переключения по резервированию потребителей, либо пользоваться методом последовательного отключения [5]. В настоящий момент использование метода последовательного отключения является нежелательным для городских потребителей электрической энергии. Поэтому необходимо рассмотреть варианты применения метода перегруппирования и деления сети на участки для городских распределительных сетей. Ступенчатая структура данных сетей, выполненных по двухлучевой конфигурации схемы, позволяет широко маневрировать схемой электроснабжения [6-9]. Так, при замыкании на одном из присоединений городской подстанции возможно произвести перевод нагрузки данного присоединения на другой ввод. Это позволит проверить данное присоединение на наличие либо отсутствие замыкания без его отключения и тем самым значительно ускорить поиск ОЗЗ. Однако данный метод требует кратковременного включения секционного выключателя, который объединит секцию с ОЗЗ с секцией, работающей в нормальном режиме. Поэтому необходимо рассмотреть переходные процессы, возникающие в распределительной сети при соответствующих переключениях [10, 11].

Моделирование переходного процесса

Перед проведением имитационного моделирования необходимо рассмотреть часть городской распределительной сети 10 кВ, работающей с изолированной нейтралью. Электрическая энергия от системы (С) посредством линий электропередачи (Л1, Л2) поступает на силовые трансформаторы главной понизительной подстанции (ГПП) (рисунок 1).

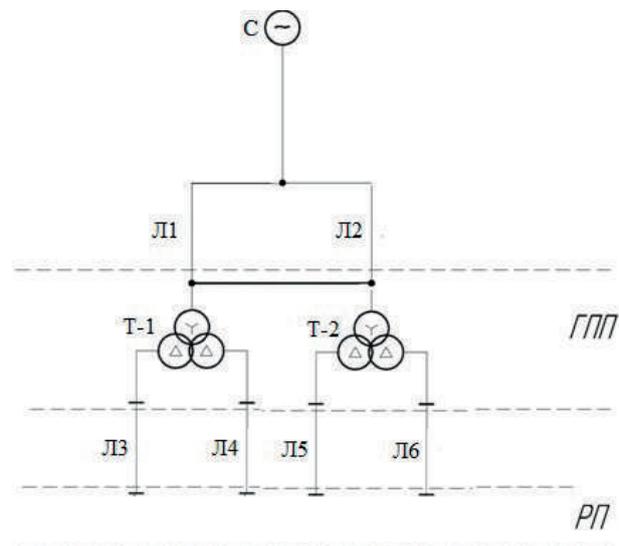


Рисунок 1. Упрощенная электрическая схема участка городской сети

Figure 1. Simplified electrical diagram of a section of the city network

Далее от шин низкого напряжения этих трансформаторов электрическая энергия передается по кабельным линиям (Л3, Л4, Л5, Л6) на распределительные пункты (РП) и распределяется по цепочкам соответствующих трансформаторных подстанций. Данная однолинейная схема является упрощенной, так как система представлена в виде одного элемента, а распределительная сеть из трансформаторных подстанций не представлена с целью предотвращения загромождения схемы. Схема математической модели данной сети представлена на рисунке 2.

Моделирование производится в программной среде Matlab с расширенным

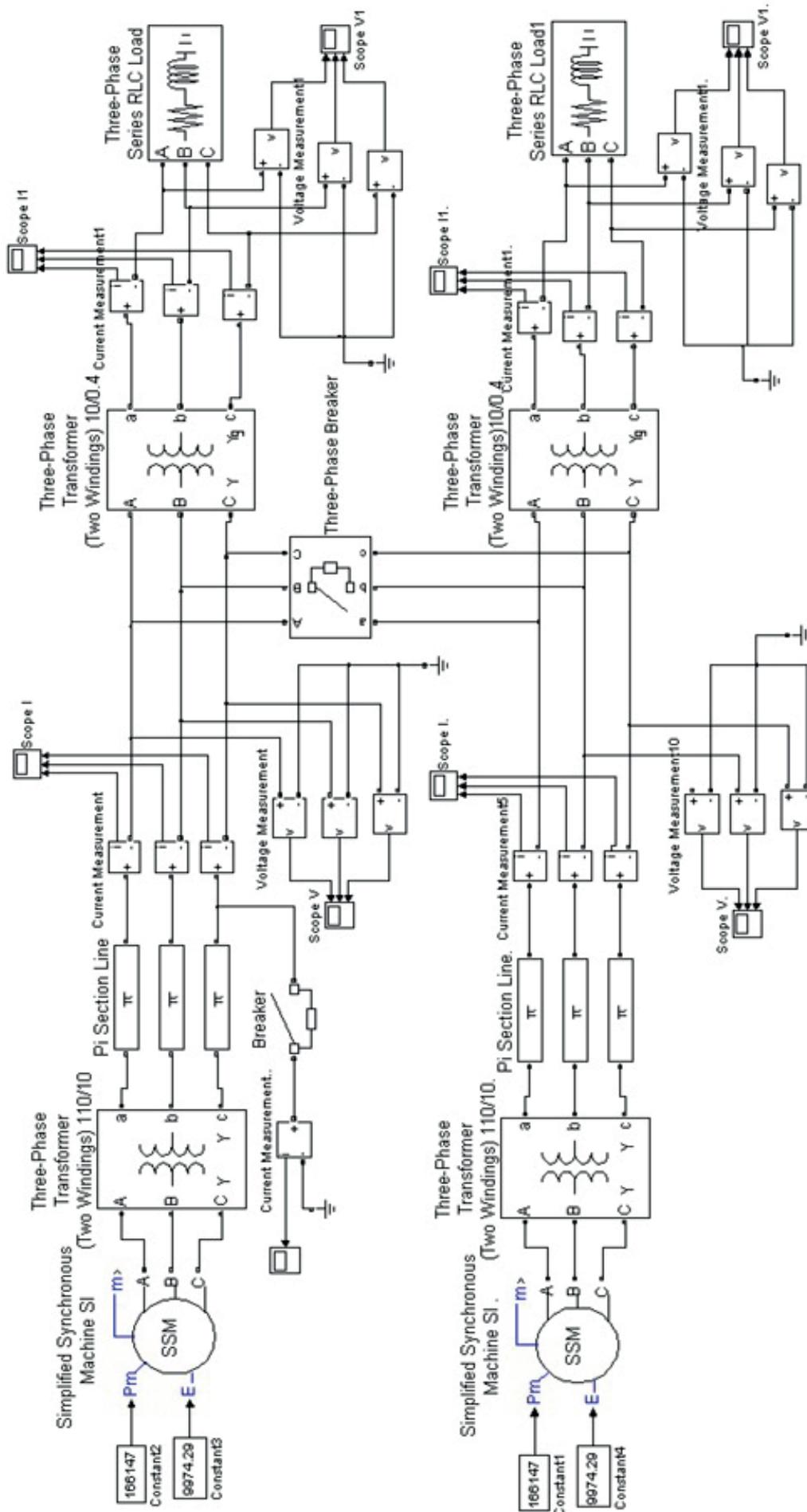


Рисунок 2. Имитационная модель участка городской электрической сети

Figure 2. Simulation model of a section of the city electrical network

пакетом Simulink [12]. Переключение представляет собой включение секционного выключателя во время однофазного замыкания на землю на одной из секций. Генераторы в системе представлены блоками — Simplified Synchtonous Machine. Мощность данного блока задана 1 ГВА с целью его отождествления с источником бесконечной мощности. Напряжение генерации задано 110 кВ для упрощения схемы и исключения промежуточной ступени трансформации. Понижающие трансформаторы 110/10 кВ на ГПП — Three-Phase Transformer 110/10. Обмотка низкого напряжения соединена звездой без земли, что соответствует сети с изолированной нейтралью. Кабельная ЛЭП представлена блоком — PI Section Line. Параметры данного блока подобраны под кабель АВВГ 3х120. По справочнику [13] были определены погонные сопротивления и погонная емкостная проводимость. Для внесения этих данных в блок параметров необходимо их привести к эталонным единицам измерения. Расчет погонной индуктивности кабельной линии производится по формуле:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f},$$

$$L = \frac{0,081}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00025 \text{ Гн.}$$

Исходя из табличного значения емкостной проводимости, вычисляется емкостное погонное сопротивление в Ом/км:

$$X_C = \frac{1}{b_c},$$

$$X_C = \frac{1}{116 \cdot 10^{-4}} = 86,2 \text{ Ом/км.}$$

Емкостное погонное сопротивление в Ф/км вычисляется по формуле:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C},$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 86,2} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ Ф/км.}$$

Длина кабеля задана всего 1 км для наилучшей наглядности полученных результатов.

Понижающий трансформатор марки 10/0,4 кВ соответствует блоку Three-Phase Transformer 10/0,4. По своим параметрам он соответствует масляному силовому трансформатору марки ТМ 630/10/0,4 мощностью 630000 ВА соответственно. Обмотка высокого напряжения соединена звездой, а низкого — звездой с заземлённой нейтральной точкой, что соответствует сети низкого напряжения 0,4 кВ. Электропотребление несет характер активно-реактивной нагрузки, которая представлена блоком Three-Phase RLC Load. Полная мощность нагрузки подобрана с учетом неполной загрузки трансформатора:

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = S,$$

$$\sqrt{173^2 + 100^2} \approx 200 \text{ кВА.}$$

Параметры всех блоков приближены к их соответствующему реальному оборудованию [14–16]. Моделирование переходного процесса осуществляется в распределительной сети 10 кВ, работающей в режиме изолированной нейтрали. Обе части сети аналогичны по своим электрическим параметрам, соответственно, они удовлетворяют всем условиям их параллельной работы [17]. После введения данных сетей в работу производится соединение одной из кабельных ЛЭП с землёй по фазе «С». Данная коммутация производится с помощью разъединителя Breaker, что соответствует «металлическому» замыканию на землю. Таким образом, на поврежденной линии происходит повышение напряжений до линейных значений [18, 19]. Далее производится моделирование переключений, производимых для поиска возникшего ОЗЗ. Через 0,2 с включается секционный выключатель 10 кВ, выполненный блоком Three-Phase Breaker. График зависимости напряжения от времени представлен на рисунке 3.

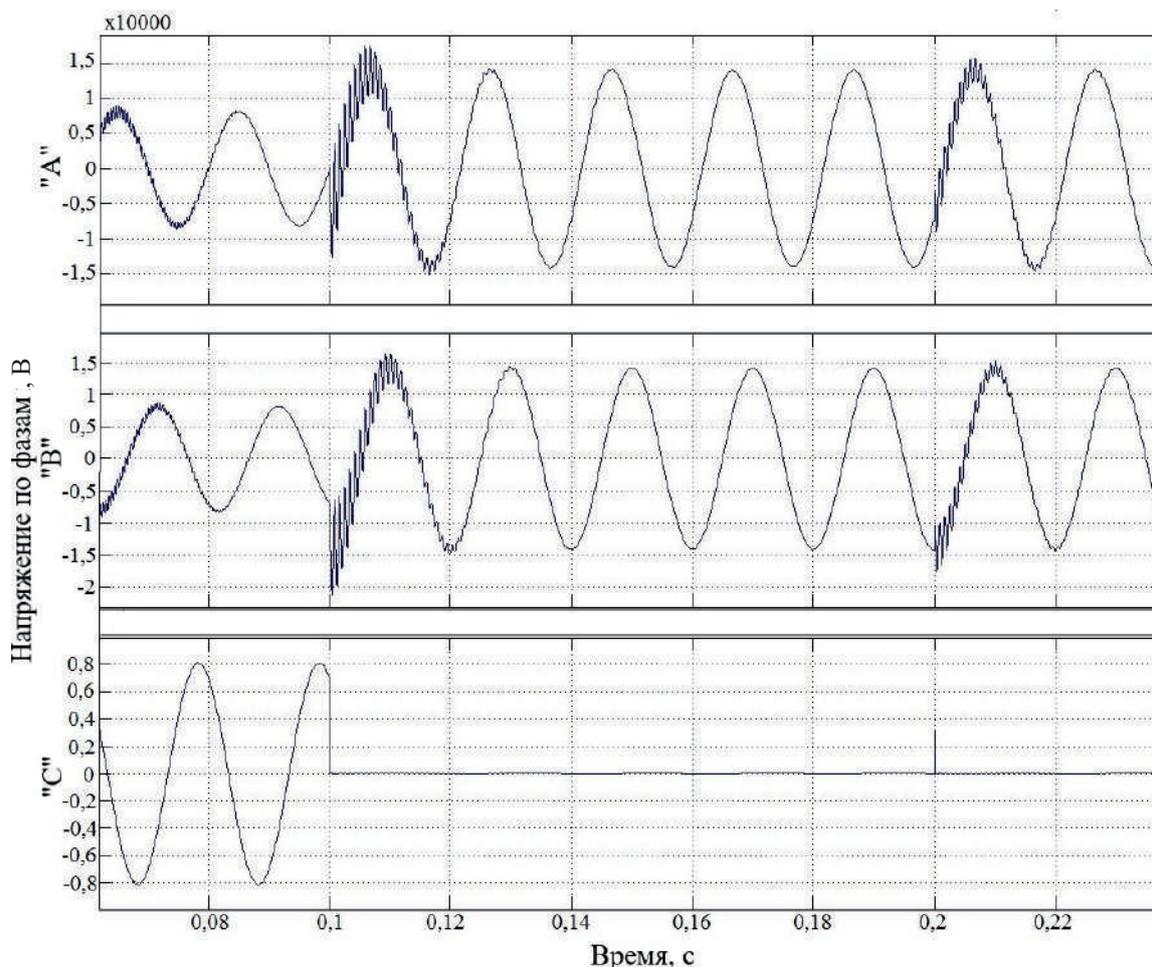


Рисунок 3. График зависимости напряжения от времени при объединении секций во время однофазных замыканий на землю

Figure 3. Graph of voltage versus time when combining sections during single-phase earth faults

Как видно, повышение напряжений во время коммутаций не превышают допустимых для изоляции значений. В момент ОЗЗ максимальное амплитудное значение напряжения достигло 20 кВ, что соответствует 14 кВ действующего значения. При включении секционного выключателя 10 кВ амплитудное значение достигает 17,5 кВ, соответствующее 12,3 кВ. На поврежденной фазе напряжение кратковременно возрастает до 3 кВ его амплитудного значения.

Следует принимать в расчет, что возникающие перенапряжения при подобных переключениях могут быть опасны для сетей с сильно изношенным изоляционным ресурсом [20–22].

Выводы

Исходя из результатов проведенного моделирования, можно сделать вывод, согласно которому кратковременное объединение распределительных сетей 10 кВ во время ОЗЗ возможно. Производство подобных переключений позволит значительно ускорить процесс поиска ОЗЗ в городских распределительных сетях, выполненных по двухлучевой конфигурации схемы. Однако следует принимать в расчет, что возникающие перенапряжения при подобных переключениях могут быть опасны для сетей с сильно изношенным изоляционным ресурсом, поэтому для подобных сетей требуется дополнительный анализ и расчет применимости данных переключений.

Список источников

1. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Монтаж, эксплуатация и ремонт оборудования промышленных предприятий и установок. Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. 464 с.
2. Андреев В.А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2017. 256 с.
3. Емельянов Н.И., Ширковец А.И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 44-50.
4. Ершов Ю.А. Электроэнергетика. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. Красноярск: СФУ, 2014. 68 с.
5. Приказ Минэнерго РФ от 30.06.2003 № 289 «Об утверждении Инструкции по предотвращению и ликвидации аварий в электрической части энергосистем».
6. Валеев И.М., Мусаев Т.А. Методика расчета режима работы системы электроснабжения городского района. Казань: КНИТУ, 2016. 132 с.
7. Yatsuk V., Mykyjchuk M., Bubela T. Ensuring the Measurement Efficiency in Dispersed Measuring Systems for Energy Objects // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. P. 131-149.
8. Bogdanov D., Farfan J., Sadovskaia K., Aghahosseini A., Child M., Gulagi A., Oyewo A.S., de Souza Noel Simas Barbosa L., Breyer C. Radical Transformation Pathway towards Sustainable Electricity via Evolutionary Steps // Nature Communications. 2019. No. 10 (1). P. 1077-1080.
9. Khan S., Khan S., Ahmed G. Industrial Power Systems. Boca Raton: CRC Press, 2016. 488 p.
10. Титков В.В., Халилов Ф.Х. Перенапряжения и молниезащита. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 2017. 222 с.
11. Dalziel C.F., Lee W. Electricity and Power Supply // IEEE Spectrum. 2018. No. 2. P. 44-50.
12. Джендубаев А.-З.Р., Алиев И.И. MATLAB, Simulink и SimPower Systems в электроэнергетике: учебное пособие. Черкесск: БИЦ СевКавГГТА, 2014. 136 с.
13. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2014. 608 с.
14. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс: СПб.: Питер, 2008. 288 с.
15. Dalziel C.F., Lee W. Electricity and Power Supply // IEEE Spectrum. 2018. No. 2. P. 44-50.
16. Герасимов А.И., Переда В.В., Переда О.Н. Моделирование в среде MATLAB-Simulink. Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. 111 с.
17. Power Supply Devices and Systems of Relay Protection [Electronic Resource]. URL: <http://www.ebook777.com/power-supply-devices-systemsrelay-protection> (дата обращения: 15.05.2022).
18. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энас, 2012. 519 с.
19. Tang Y. Voltage Stability Analysis of Power System. Singapore: Springer Singapore, 2021. 385 p.
20. Шведов Г.В. Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 268 с.
21. Zhu Y. Power System Loads and Power System Stability. Springer International Publishing, 2021. 164 p.
22. Patel D., Chothani N. Digital Protective Schemes for Power Transformer. Singapore: Springer Singapore, 2020. 193 p.
- 23.

References

1. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu. *Montazh, ekspluatatsiya i remont oborudovaniya promyshlennykh predpriyatii i ustanovok* [Installation, Operation and Repair of Equipment of Industrial Enterprises and Facilities]. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2015. 464 p. [in Russian].
2. Andreev V.A. *Releynaya zashchita sistem elektrosnabzheniya v primerakh i zadachakh* [Relay Protection of Power Supply Systems in Examples and Tasks]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2017. 256 p. [in Russian].
3. Emel'yanov N.I., Shirkovets A.I. Aktual'nye voprosy primeneniya rezistivnogo i

комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ [Topical Issues of Using Resistive and Combined Neutral Grounding in Electrical Networks 6-35 kV]. *Energoekspert — Energetics Expert*, 2010, No. 2, pp. 44-50. [in Russian].

4. Ershov Yu.A. *Elektroenergetika. Releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem* [Power Industry. Relay Protection and Automation of Electric Power Systems]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2014. 68 p. [in Russian].

5. *Prikaz Minenergo RF ot 30.06.2003 № 289 «Ob utverzhdenii Instruktsii po predotvrashcheniyu i likvidatsii avarii v elektricheskoi chasti energosistem»* [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated June 30, 2003 No. 289 «On Approval of the Instructions for the Prevention and Elimination of Accidents in the Electrical Part of Power Systems»]. [in Russian].

6. Valeev I.M., Musaev T.A. *Metodika rascheta rezhima raboty sistemy elektro-snabzheniya gorodskogo raiona* [Calculating Methodology for the Operation Mode of the Power Supply System of an Urban Area]. Kazan, KNITU Publ., 2016. 132 p. [in Russian].

7. Yatsuk V., Mykyjchuk M., Bubela T. Ensuring the Measurement Efficiency in Dispersed Measuring Systems for Energy Objects. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2019, pp. 131-149.

8. Bogdanov D., Farfan J., Sadovskaia K., Aghahosseini A., Child M., Gulagi A., Oyewo A.S., de Souza Noel Simas Barbosa L., Breyer C. Radical Transformation Pathway towards Sustainable Electricity via Evolutionary Steps. *Nature Communications*, 2019, No. 10 (1), pp. 1077-1080.

9. Khan S., Khan S., Ahmed G. *Industrial Power Systems*. Boca Raton, CRC Press, 2016. 488 p.

10. Titkov V.V., Khalilov F.Kh. *Perenapryazheniya i molnizashchita* [Surge and Lightning Protection]. Sankt-Peterburg, Izd-vo Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo, 2017. 222 p. [in Russian].

11. Dalziel C.F., Lee W. Electricity and Power Supply. *IEEE Spectrum*, 2018, No. 2, pp. 44-50. [in Russian].

12. Dzhendubaev A.-Z.R., Aliev I.I. *MATLAB, Simulink i SimPower Systems v*

elektroenergetike: uchebnoe posobie [MATLAB, Simulink, and SimPower Systems in the Electric Power Industry: Training Manual]. Cherkessk, BITs SevKavGGTA, 2014. 136 p. [in Russian].

13. Neklepaev B.N., Kryuchkov I.P. *Elektricheskaya chast' elektrostantsii i podstantsii. Spravochnye materialy dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya: ucheb. posobie dlya vuzov* [Electrical Part of Power Plants and Substations. Reference Materials for Course and Diploma Design: Training Manual for Universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2014. 608 p. [in Russian].

14. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPower-Systems i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. [in Russian].

15. Dalziel C.F., Lee W. Electricity and Power Supply. *IEEE Spectrum*, 2018, No. 2, pp. 44-50.

16. Gerasimov A.I., Regeda V.V., Regeda O.N. *Modelirovanie v srede MATLAB-Simulink* [Modeling in the MATLAB-Simulink Environment]. Penza, PGU Publ., 2017. 111 p. [in Russian].

17. *Power Supply Devices and Systems of Relay Protection* [Electronic Resource]. URL: <http://www.ebook777.com/power-supply-devices-systemsrelay-protection> (assessed 15.05.2022).

18. Ul'yanov S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic Transients in Electrical Systems]. Moscow, Enas Publ., 2012. 519 p. [in Russian].

19. Tang Y. *Voltage Stability Analysis of Power System*. Singapore, Springer Singapore, 2021. 385 p.

20. Shvedov G.V. *Elektrosnabzhenie gorodov: elektropotreblenie, raschetnye nagruzki, raspredelitel'nye seti* [Power Supply of Cities: Power Consumption, Calculated Loads, Distribution Networks]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2012. 268 p. [in Russian].

21. Zhu Y. *Power System Loads and Power System Stability*. Springer International Publishing, 2021. 164 p.

22. Patel D., Chothani N. *Digital Protective Schemes for Power Transformer*. Singapore, Springer Singapore, 2020. 193 p.



Радмир Рифович Афлятунов
Radmir R. Aflyatunov

аспирант кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Россия



Петр Игоревич Васильев
Petr I. Vasilyev

аспирант, ассистент кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Россия



Ильгиза Далховна Каекбирдина
Ilgiza D. Kaekbirdina

студент кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Россия



Роман Вячеславович Кириллов
Roman V. Kirillov

доцент базовой кафедры «Электроэнергетика
и электротехнологии» в составе «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Россия



Регина Тагировна Хазиева
Regina T. Khazieva

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Россия

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-13-20

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА БАЗЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОМПОНЕНТА

Актуальность

Использование методов функциональной интеграции в силовой электротехнике позволяет достигнуть снижения массы и габаритов готового устройства, а также повысить надежность и эффективность системы. Применение гибридных компонентов при разработке трансформаторов позволяет реализовать резонансный режим работы системы, тем самым обеспечивая снижение потерь.

Цель исследования

В данной статье рассматривается разработка схемы и моделирование резонансного трансформатора на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента.

Основными задачами являются определение электрической схемы резонансного трансформатора, реализованного на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, и аналитический расчет параметров многофункционального интегрированного электромагнитного компонента.

Методы исследования

В данном исследовании были использованы следующие методы: патентный обзор, изучение научной литературы, компьютерное моделирование, выполненное в программном комплексе MatLab.

Результаты

Авторами разработана компьютерная модель в MatLab резонансного трансформатора на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента. Конструктивные и функциональные особенности компонента позволяют реализовать резонансный режим работы трансформатора, так как готовый компонент представляет собой одновременно емкостную и индуктивную нагрузку. Представлена схема замещения многофункционального интегрированного электромагнитного компонента и проведена адаптация под программный комплекс MatLab. В результате моделирования получен график намагничивающего тока трансформатора. Проведен анализ возможности практической реализации системы.

Ключевые слова: многофункциональный интегральный электромагнитный компонент, функциональная интеграция, фильтрокомпенсирующее устройство, резонансный трансформатор, резонансный режим работы, повышение энергетической эффективности

DEVELOPMENT OF THE CIRCUIT AND SIMULATION OF A RESONANT TRANSFORMER BASED ON A MULTIFUNCTIONAL INTEGRATED ELECTROMAGNETIC COMPONENT

Relevance

The use of functional integration methods in power electrical engineering makes it possible to achieve a reduction in the weight and dimensions of the finished device, as well as to increase the reliability and efficiency of the system. The use of hybrid components in the development of transformers makes it possible to implement the resonant mode of operation of the system, thereby reducing losses.

Aim of research

This article discusses the development of a circuit and modeling of a resonant transformer based on a multifunctional integrated electromagnetic component. The main tasks are to determine the electrical circuit of the resonant transformer implemented on the basis of a multifunctional integrated electromagnetic component and the analytical calculation of the parameters of the multifunctional integrated electromagnetic component.

Research methods

In this study, the following methods were used: patent review, the study of scientific literature, computer simulation performed in the MatLab software package.

Results

The authors have developed a computer model in MatLab of a resonant transformer based on a multifunctional integrated electromagnetic component. The design and functional features of component make it possible to implement the resonant mode of operation of the transformer, since the finished component is both a capacitive and an inductive load. An equivalent circuit of a multifunctional integrated electromagnetic component is presented and adapted to the MatLab software package. As a result of the simulation, a graph of the magnetizing current of the transformer was obtained. The analysis of the possibility of practical implementation of the system was carried out.

Keywords: multifunctional integral electromagnetic component, functional integration, filter-compensating device, resonant transformer, resonant mode of operation, energy efficiency increase

***Благодарности:** Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022-2024 гг. для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.*

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

Актуальна тенденция уменьшения массы и габаритов электротехнических устройств. С этой целью используются резонансные технологии и применяются гибридные компоненты [1–3]. Одним из лучших способов снижения массы и габаритов трансформаторов является переход на резонансный режим работы, в совокупности с использованием многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) это позволяет достигнуть высоких энергетических показателей, а также повысить надежность системы [4–6]. Помимо улучшения электрофизических показателей, применение МИЭК позволяет сократить финансовые расходы на изготовление трансформаторов [7–10]. В программе MatLab авторами смоделирован резонансный трансформатор на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента.

Авторами решена задача исследования резонансного режима работы трансформатора на базе МИЭК. Для решения задачи предложена схема замещения многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (рисунок 1) и заданы блоки модели (рисунки 2–4).

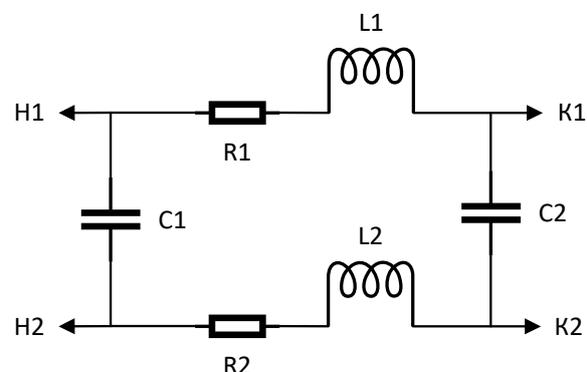


Рисунок 1. Схема замещения МИЭК

Figure 1. MIEC equivalent circuit

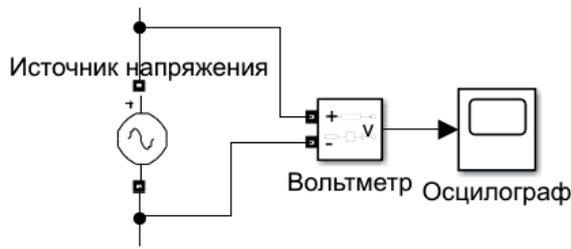


Рисунок 2. Блок источника питания

Figure 2. Power supply unit

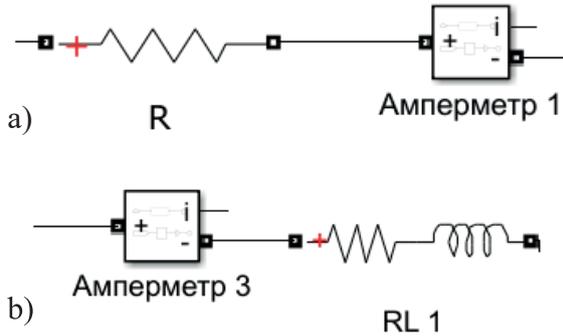


Рисунок 3. Блоки первичной (а) и вторичной (б) обмоток

Figure 3. Blocks of primary (a) and secondary (b) windings

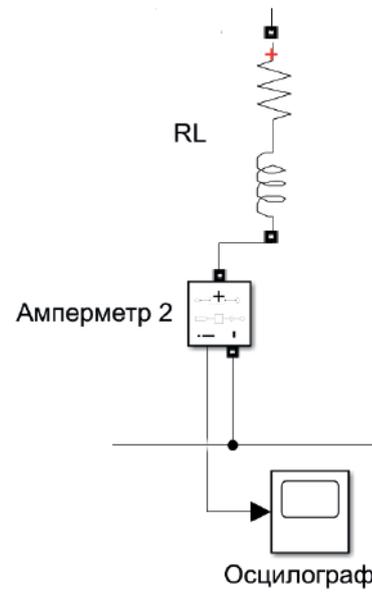


Рисунок 4. Блок имитации магнитного потока

Figure 4. Magnetic flux emulation unit

На рисунке 5 показана реализованная модель резонансного трансформатора на основе МИЭК с учетом адаптации схемы замещения компонента в среде Simulink пакета Matlab с использованием библиотеки блоков SimPowerSystem.

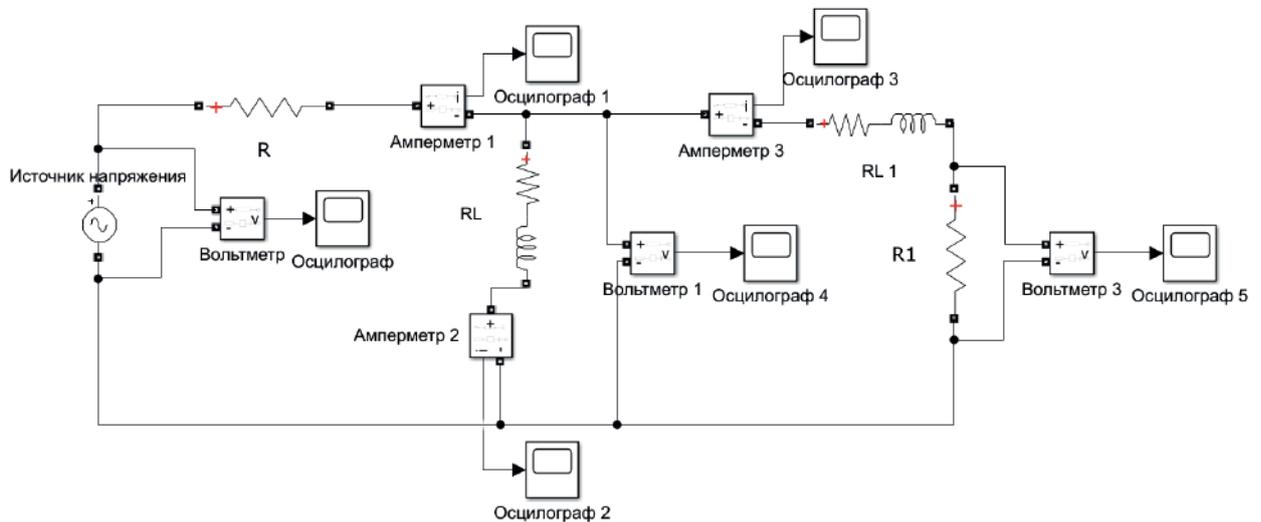


Рисунок 5. Компьютерная модель резонансного трансформатора

Figure 5. Computer model of a resonant transformer

Модель резонансного трансформатора состоит из блоков источника питания, первичной и вторичной обмоток, и блока имитации магнитного потока с заданными параметрами резонансного режима работы [11, 12]. Схема замещения МИЭК представлена в виде четырехполюсника, одна из диагоналей которого представляет собой первичную обмотку, а другая — вторичную.

Таким образом, осуществляется реализация многофункционального интегриро-

ванного электромагнитного компонента в виде готового колебательного LC контура [13–18] первичной обмотки резонансного трансформатора с наличием вторичной обмотки в едином компоненте. Модель представляет собой понижающий трансформатор с номинальным напряжением 6000 В и частотой 50 Гц. В результате компьютерного моделирования был получен график намагничивающего тока системы, представленный на рисунке 6. Амплитудное значение тока $I_0 = 0,8$ А.

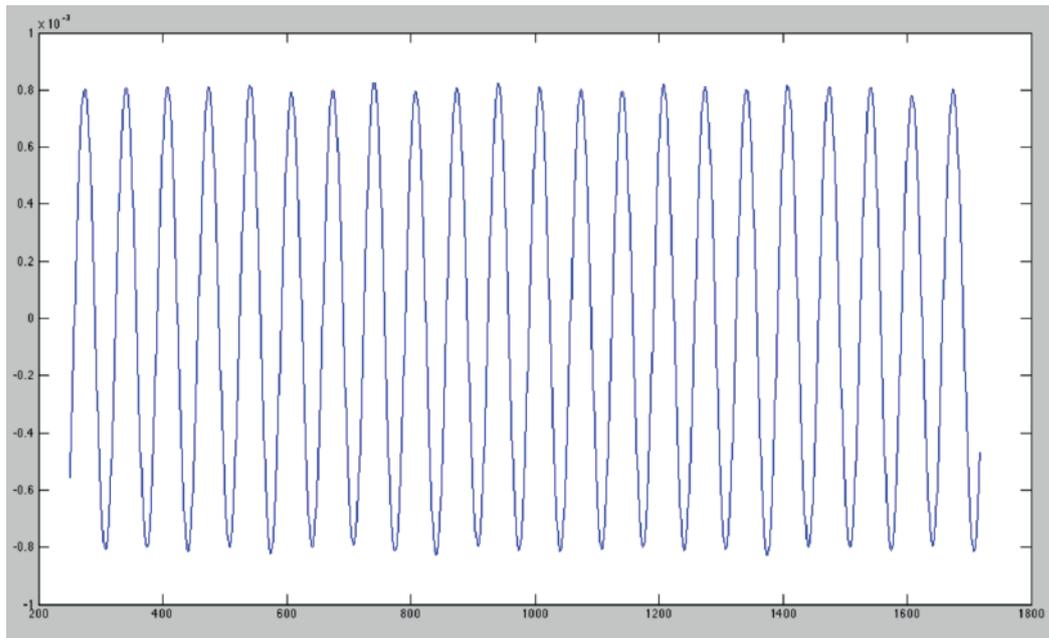


Рисунок 6. График намагничивающего тока

Figure 6. Magnetizing current curve

Выводы

Доказана возможность применения многофункционального интегрированного электромагнитного компонента в резонансном трансформаторе в качестве готового колебательного LC контура.

Компьютерная модель резонансного трансформатора на базе МИЭК позволила сократить финансовые затраты на

практические исследования, что важно при разработке новых устройств.

Сокращение отдельных дискретных компонентов при использовании МИЭК в схеме резонансного трансформатора позволяет утверждать о повышении надежности смоделированной системы и снижении ее стоимости.

Список источников

1. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н. Разработка математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 81-88.
2. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н., Кваснюк А.А. Экспериментальное исследование переходных процессов в катушке-конденсаторе // Известия РАН. Серия физическая, 2020. Т. 84. № 2. С. 157-160.
3. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кваснюк А.А., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н. Физическое моделирование гребенчатого фильтра на основе каткона // Труды XVII Международной конференции «Электро-механика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Алушта, 24–28 сентября 2018 года. Алушта: Изд-во «Знак», 2018. С. 331-333.
4. Саттаров Р.Р., Хазиева Р.Т., Иванов М.Д. Integrated LC-Components for Electrical Systems and Devices // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559527. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559527/references#reference>.
5. Афлятунов Р.Р., Васильев П.И., Хазиева Р.Т. Modeling a Semiconductor Compensator Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559601. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559601>.
6. Пат. 2585248 РФ, МПК Н 03 Н 7/00. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент / С.Г. Конесев. 2012114845/08, Заявлено 13.04.2012; Опубл. 27.05.2016. Бюл. 12.
7. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей // Электричество. 2020. № 1. С. 32-38. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-32-38>.
8. Гончаров С.А., Малинкин В.Б. Усовершенствование конструкции и расчет технических характеристик балансных трансформаторов СВЧ диапазона // Омский научный вестник. 2010. № 2 (90). С. 207-209.
9. Михеев Г.М., Ефремов Л.Г., Иванов Д.Е. Способы повышения энергоэффективности силовых трансформаторов // Вестник ЧГУ. 2013. № 3.
10. Передельский В.А., Колбасов В.Ф., Садовников В.А., Якимов В.А. Модернизация силовых трансформаторов с увеличением их нагрузочной способности // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 5. С. 33-37.
11. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12-24.
12. Кралин А.А., Тюриков М.П. Моделирование трехстержневого трансформатора в Simulink // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2015. № 3 (110). С. 238-242.
13. Патент на изобретение 2417563 РФ, МПК Н 05 В 6/00. Установка индукционного нагрева жидкостей / С.Г. Конесев, П.А. Хлюпин, И.А. Макулов, Ю.А. Никитин. 2009129107/07, Заявлено 28.07.2009; Опубл. 27.04.2011.
14. Патент на изобретение RU 2407136, МПК Н 02 М 5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь / С.Г. Конесев, П.А. Хлюпин. 2008141538/09, Заявлено 20.10.2008; Опубл. 20.12.2010.
15. Патент на изобретение RU 2496281, МПК Н 05 В 6/02. Способ монтажа индуктора на протяженных объектах / С.Г. Конесев, М.Р. Садиков, П.А. Хлюпин, Э.Ю. Кондратьев. 2012108770/07, Заявлено 07.03.2012; Опубл. 20.10.2013.
16. Konesev S.G., Khlyupin P.A., Greb A.V., Kondratev E.Yu. Induction Technology in High-Viscosity Oil Production at Tazovskoye Field // Periodico Tche Quimica. 2018. Vol. 15. No. 30. P. 520-526.
17. Taghizade Ansari H., Vahedi A., Khlyupin P.A., Mahmoudi N. Diagnosis of Moisture Content in Oil-Paper Bushings Using Statistical Indicators Based on Frequency Domain Spectroscopy // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 232. P. 287-298.
18. Alikhani A.M., Vahedi A., Khlyupin P.A. Induction Motor Fault Detection in ESP

Systems Based on Vibration Measurements // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 232. P. 497-505.

References

1. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Sirenko V.V., Shakirzyanov F.N. Razrabotka matematicheskoi modeli i analiz osobennosti rezhimov induktivno-emkostnogo preobrazovatelya na osnove katkona [The Mathematical Model of a Katkon-Based Inductive-Capacitive Converter and Specific Features of Its Operation Modes]. *Vestnik MEI — Bulletin of MPEI*, 2018, No. 4, pp. 81-88. [in Russian].
2. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzyanov F.N., Kvasnyuk A.A. Eksperimental'noe issledovanie perekhodnykh protsessov v katushke-kondensatore [Experimental Study of Transient Processes in a Coil-Capacitor]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya — Izvestiya RAN. Physical series*, 2020, Vol. 84, No. 2, pp. 157-160. [in Russian].
3. Butyrin P.A., Gusev G.G., Kvasnyuk A.A., Mikheev D.V., Shakirzyanov F.N. Fizicheskoe modelirovanie grebenchatogo fil'tra na osnove katkona [Physical Modeling of a Comb Filter Based on Katkon]. *Trudy XVII Mezhdunarodnoi konferentsii «Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskie materialy i komponenty», Alushta, 24–28 sentyabrya 2018 goda* [Proceedings of the XVII International Conference «Electromechanics, Electrotechnologies, Electrical Materials and Components», Crimea, Alushta, September 24–28, 2018]. Alushta, Znak Publ., 2018, pp. 331-333. [in Russian].
4. Sattarov R.R., Khazieva R.T., Ivanov M.D. Integrated LC-Components for Electrical Systems and Devices. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559527. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559527/references#reference>.
5. Aflyatunov R.R., Vasil'ev P.I., Khazieva R.T. Modeling a Semiconductor Compensator Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component. *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559601. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9559601>.
6. Konesev S.G. *Mnogofunktsional'nyi integrirovannyi elektromagnitnyi komponent* [Multifunctional Integrated Electromagnetic Component]. Patent RF, No. 2585248 RF, 2016. [in Russian].
7. Konesev S.G., Khazieva R.T. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie induktivno-emkostnykh preobrazovatelye [Mathematical and Physical Modeling of Inductive-Capacitive Converters]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2020, No. 1, pp. 32-38. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-32-38>. [in Russian].
8. Goncharov S.A., Malinkin V.B. Usovershenstvovanie konstruktsii i raschet tekhnicheskikh kharakteristik balansnykh transformatorov SVCh diapazona [Improving the Design and Calculation of the Technical Characteristics of Balanced Microwave Transformers]. *Omskii nauchnyi vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2010, No. 2 (90), pp. 207-209. [in Russian].
9. Mikheev G.M., Efremov L.G., Ivanov D.E. Sposoby povysheniya energo-effektivnosti silovykh transformatorov [Ways to Improve the Energy Efficiency of Power Transformers]. *Vestnik ChGU — ChSU Bulletin*, 2013, No. 3. [in Russian].
10. Peredel'skii V.A., Kolbasov V.F., Sadovnikov V.A., Yakimov V.A. Modernizatsiya silovykh transformatorov s uvelicheniem ikh nagruzochnoi sposobnosti [Modernization Of Power Transformers with an Increase in Their Load Capacity]. *ELEKTRO. elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost — ELECTRO. Electrical Engineering, Power Industry, Electrical Industry*, 2009, No. 5, pp. 33-37. [in Russian].
11. Novash I.V., Rummyantsev Yu.V. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki MatLab-Simulink s uchetom nasyshcheniya magnitoprovoda [Three-Phase Transformer Parameters Calculation Considering the Core Saturation for the Matlab-Simulink Transformer Model]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG — Energy. News of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS*, 2015, No. 1, pp. 12-24. [in Russian].
12. Kralin A.A., Tyurikov M.P. Modelirovanie trekhsterzhnevoogo transformatora v Simulink [Simulation of a Three-Rod Trans-

former in Simulink]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* — *Proceedings of NNSTU named after R.E. Alekseev*, 2015, No. 3 (110), pp. 238-242. [in Russian].

13. Konesev S.G., Khlyupin P.A., Maku-
lov I.A., Nikitin Yu.A. *Ustanovka induktsionnogo nagreva zhidkosti* [Installation of Induction Heating of Liquids]. Patent RF, No. 2417563 C2, 2011. [in Russian].

14. Konesev S.G., Khlyupin P.A. *Induktivno-emkostnyi preobrazovatel'* [Inductive-Capacitive Converter]. Patent RF, No. 2407136, 2010. [in Russian].

15. Konesev S.G., Sadikov M.R., Khlyupin P.A., Kondrat'ev E.Yu. *Sposob montazha induktora na protyazhennykh ob'ektakh* [The Method of Mounting the Inductor on Extended Objects]. Patent RF, No. 2496281, 2013. [in Russian].

16. Konesev S.G., Khlyupin P.A., Greb A.V., Kondratev E.Yu. Induction Technology in High-Viscosity Oil Production at Tazovskoye Field. *Periodico Tche Quimica*, 2018, Vol. 15, No. 30, pp. 520-526.

17. Taghizade Ansari H., Vahedi A., Khlyupin P.A., Mahmoudi N. Diagnosis of Moisture Content in Oil-Paper Bushings Using Statistical Indicators Based on Frequency Domain Spectroscopy. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, Vol. 232, pp. 287-298.

18. Alikhani A.M., Vahedi A., Khlyupin P.A. Induction Motor Fault Detection in ESP Systems Based on Vibration Measurements. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, Vol. 232, pp. 497-505.



Эльмира Муссаевна Баширова
Elmira M. Bashirova

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате), Салават, Россия



Юрий Александрович Жаринов
Yuri A. Zharinov

кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Информационных технологий», Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате), Салават, Россия



Артем Алексеевич Терентьев
Artem A. Terentyev

магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате), Салават, Россия

УДК 004.8:620.9

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-21-31

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Актуальность

Данная статья посвящена разработке подсистемы для прогнозирования надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике. Задачи по прогнозированию надежности в настоящее время актуальны как никогда, поскольку они дают ответ на вопрос о целесообразности дальнейших затрат, необходимых на обработку технологии и производство систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике. Адекватное моделирование надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике может быть реализовано только с помощью автоматизации.

Цель исследования

Проанализировать предметную область, разработать математическое и информационное обеспечение.

Методы исследования

Основными для анализа надежности являются структурные методы, позволяющие представить систему в виде структурной схемы, описывающей логические соотношения между состояниями элементов и системы в целом с учетом структурно-функциональных связей и взаимодействия элементов.

Результаты

Исследованы методы расчета надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике, а также реализовано программное обеспечение, позволяющее проводить анализ надежности с помощью нейронных сетей.

Итогом работы является программа прогнозирования надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике любой структуры с помощью нейронных сетей.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейронные сети, прогнозирование, надёжность, автономные системы энергоснабжения, электрооборудование

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR SOLVING PROBLEMS OF FORECASTING TECHNICAL CONDITIONS OF ELECTRIC POWER EQUIPMENT

Relevance

This article is devoted to the development of a subsystem for forecasting the reliability of maintenance and repair systems in the electric power industry. The reliability forecasting tasks are more actual nowadays than ever before because they give an answer to the question about expediency of further expenditures, necessary for technology processing and production of maintenance and repair systems in electric power industry. Adequate modeling of reliability of maintenance and repair systems in electric power industry can be realized only by means of automation.

Aim of research

To analyze the subject area, to develop mathematical and information support.

Research methods

The main for reliability analysis are structural methods, which allow to represent the system in the form of a structural diagram describing the logical relationships between the states of the elements and the system as a whole, taking into account the structural and functional relationships and the interaction of elements.

Results

The methods of calculating the reliability of maintenance and repair systems in the electric power industry are investigated, the software that allows you to analyze the reliability using neural networks is implemented.

The result of the work is a program for forecasting the reliability of maintenance and repair systems in electric power industry of any structure with the help of neural networks.

Keywords: artificial intelligence, neural networks, prediction, reliability, autonomous power supply systems, electrical equipment

Нейронные сети уже давно зарекомендовали себя как инструмент решения различных задач, в том числе задач прогнозирования. Уже в середине XX века начались активные исследования искусственных нейронных сетей как подкласса самоорганизующихся сложных динамических систем. Можно сказать, что в знаменитой работе У. МакКаллока и У. Питтса закладывается фундамент для дальнейшего развития искусственных нейронных сетей. Одним из самых важ-

ных свойств технических систем, энергетических систем (ЭС) в том числе, является надежность. Под сложной технической системой с точки зрения анализа надежности будем понимать ЭС, состоящую из произвольного количества произвольно соединенных звеньев (электронные модули, устройства электрических приборов) с нагруженным резервированием (последовательно-параллельных и мостиковых структур).

Задачей расчета надежности ЭС является определение количественных показателей надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике с помощью нейронных сетей.

В рамках данной работы рассматриваются лишь невосстанавливаемые объекты.

Исходные данные: блок-схема надежности; перечень элементов, параметры элементов; планируемое время работы системы;

Результирующие данные: вероятность безотказной работы — вероятность того, что за указанное время работы отказ устройства не произойдет; средняя наработка до отказа — среднее время, в течение которого устройство будет исправно работать (до возникновения первого отказа); гамма-процентная наработка до отказа — наработка, в течение которой отказ устройства не возникнет с заданной вероятностью; интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого

момента времени отказ не возник. Численно равна числу отказов в единицу времени, отнесенное к числу узлов, безотказно проработавших до этого времени.

Описание элементов математической модели приведено в таблице 1.

Используется предположение об экспоненциальном распределении времени до отказа элементов. Рассмотрим простейшие типы структур — последовательное (рисунок 1) и параллельное соединение (рисунок 2) элементов.

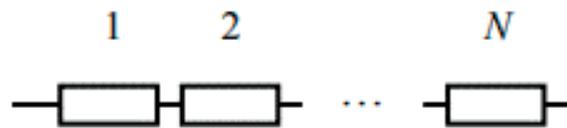


Рисунок 1. Последовательное соединение элементов

Figure 1. Series connection of elements

«Вероятность безотказной работы $P(t)$ для последовательного и параллельного соединений [1, с. 78] вычисляется по формулам:

Таблица 1. Описание элементов математической модели

Table 1. Description of the elements of the mathematical model

Обозначение элемента математической модели	Описание элемента математической модели	Описание соответствующего компонента объекта проектирования
T	Скалярная величина $0 \leq P(t) \leq 1$	Средняя наработка системы до отказа
$P(t)$	Скалярная величина, $0 \leq p_i(t) \leq 1$	Вероятность безотказной работы системы в течение времени t
$p_i(t)$	Скалярная величина, $0 \leq \lambda_c(t) \leq 1$	Вероятность безотказной работы i -го элемента системы
λ_c	Скалярная величина $0 \leq \lambda_i(t) \leq 1 \ i = 1, N$	Интенсивность отказов всей системы
λ_i	Скалярная величина	Интенсивность отказов i -го элемента системы
T_γ	Скалярная величина	Гамма-процентная наработка системы до отказа, $\gamma = 95 \%$
N	Скалярная величина	Количество элементов в системе
i	Скалярная величина, $i = 1, \dots, N$	Номер элемента
t	Скалярная величина	Время работы системы

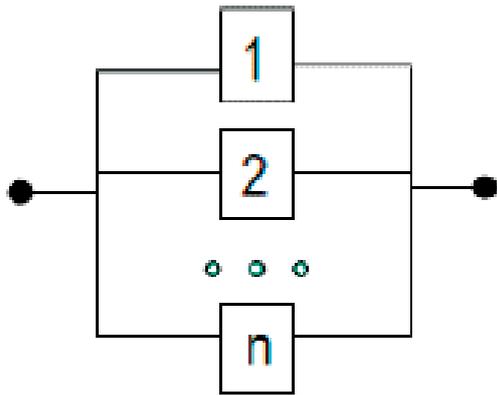


Рисунок 2. Параллельное соединение элементов

Figure 2. Parallel connection of elements

$$P(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t); \quad (1)$$

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_i(t)). \quad (2)$$

После определения значения вероятности безотказной работы системы рассчитываются интенсивность отказов:

$$\lambda_c = -\frac{\ln P}{t}; \quad (3)$$

средняя наработка до отказа:

$$T = \frac{1}{\lambda_c}; \quad (4)$$

гамма-процентная наработка до отказа:

$$T_\gamma = -T \cdot \ln\left(\frac{\gamma}{100}\right). \quad (5)$$

Если же в качестве исходных данных выступает интенсивность отказов элементов системы, то сначала вычисляется

вероятность безотказной работы каждого из них по формуле:

$$p_i(t) = e^{-\lambda t}. \quad (6)$$

«Реальные высоконадежные системы обычно представляют собой совокупность произвольно соединенных резервированных схем» [2]. Такие системы называют сложными последовательно-параллельными системами (ППС). «ППС содержит ветви с параллельно соединенными элементами расчета надежности, совместный отказ которых приводит к отказу всей системы и ветви с последовательно соединенными элементами, отказ каждого из которых приводит к отказу системы» [3, с. 89]. Пример подобных структурных схем надежности приведен на рисунке 3.

На рисунке 4 приведена классификация методов расчета надежности.

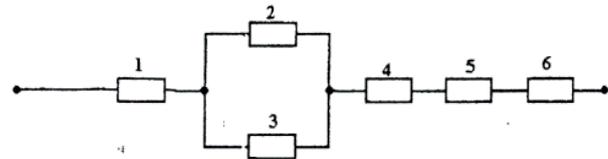


Рисунок 3. Пример структурной схема надежности последовательно-параллельных систем

Figure 3. An example of a block diagram of the reliability of serial-parallel systems

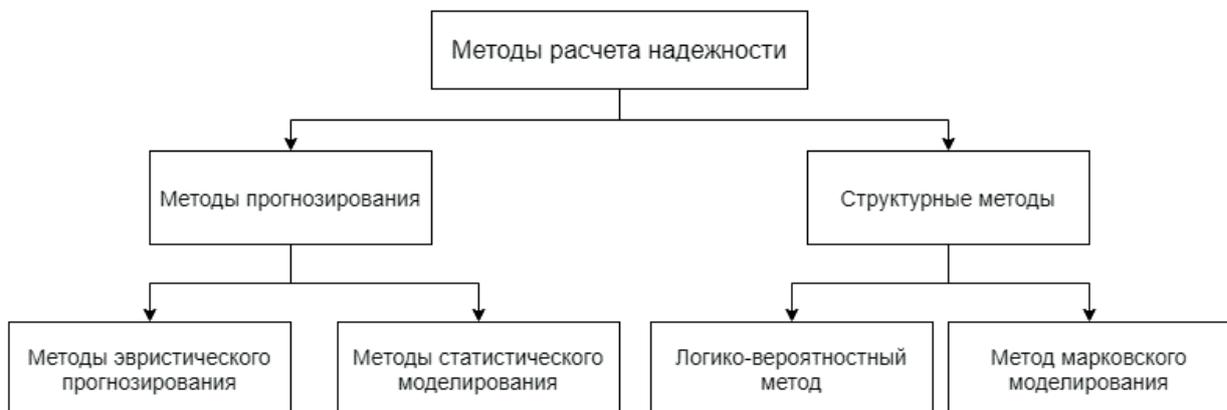


Рисунок 4. Классификация методов расчета надежности [4, с. 20]

Figure 4. Classification of methods for calculating reliability [4, p. 20]

Наибольшее распространение получили структурные методы расчета надежности. Расчет показателей надежности при помощи структурных методов включает:

- представление объекта в виде структурной схемы;
- описание схемы с помощью адекватной математической модели.

В качестве структурных схем могут рассматриваться: блок-схемы надежности; деревья отказов; графы состояний.

Расчет надежности в рамках структурных методов чаще всего производится с

помощью блок-схем надежности. Такая модель представляет взаимосвязи между компонентами с точки зрения надежности и не всегда соответствует реальному соединению элементов.

В рамках методов прогнозирования надежности применяют имитационное статистическое моделирование и методы эвристического прогнозирования. Результаты анализа методов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты анализа методов

Table 2. Results of the analysis of methods

№	Наименование алгоритма	Достоинства	Недостатки
1	Логико-вероятностный алгоритм	1) Применим при любой логической структуре схемы (не только при последовательно-параллельных схемах); 2) применим при любых распределениях наработки до отказа до отказа; 3) простая, относительно других структурных методов, реализация на ЭВМ.	1) «Не всегда удается составить логическую функцию работоспособности, достаточно точно соответствующую рассматриваемой системе» [3]; 2) «для сложных систем с большим числом элементов преобразования с помощью функций алгебры логики становятся очень громоздкими» [6]; 3) применяется только для систем нагруженным резервированием.
2	Метод марковского моделирования	1) Точное описание всех процессов, протекающих в сложных системах; 2) удобное описание состояний системы с использованием графа переходов.	1) При большом количестве элементов в системе определение вероятностей безотказной работы связано с громоздкими вычислениями; 2) «с ростом числа элементов трудности моделирования надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике быстро возрастают из-за большого количества возможных состояний» [2]; 3) сложная программная реализация, требующая применения аналитических методов решения уравнений.
3	Метод прогнозирования (метод Монте-Карло)	1) Простая реализация на ЭВМ; 2) позволяет имитировать реальные физические процессы.	1) Высокая достоверность имитационного моделирования практически недостижима; 2) «при анализе сложных систем возникают проблемы, связанные с большими затратами машинного времени, необходимого для вычислений» [1].
4	Метод эвристического прогнозирования	1) «Объединение групп элементов системы в один эквивалентный элемент, тем самым происходит уменьшение числа элементов в системе» [7]; 2) простая реализация на ЭВМ.	1) Не позволяет установить погрешность вычислений; 2) применяется исключительно для случая высоконадежных элементов и систем.

Для решения задачи прогнозирования надежности электронного средства будем использовать логико-вероятностный метод (ЛВМ). Причины выбора данного метода — «удобное описание логической функции системы любой структуры с использованием средств математического аппарата бинарной алгебры логики и простая, в сравнении с другими структурными методами, программная реализация» [5, с. 225].

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 5.

В качестве исходных данных выступает вероятность безотказной работы элементов (блоки, узлы, устройства электрических приборов) и логическая функция работоспособности, составленная по структурной схеме надежности (блок-схема надежности).

«На основе анализа блок-схемы надежности составляется логическая функция работоспособности системы. Предполагая, что система и ее составляющие компоненты могут находиться только в двух состояниях — работоспособности и отказа, а отказы компонентов не зависят друг от друга» [3], можно сформировать логическую функцию ее работоспособности $S(x)$ с помощью формулы:

$$S(x) = \begin{cases} 1, & \text{когда система работоспособна} \\ 0, & \text{когда система отказала.} \end{cases} \quad (7)$$

Аргументом функции S является вектор-строка x логических переменных, x_i , $i = \overline{1 \dots n}$, которая определяется формулой:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{когда элемент } i \text{ работоспособен} \\ 0, & \text{когда элемент } i \text{ отказал.} \end{cases} \quad (8)$$

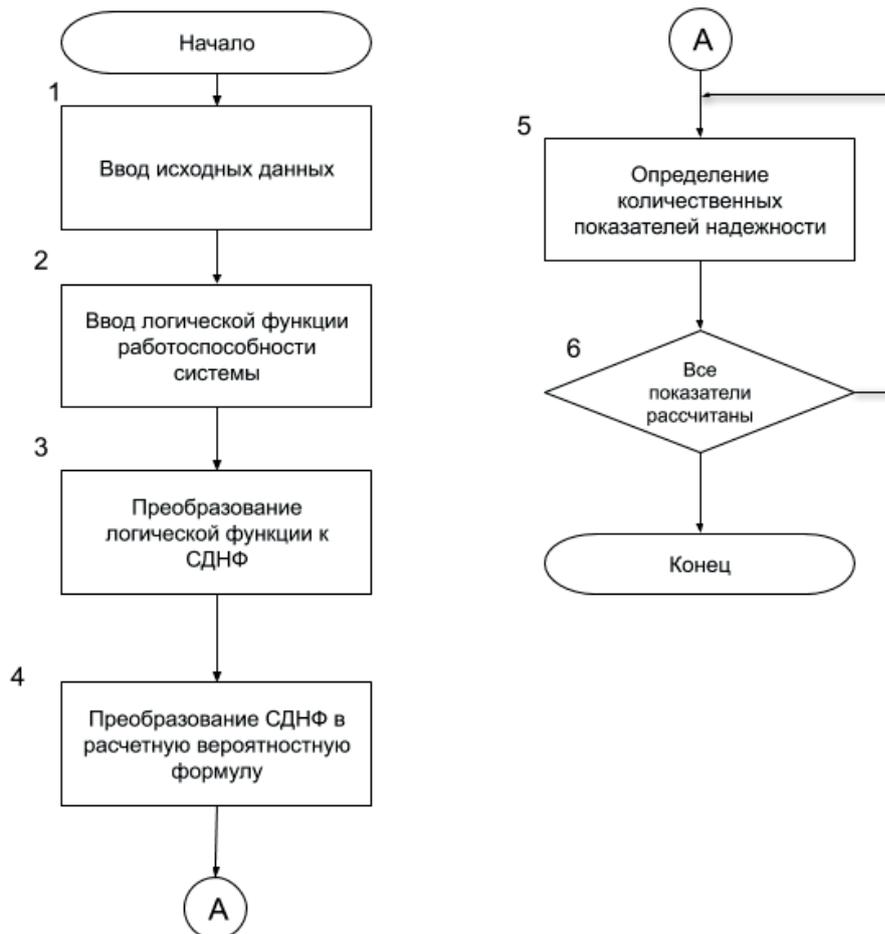


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма

Figure 5. Block diagram of the algorithm

Например, если система состоит из двух элементов и отказ каждого приводит к отказу всей системы, т.е. элементы с точки зрения надежности соединены последовательно (рисунок 6), то $S(x) = x_1x_2$. Функция работоспособности параллельной схемы (см. рисунок 2), состоящей из 2 элементов, одиночные отказы элементов которой не приводят к ее отказу, равна $S(x) = x_1 \vee x_2$.

После составления логической функции происходит ее преобразование к форме перехода к замещению. Наиболее удобной формой представления в плане простоты реализации на ЭВМ является совершенная дизъюнктивная нормальная форма (СДНФ). Если использование ЭВМ для реализации логико-вероятностного метода не планируется, то рекомендуется выбрать иную форму перехода к замещению, так как СДНФ является достаточной громоздкой.

После расчета по полученной формуле получаем значение вероятности безотказной работы. Остальные показатели надежности определяются по формулам (3)–(5).

Таблица 3. Исходные данные

Table 3. Initial data

Номер элемента	Наименование элемента системы	$\lambda_i \cdot 10^{-6}$	Логическая переменная
1	ПЭВМ	1	A
2			C
3	Принтер	5	B
4			D

По формуле (6) определим вероятности безотказной работы элементов:

$$p_{1,2}(t) = e^{-1 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} = 0,9801;$$

$$p_{3,4}(t) = e^{-5 \cdot 10^{-6} \cdot 20000} = 0,9048.$$

Пользуясь формулами (7) и (8), составим логическую функцию работоспособности системы:

$$S(x) = (A \wedge B) \vee (C \wedge D).$$

Преобразуем исходную логическую функцию в совершенную дизъюнктив-

На простом примере разберем, как осуществляется расчет надежности с помощью нейронных сетей.

Исходные данные: перечень элементов, интенсивности отказов, блок-схема надежности системы, время работы $t = 20\,000$ ч, гамма-процент наработка системы до отказа $\gamma = 95\%$.

Блок-схема надежности рассматриваемой системы представлена на рисунке 6.

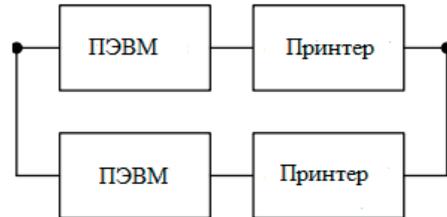


Рисунок 6. Блок-схема надежности устройства

Figure 6. Block diagram of device reliability

Структура представляет собой общее резервирование из двух каналов и 4 элементов.

Исходные данные занесены в таблицу 3.

ную нормальную форму. Для этого составим таблицу истинности.

Таблица истинности для логической функции работоспособности системы представлена в таблице 4.

Для нахождения СДНФ нужно из таблицы истинности выделить лишь те строки, результат которых равен 1. «Далее для каждой строки выписываем конъюнкцию всех переменных по следующему алгоритму: если значение переменной в

данной строке равно 1, то в конъюнкцию записываем саму переменную, а если равно 0, то — отрицание этой переменной. После этого все конъюнкции связываем в дизъюнкцию» [4].

Таблица 4. Таблица истинности

Table 4. Truth table

A	B	C	D	$A \wedge B$	$C \wedge D$	$(A \wedge B) \vee (C \wedge D)$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1
1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0
1	0	1	1	0	1	1
1	1	0	0	1	0	1
1	1	0	1	1	0	1
1	1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1

В результате совершенная дизъюнктивно-нормальная форма нашей функции равна:

$$S(x) = (A \wedge B \wedge C \wedge D) \vee (A \wedge B \wedge C \wedge \neg D) \vee (A \wedge B \wedge \neg C \wedge D) \vee (A \wedge B \wedge \neg C \wedge \neg D) \vee (\neg A \wedge B \wedge C \wedge D) \vee (\neg A \wedge B \wedge C \wedge \neg D) \vee (\neg A \wedge B \wedge \neg C \wedge D) \vee (\neg A \wedge B \wedge \neg C \wedge \neg D).$$

Заменяя логические операции на алгебраические, а логические переменные — на соответствующие вероятности безот-

казной работы, получаем расчетную формулу вероятности безотказной работы системы:

$$P(t) = (0.9801 \times 0.9048 \times (1 - 0.9801) \times (1 - 0.9048)) + (0.9801 \times 0.9048 \times 0.9801 \times (1 - 0.9048)) + (0.9801 \times 0.9048 \times (1 - 0.9801) \times 0.9048) + ((1 - 0.9801) \times (1 - 0.9048) \times 0.9801 \times 0.9048) + (0.9801 \times (1 - 0.9048) \times 0.9801 \times 0.9048) + ((1 - 0.9801) \times 0.9048 \times 0.9801 \times 0.9048) + (0.9801 \times 0.9048 \times 0.9801 \times 0.9048) = 0,9872.$$

Рассчитываем остальные показатели надежности по формулам (3)–(5).

$$\lambda_c = -\frac{\ln 0,9872}{20000} = 6,43472241611248 \times 10^{-7} 1/\text{ч},$$

$$T = \frac{1}{6,43472241611248 \times 10^{-7}} = 1554068 \text{ ч.}$$

Модель окружения представлена на рисунке 7.

Инженер-технолог выполняет автоматизированный расчет надежности системы. После этого он передает результаты расчета инженеру-конструктору, чтобы тот сформировал отчет о надежности технической системы.

Логическая модель проектной процедуры представлена на рисунке 8.

Происходит ввод исходных данных: интенсивность отказов элементов, планируемое время работы системы и гамма-процент. Далее осуществляется расчет надежности с использованием нейронных сетей: на основе анализа структурной схемы надежности составляется логическая функция работоспособности

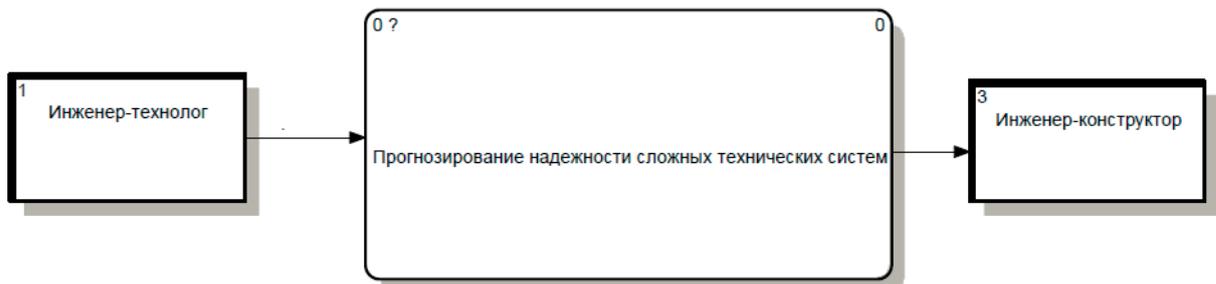


Рисунок 7. Модель окружения

Figure 7. Model of the environment

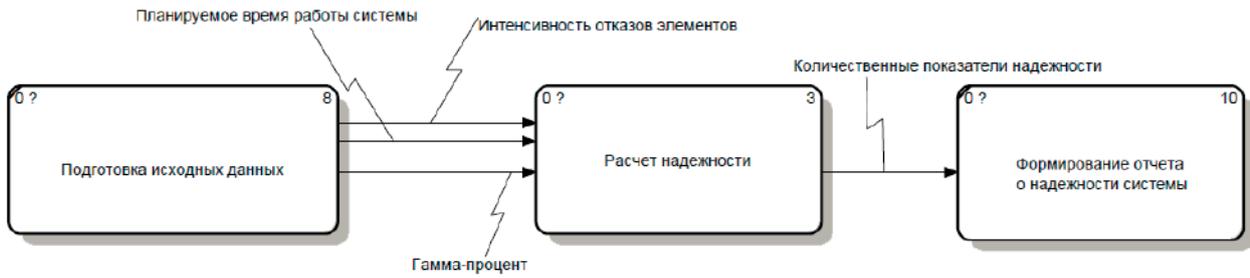


Рисунок 8. Логическая модель проектной процедуры

Figure 8. Logical model of the design procedure

системы, логическая функция работоспособности системы преобразуется в совершенную дизъюнктивную нормальную форму, а СДНФ — в расчетную формулу. Результатом расчета являются количественные показатели надежности: вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов и гамма-процентная наработка до отказа. В конечном счете, рассчитанные показатели надежности используются для оформления отчета о надежности технической системы.

Модель поведения представлена на рисунке 9.

Инженер-технолог вводит все необходимые данные для расчета надежности в программу: интенсивность отказов элементов, планируемое время работы системы и гамма-процент. Затем осуществляется автоматизированный расчет надежности системы. Результатом расчета являются количественные показатели надежности, которые передаются инженеру-конструктору. Он проводит анализ полученных результатов. Если

надежность удовлетворяет требованиям ТЗ, инженер-конструктор составляет отчет о надежности технической системы. В противном случае, в отчет о надежности технической системы, помимо самих показателей надежности, инженер-конструктор также записывает рекомендации по повышению надежности технической системы.

Сценарий № 1 «Создать новый проект». Применяется для создания нового проекта. Инженер-технолог выбирает опцию меню «Создать проект». Программа открывает диалоговое окно для того, чтобы пользователь ввел наименование проекта. Программа проверяет корректность введенных данных и закрывает диалоговое окно.

Сценарий № 2 «Сохранить проект». Применяется для сохранения проекта. Проект сохраняется в отдельный файл. Инженер-технолог выбирает опцию меню «Сохранить проект». Программа проверяет, сохранялся ли данный проект ранее. Если сохранялся, программа перезаписывает файл. В противном случае про-



Рисунок 9. Модель поведения

Figure 9. Model of behavior

грамма открывает диалоговое окно, в котором пользователю необходимо ввести имя файла и указать директорию, в которую он хочет сохранить файл.

Сценарий № 3 «Сохранить проект как». Применяется для сохранения проекта по указанному пути. Инженер-технолог выбирает опцию меню «Сохранить проект как». Программа открывает диалоговое окно, в котором пользователю необходимо ввести имя файла и указать директорию, в которую он хочет сохранить файл.

Сценарий № 4 «Открыть проект». Применяется для открытия проекта. Инженер-технолог нажимает на опцию меню «Открыть проект». Программа открывает обозреватель файловой системы. Пользователь выбирает файл с проектом. Программа проверяет файл. Если файл поврежден, то программа предлагает пользователю создать новый проект.

Сценарий № 5 «Добавить новый элемент». Применяется для добавления нового элемента в техническую систему. Инженер-технолог нажимает на правую кнопку мыши по дереву проекта, затем выбирает в выпадающем меню «Добавить компонент-Новый элемент». Программа открывает диалоговое окно, в котором пользователю необходимо ввести наименование элемента. Пользователь вводит наименование элемента, после чего программа проверяет корректность ввода. Если строка с названием элемента не была пустой, программа добавляет элемент в список элементов технической системы.

Сценарий № 6 «Добавить ЭРИ». Применяется для добавления электрорадиоизделия (ЭРИ) из базы данных в техническую систему. Инженер-технолог нажимает на правую кнопку мыши по дереву проекта, затем выбирает в выпадающем меню «Добавить компонент-ЭРИ из базы данных». Программа подключа-

ется к базе данных и открывает окно с выбором класса ЭРИ и самого элемента. Пользователь осуществляет выбор, после чего программа закрывает окно.

Сценарий № 7 «Редактирование параметров проекта». Применяется для редактирования параметров проекта. Инженер-технолог нажимает левой кнопкой мыши по названию проекта в дереве проекта. Программа открывает вкладку, где пользователь может изменить имя проекта, время планируемой работы технической системы и гамма-процент.

Таким образом, сформулирована содержательная и математическая постановка задачи прогнозирования надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике. Проведен анализ методов решения задачи прогнозирования надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике. Выбран логико-вероятностный метод для прогнозирования надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике. Рассмотрено решение задачи прогнозирования надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике с помощью нейронных сетей на контрольном примере.

Применение нейронных сетей для расчета надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике без применения ЭВМ нецелесообразно, поскольку преобразования логической функции работоспособности являются очень трудоемким процессом. Особенно это заметно при преобразовании логической функции в СДНФ при большом количестве параллельных структур. Если техническая система состоит из небольшого числа элементов, и автоматизация расчета надежности не планируется, следует вместо совершенной нормальной дизъюнктивной формы использовать другую форму перехода к замещению (например, неповторную

форму в базисе конъюнкция-отрицание), так как форма представления СДНФ является очень громоздкой. Несмотря на все недостатки, логико-вероятностный метод является эффективным методом анализа

надежности систем технического обслуживания и ремонта в электроэнергетике, поскольку он позволяет анализировать надежность любой структурно-сложной технической системы.

Список источников

1. Федоров В.К., Леонов Е.Н. Оптимизация проектирования структуры и состава электротехнических систем с распределённой генерацией. Тюмень: ТИУ, 2021. 186 с.

2. Марченко А.И. Разработка и исследование автоматики опережающего сбалансированного деления в электрических сетях с малой генерацией: дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2020. 184 с.

3. Гашо Е.Г., Гужов С.В. Вопросы совершенствования и адаптации энергетических систем и комплексов к вызовам современности. М.: Изд-во МЭИ, 2021. 117 с.

4. Львов Ф.А. Типы и применение нейронных сетей // Кронос: естественные и технические науки. 2019. № 2 (24). С. 25-31.

5. Коновалов Ю.В., Вайгачёв А.Е. Искусственный интеллект в электроэнергетике // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2021. № 8. С. 225-226.

6. Jin X.-B., Zheng W.-Z., Kong J.-L., Wang X.-Y., Bai Y.-T., Su T.-L., Lin S. Deep-Learning Forecasting Method for Electric Power Load via Attention-Based Encoder-Decoder with Bayesian Optimization // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1596.

7. Bu S.-J., Cho S.-B. Time Series Forecasting with Multi-Headed Attention-Based Deep Learning for Residential Energy Consumption // *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 4722.

2. Marchenko A.I. *Razrabotka i issledovanie avtomatiki operezhayushchego sbalansirovannogo deleniya v elektricheskikh setyakh s maloi generatsiei: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development and Research of Automation of Advanced Balanced Division in Electric Networks with Small Generation: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Novosibirsk, 2020. 184 p. [in Russian].

3. Gasho E.G., Guzhov S.V. *Voprosy sovershenstvovaniya i adaptatsii energeticheskikh sistem i kompleksov k vyzovam sovremennosti* [Issues of Improving and Adapting Energy Systems and Complexes to the Challenges of Modernity]. Moscow, Izd-vo MEI, 2021. 117 p. [in Russian].

4. Lvov F.A. Tipy i primeneniye neuronnykh setei [Types and Application of Neural Networks]. *Kronos: estestvennye i tekhnicheskie nauki* — *Kronos: Natural and Technical Sciences*, 2019, No. 2 (24), pp. 25-31. [in Russian].

5. Konovalov Yu.V., Vaigachev A.E. *Iskusstvennyi intellekt v elektroenergetike* [Artificial Intelligence in the Electric Power Industry]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress — Modern Technologies and Scientific and Technical Progress*, 2021, No. 8, pp. 225-226. [in Russian].

6. Jin X.-B., Zheng W.-Z., Kong J.-L., Wang X.-Y., Bai Y.-T., Su T.-L., Lin S. Deep-Learning Forecasting Method for Electric Power Load via Attention-Based Encoder-Decoder with Bayesian Optimization. *Energies*, 2021, Vol. 14, pp. 1596.

7. Bu S.-J., Cho S.-B. Time Series Forecasting with Multi-Headed Attention-Based Deep Learning for Residential Energy Consumption. *Energies*, 2020, Vol. 13, pp. 4722.

References

1. Fedorov V.K., Leonov E.N. *Optimizatsiya proektirovaniya struktury i sostava elektrotekhnicheskikh sistem s raspredelennoi generatsiei* [Optimization of the Design of the Structure and Composition of Electrical and Technical Systems with Distributed Generation]. Tyumen, TIU Publ., 2021. 186 p. [in Russian].



Владимир Захарович Ковалев
Vladimir Z. Kovalev

*доктор технических наук,
профессор Института нефти и газа,
Югорский государственный университет,
Ханты-Мансийск, Россия*



Эмиль Ильшатович Хусаинов
Emil I. Husainov

*аспирант Института нефти и газа,
Югорский государственный университет,
Ханты-Мансийск, Россия*



Егор Станиславович Балыклов
Egor S. Balyklov

*аспирант Института нефти и газа,
Югорский государственный университет,
Ханты-Мансийск, Россия*



Ольга Владимировна Архипова
Olga V. Arhipova

*старший преподаватель Института нефти и газа,
Югорский государственный университет,
Ханты-Мансийск, Россия*



Рустам Нуриманович Хамитов
Rustam N. Khamitov

*доктор технических наук, профессор кафедры электрической
техники, Омский государственный технический университет,
Омск, Россия
профессор кафедры электроэнергетики, Тюменский
индустриальный университет, Тюмень, Россия*



Александр Савельевич Глазырин
Alexander S. Glazyrin

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

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Актуальность

Российский фонд нефтяных скважин, дающих продукцию, на 01.01.2021 составлял более 131 тыс. скважин. При этом большая часть указанного фонда оборудована установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), содержащими в своей структуре погружные электродвигатели (ПЭД). В настоящее время в отрасли нефтедобычи проявляются следующие тенденции: «... рост экологичности добычи и переработки нефти и газа; рост требований заказчика к нефтесервисным технологиям и операционной эффективности, ..., санкции на покупку зарубежного оборудования». Как следствие, активизируются работы, связанные с энергетической эффективностью нефтедобычи и увеличением межремонтных периодов основного оборудования, в том числе ПЭД. Здесь необходимо отметить Приказ Росстандарта 1397-ст от 25 декабря 2020 г. об утверждении и введении с 1 октября 2021 г. актуализированного ГОСТ Р 56624 «Энергетическая эффективность. Скважинные электроприводные лопастные насосы и электродвигатели для добычи нефти. Определение индикаторов энергетической эффективности».

Значительное место в решении задач, указанных выше, занимают вопросы эффективного управления ПЭД. Реализация такого подхода приводит к целому спектру взаимосвязанных задач: построение математической модели собственно ПЭД; построение математической ПЭД в составе сложной технической системы; идентификация параметров математической модели ПЭД; построение или выбор метода извлечения информации из расчетных или экспериментальных данных; оптимизация параметров ПЭД для достижения требуемых показателей энергоэффективности; построение алгоритмов оптимального управления ПЭД в условиях нестационарных воздействий. Особый интерес здесь вызывают методы предиктивного управления. В дальнейшем обозначенный спектр задач будем называть «комплекс задач построения цифрового двойника ПЭД».

Анализ приведенной литературы показывает рассогласование между современной теорией управления ПЭД в составе УЭЦН и подходами к построению математических моделей собственно ПЭД, используемых в алгоритмах управления. Это делает актуальной задачу разработки «цифрового двойника ПЭД», обладающего, при заданной точности, минимальной вычислительной сложностью и, соответственно, минимальным временем счета и минимальной ресурсоемкостью при аппаратной реализации.

Цель исследования

Разработка методики построения цифрового двойника погружного электродвигателя на основе подходов метода планирования эксперимента.

Методы исследования

В данном исследовании были использованы: обзор научной и технической литературы, анализ и обобщение сведений, вычислительный эксперимент, применение методов планирования эксперимента и других методов статистического анализа, включая критерии Стьюдента и критерии Фишера.

Результаты

Предложена методика разработки цифрового двойника ПЭД, обладающего, при заданной точности, минимальной вычислительной сложностью. На примере моделирования ПЭД ЭД(Т) 45-117-1000 показана возможность построения цифрового двойника с уменьшенным в 2–8 раз количества вычислительных операций.

Ключевые слова: метод планирования эксперимента, погружной электродвигатель, цифровой двойник, вычислительный эксперимент, критерий Фишера, критерий Стьюдента

DIGITAL TWIN OF A SUBMERSIBLE ELECTRIC MOTOR BASED ON DESIGN OF EXPERIMENTS METHODS

Relevance

The Russian fund of the oil producing wells as of 01.01.2021 amounted to more than 131 thousand units. Thus the most part of the specified fund is equipped with electrical submersible pumps (ESP) units, containing in their structure submersible electric motors (SEM). At present the following tendencies are manifested in the oil production industry: «... growth of environmental friendliness of oil and gas production and refining; growth of customer requirements to oilfield service technologies and operational efficiency, ..., sanctions on purchase of foreign equipment». As a result, work related to the energy efficiency of oil production and the increase in the time between repairs of the main equipment, including the submersible electric motor, is intensified. Here we should note the Order of Rosstandart 1397-st dated December 25, 2020 on the approval and introduction from October 1, 2021 of the actualized GOST R 56624 «Energy efficiency. Electrically driven submersible bladed pumps and electric motors for oil production. Determination of energy efficiency indicators». A significant place in solving the above problems is occupied by the issues of effective SEM management. The implementation of such an approach leads to a whole range of interrelated problems: building a mathematical model of the SEM itself; building a mathematical SEM as part of a complex technical system; identification of parameters of the mathematical model of SEM; design or selection of a method for extracting information from calculated or experimental data; optimization of SEM parameters to achieve the required energy efficiency indicators; construction of algorithms for optimal SEM control under non-stationary influences. Predictive control methods are of particular interest here. Hereinafter, the indicated range of problems will be referred to as «a complex of problems of constructing a digital twin of a SEM».

An analysis of the above literature shows a discrepancy between the modern theory of SEM control as part of an ESP and approaches to the construction of mathematical models of the SEM itself used in control algorithms. What makes the actual task of developing a «digital twin of the SEM» with a given accuracy, minimal computational complexity, and, accordingly, minimal computation time and minimal resource intensity in hardware implementation.

Aim of research

Development of a methodology for constructing a digital twin of a submersible electric motor, based on the approaches of the design of experiment method.

Research methods

In this study, we used: a review of scientific and technical literature, analysis and generalization of information, a computational experiment, the use of design experiment methods, and other methods of statistical analysis, including Student's t-test and Fisher's criterion.

Results

A technique for developing a digital twin of the SEM is proposed, which, with a given accuracy, has a minimum computational complexity. Using the example of modeling the SEM ED(T) 45-117-1000, the possibility of constructing a digital twin with a 2–8 times reduced number of computational operations is shown.

Keywords: design of experiment method, submersible electrical motor, digital twin, computational experiment, Fisher's criterion, Student's t-test

Введение

Российский фонд нефтяных скважин, дающих продукцию, на 01.01.2021 составлял более 131 тыс. скважин. При этом большая часть указанного фонда оборудована установками электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1, с. 95], содержащими в своей структуре погружные электродвигатели (ПЭД). В настоящее время в отрасли нефтедобычи проявляются следующие тенденции: «... рост экологичности добычи и переработки нефти и газа; рост требований заказчика к нефтесервисным технологиям и операционной эффективности, ..., санкции на покупку зарубежного оборудования» [1, с. 95]. Как следствие, активизируются работы, связанные с энергетической эффективностью нефтедобычи и увеличением межремонтных периодов основного оборудования, в том числе ПЭД [2–4]. Здесь необходимо отметить Приказ Росстандарта 1397-ст от 25 декабря 2020 г. об утверждении и введении с 1 октября 2021 г. актуализированного ГОСТ Р 56624 «Энергетическая эффективность. Скважинные электроприводные лопастные насосы и электродвигатели для добычи нефти. Определение индикаторов энергетической эффективности» [5].

Значительное место в решении задач, указанных выше, занимают вопросы эффективного управления ПЭД [6, 7]. Реализация такого подхода приводит к целому спектру взаимосвязанных задач: построение математической модели собственно ПЭД [8, 9]; построение математической ПЭД в составе сложной технической системы [10, 11]; идентификация параметров математической модели ПЭД [12–14]; построение или выбор метода извлечения информации из расчетных или экспериментальных данных [15, 16]; оптимизация параметров ПЭД для достижения требуемых показателей энергоэффективности [17]; построение алгоритмов оптимального управления ПЭД в условиях

нестационарных воздействий [18–21]. Особый интерес здесь вызывают методы предиктивного управления [22–24]. В дальнейшем обозначенный спектр задач, будем называть «комплекс задач построения цифрового двойника ПЭД» [25].

Анализ приведенной литературы показывает рассогласование между современной теорией управления ПЭД в составе УЭЦН и подходами к построению математических моделей собственно ПЭД, используемых в алгоритмах управления [17]. Это делает актуальной задачу разработки «цифрового двойника ПЭД», обладающего, при заданной точности, минимальной вычислительной сложностью, и, соответственно, минимальным временем счета и минимальной ресурсоемкостью при аппаратной реализации.

Основной тип погружного электродвигателя нефтедобычи — асинхронный с короткозамкнутым ротором [4, 9, 20]. Математическое моделирование таких электрических машин, как правило, строится на базе теории электромеханического преобразования энергии и приводит, в общем случае, к математическим моделям (ММ) в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений (СДАУ), решаемых численными методами с существенными затратами вычислительных ресурсов [9, 20].

Сформулированный выше «комплекс задач построения цифрового двойника ПЭД» требует минимизации вычислительных затрат в режиме эксплуатации цифрового двойника ПЭД. Такую возможность дает эквивалентирование исходных моделей в виде СДАУ [9, 20] математическими моделями, построенными с применением методов планирования эксперимента (МПЭ) [26–30]. Тогда для существующих связей и взаимозависимостей между параметрами математической модели ПЭД и внешними воздействиями появляется возможность аппроксимации полиномами вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + K + b_n x_n + b_{12} x_1 x_2 + K + b_{n-1,n} x_{n-1} x_n + b_{11} x_1^2 K + b_{nn} x_n^2, \quad (1)$$

где y — функция цели;

x_i — независимые переменные;

b_i — коэффициенты уравнения.

Задача определения оптимальной структуры уравнения (1) требует выполнения определенных правил и условий [26, 29]: члены второго порядка в уравнении (1) заменяются линейными, и добавляется фиктивная переменная равная 1, тогда при проведении серии из N опытов (физических или вычислительных), где используются различные комбинации факторов, получим в матричной форме:

$$Y = BX, \quad (2)$$

где Y — вектор столбец наблюдений;

B — вектор столбец коэффициентов;

X — матрица независимых переменных.

После преобразований коэффициенты уравнения будут определяться:

$$B = C^{-1} X^T Y, \quad (3)$$

где $C = X^T X$.

В случае диагональной матрицы C коэффициенты некоррелированные и их подсчет упрощается [29]. Для этого матрица X — матрица планирования должна быть ортогональной:

$$\sum_{j=1}^N x_{kj} x_{ij} = \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{kj} = 0, \quad (4)$$

где k и i — номера различных столбцов в матрице планирования.

Тогда из (2) имеем $m+1$ (количество коэффициентов в уравнении) независимых уравнений:

$$b_i = \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j / \sum_{j=1}^N x_{ij}^2. \quad (5)$$

Также важным свойством матрицы планирования является симметричность факторов:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0. \quad (6)$$

Для выполнения условий (4), (6) проводят кодирование факторов:

$$x_i = (X_i - X_{0i}) / \Delta X_i, \quad (7)$$

где X_i — кодируемый фактор;

X_{0i} — основной уровень;

ΔX_i — интервал варьирования.

Тогда максимальное значение фактора x_i будет соответствовать: $+1$; а минимальное: -1 .

Число всех возможных опытов N составит 2^n , где n — количество факторов. Планы, построенные таким образом, являются планами первого порядка, к ним относятся полный факторный эксперимент (ПФЭ) и дробный факторный эксперимент (ДФЭ) [26].

Для построения моделей второго порядка применим ортогональный центрально-композиционный план (ОЦКП) [26]. В общем случае в конструкцию ОЦКП входят ядро, которое является планом ПФЭ или ДФЭ, две дополнительные «звездные» точки α для каждого n фактора и центральная точка $x_i = 0$. При этом факторы варьируются сразу на пяти уровнях $x_i (-\alpha, -1, 0, 1, \alpha)$. Число опытов в ОЦКП составляет: $N = 2n + 2n + 1$.

Для выполнения условий (4) и (6) в ОЦКП необходимо выполнить следующее.

Преобразовать квадратичные факторы:

$$x'_{ij} = x_{ij}^2 - q, \quad (8)$$

где q — постоянная, определяемая следующим образом:

$$q = \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 / N. \quad (9)$$

Определить «Звездные» точки:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{N \cdot 2^n} - 2^n}{2}}. \quad (10)$$

Тогда коэффициенты уравнения (1) становится возможным определить по формуле (5).

К недостаткам такого подхода построения ММ МПЭ в заранее заданном n -мерном факторном пространстве необходимо отнести

- «справедливость» эквивалентирования исключительно в некоторой области, задаваемой матрицей планирования;
- существенный предварительный объем вычислений при построении ММ МПЭ;
- большое количество вычислительных операций при получении цифровых значений аппроксимационного полинома (1), который представляет собой ММ МПЭ.

Соответственно, возникает необходимость упрощения выражения (1) при сохранении требуемой точности в области применимости.

Рассмотрим детальнее этот процесс на примере построения цифрового двойника ПЭД.

Построение цифрового двойника ПЭД на основе МПЭ

Объект моделирования ПЭД ЭД(Т) 45-117-1000, номинальные энергетические показатели и параметры схемы замещения которого приведены в таблице 1, в соответствии с данными работы [20].

Необходимо установить зависимость между энергетическими показателями

ПЭД и параметрами его Т-образной схемы замещения при допущении об одинаковости параметров элементарных электрических машин составляющих ПЭД [9].

Примем, что в данном случае параметры статора и скольжение остаются номинальными; варьируются: приведенное активное сопротивление обмотки ротора R'_2 , приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора X'_2 , активное сопротивление контура намагничивания R_μ , индуктивное сопротивление контура намагничивания X_μ . Зависимыми являются: электромагнитный момент M , коэффициент полезного действия η и коэффициент мощности $\cos\varphi$.

Оптимальным для поставленных условий будет применение ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка, позволяющего получить независимые оценки коэффициентов при упрощенных вычислениях [26] при количестве вычислительных экспериментов $N = 25$. Параметры ПЭД варьируем в диапазоне от -25% до $+25\%$, образуя факторное пространство (таблица 2).

Таблица 1. Параметры ПЭД

Table 1. Parameters of the SEM

U_n , В	P_{2n} , кВт	s_n , %	n_n , об/мин	I_{1n} , А	$\cos\varphi_n$, о.е.	P_{1n} , кВт	η_n , %	$F_{тр}$, Н·м·с
1000	45	5,6	2 832	36,26	0,875	55	81,98	0,01348
Параметры схемы замещения								
R_1 , Ом	X_1 , Ом	R'_2 , Ом	X'_2 , Ом	R_μ , Ом	X_μ , Ом			
0,660	1,390	0,968	1,390	6,370	39,606			

Таблица 2. Параметры факторного пространства

Table 2. Parameters of the factor space

Фактор x_i	Параметр	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень	Интервал варьирования
x_1	R'_2 , Ом	0,726	1,210	0,968	0,242
x_2	X'_2 , Ом	1,043	1,738	1,390	0,348
x_3	R_μ , Ом	4,778	7,963	6,370	1,593
x_4	X_μ , Ом	29,705	49,508	39,606	9,902

Далее проводим кодирование факторов по (7) и вычисляем «звездную» точку по (10):

$$x_1 = (R'_2 - 0,968)/0,242;$$

$$x_2 = (X'_2 - 1,390)/0,348;$$

$$x_3 = (R'_\mu - 6,370)/1,593;$$

$$x_4 = (X'_\mu - 39,606)/9,902;$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{25 \cdot 2^4}{2^4}} - 2^4 \right)} = 1,414.$$

В результате выполнения ОЦКП получаем:

$$\begin{aligned} \bar{M} = & 156,218 - 36,359 \cdot x_1 - 1,161 \cdot x_2 - 7,405 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 + \\ & + 2,951 \cdot x_4 + 7,437 \cdot 10^{-1} \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,350 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 \cdot x_3 - \\ & - 6,023 \cdot 10^{-1} \cdot x_1 \cdot x_4 + 1,425 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 \cdot x_3 - \\ & - 2,591 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 \cdot x_4 - 4,348 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 \cdot x_4 - \\ & - 9,401 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,527 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - \\ & - 2,965 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 2,879 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 \cdot x_1 \cdot x_4 + \\ & + 2,183 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + 7,933 \cdot x_1^2 - 1,824 \cdot 10^{-1} \cdot x_2^2 - \\ & - 1,132 \cdot 10^{-1} \cdot x_3^2 - 7,417 \cdot 10^{-1} \cdot x_4^2; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{\eta} = & 81,897 - 1,165 \cdot x_1 - 8,461 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 - \\ & - 1,364 \cdot x_3 + 3,260 \cdot x_4 + 2,363 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 \cdot x_2 - \\ & - 2,776 \cdot 10^{-1} \cdot x_1 \cdot x_3 + 6,315 \cdot 10^{-1} \cdot x_1 \cdot x_4 - \\ & - 8,077 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,668 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 \cdot x_4 + \\ & + 5,030 \cdot 10^{-1} \cdot x_3 \cdot x_4 + 8,199 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - \\ & - 5,797 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - 4,197 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + \\ & + 8,164 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 \cdot x_1 \cdot x_4 - 2,208 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - \\ & - 1,611 \cdot 10^{-1} \cdot x_1^2 + 4,777 \cdot 10^{-2} \cdot x_2^2 - \\ & - 9,643 \cdot 10^{-2} \cdot x_3^2 - 1,055 \cdot x_4^2; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi = & 8,764 \cdot 10^{-1} - 2,040 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - \\ & - 7,645 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 + 5,374 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 + \\ & + 3,159 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + 1,859 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ & + 1,946 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_3 + 6,892 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_4 + \\ & + 1,810 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,750 \cdot 10^{-5} \cdot x_2 \cdot x_4 - \\ & - 3,392 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 \cdot x_4 - 3,114 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - \\ & - 1,973 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - 5,922 \cdot 10^{-5} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - \\ & - 1,080 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 \cdot x_1 \cdot x_4 + 2,512 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - \\ & - 3,404 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 + 6,740 \cdot 10^{-5} \cdot x_2^2 + \\ & + 2,388 \cdot 10^{-4} \cdot x_3^2 - 6,117 \cdot 10^{-3} \cdot x_4^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Полные квадратные уравнения (11)–(13) для ряда задач управления ПЭД трудозатратны при их аппаратной реализации.

Оценим значимость коэффициентов уравнений (11)–(13) с помощью методов статистического анализа [29] и исключим малозначимые члены.

Для этого определяются дисперсии коэффициентов:

$$S_{bi}^2 = S_y^2 / \sum_{j=1}^N x_{ij}^2, \quad (14)$$

где S_y^2 — дисперсия воспроизводимости.

Так как эксперимент расчетный ($S_y^2 = 0$), дисперсию воспроизводимости можно приравнять к остаточной дисперсии $S_y^2 = S_r^2$ при условии, что последняя определена при всех коэффициентах в уравнении.

Остаточная дисперсия характеризует ошибку между фактическим значением выходной величины y_j и предсказанным уравнением регрессии \hat{y}_j , связанной числом степеней свободы $f_r = N - l$, где N — количество наблюдений; l — количество коэффициентов в уравнении.

$$S_y^2 = S_r^2 = \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2 / f_r. \quad (15)$$

Определив дисперсии коэффициентов, выстраиваем доверительные интервалы $\Delta b_i = t \cdot S_{bi}$, где t — табличное значение критерия Стьюдента, принятое равным — 2,57 при доверительной вероятности $p = 95\%$ и числе степеней свободы $f_r = 25 - 20 = 5$. Если $|b_i| > \Delta b_i$, то коэффициент значим. Рассчитанные доверительные интервалы приведены в таблице 3.

После исключения малозначимых коэффициентов, уравнения регрессии примут вид:

$$\begin{aligned} \hat{M} = & 156,218 - 36,359 \cdot x_1 - 1,161 \cdot x_2 + \\ & + 2,951 \cdot x_4 + 7,933 \cdot x_1^2; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \hat{\eta} = & 81,897 - 1,165 \cdot x_1 - 1,364 \cdot x_3 + 3,260 \cdot x_4 - \\ & - 2,776 \cdot 10^{-1} \cdot x_1 \cdot x_3 + 6,315 \cdot 10^{-1} \cdot x_1 \cdot x_4 + \\ & + 5,030 \cdot 10^{-1} \cdot x_3 \cdot x_4 - 1,055 \cdot x_4^2; \end{aligned} \quad (17)$$

Таблица 3. Доверительные интервалы

Table 3. Confidence intervals

n	\hat{M}		$\hat{\eta}$		$\hat{c\oslash s \varphi}$	
	b	$\Delta b \cdot 10^{-1}$	b	$\Delta b \cdot 10^{-1}$	b	$\Delta b \cdot 10^{-3}$
0	156,218	43,62	81,897	10,6	$8,748 \cdot 10^{-1}$	5,70
1	-36,359	8,83	-1,165	2,14	$-2,040 \cdot 10^{-2}$	1,15
2	-1,161	8,83	$-8,461 \cdot 10^{-2}$	2,14	$-7,645 \cdot 10^{-3}$	1,15
—	—	—	—	—	—	—
33	$-1,132 \cdot 10^{-1}$	13,95	$9,643 \cdot 10^{-2}$	3,39	$2,388 \cdot 10^{-4}$	1,82
44	$-8,417 \cdot 10^{-1}$	13,95	-1,055	3,39	$-6,117 \cdot 10^{-3}$	1,82

$$\begin{aligned}
 c\oslash s \varphi = & 8,764 \cdot 10^{-1} - 2,040 \cdot 10^{-2} \cdot x_1 - \\
 & - 7,645 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 + 5,374 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 + \\
 & + 3,159 \cdot 10^{-2} \cdot x_4 + 1,859 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 + \\
 & + 1,946 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_3 + 6,892 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_4 - \\
 & - 3,392 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 \cdot x_4 - \\
 & - 3,404 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 - 6,117 \cdot 10^{-3} \cdot x_4^2. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Полученные уравнения необходимо проверить на адекватность по *F*-критерию Фишера. Если $F < F_{табл.}$, то уравнение адекватно.

Расчетное значение критерия Фишера:

$$F = S_r^2 / S_y^2. \quad (19)$$

Остаточная дисперсия пересчитывается с учетом оставшихся в уравнении коэффициентов и сравнивается с полученной ранее дисперсией воспроизводимости. Табличное значение критерия определяется при доверительной вероятности $p = 95\%$ и степенях свободы f_y и f_r .

Проверка по критерию Фишера показала, что полученные уравнения адекватны. Отметим, что полученные уравнения регрессии (16)–(18) содержат в 2–8 раза меньше вычислительных операций по сравнению с исходными (11)–(13).

Для дальнейшей работы уравнения необходимо привести к нормальному виду, выполнив «раскодирование» подстановкой выражений закодированных факторов в (16)–(18).

После математических преобразований уравнения примут вид:

$$\begin{aligned}
 \hat{M} = & 421,418 - 412,490 \cdot R'_2 - 3,339 \cdot X'_2 + \\
 & + 2,981 \cdot 10^{-1} \cdot X_\mu + 135,459 \cdot R_2'^2; \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{\eta} = & 75,796 - 10,665 \cdot R'_2 - 1,422 \cdot R_\mu + \\
 & + 7,237 \cdot 10^{-1} \cdot X_\mu - 7,202 \cdot 10^{-1} \cdot R'_2 \cdot R_\mu + \\
 & + 2,635 \cdot 10^{-1} \cdot R_2' \cdot X_\mu + \\
 & + 3,189 \cdot 10^{-2} \cdot R_\mu \cdot X_\mu - 1,076 \cdot 10^{-2} \cdot X_\mu^2; \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c\oslash s \varphi = & 8,037 \cdot 10^{-1} - 1,486 \cdot 10^{-1} \cdot R'_2 - \\
 & - 4,339 \cdot 10^{-2} \cdot X'_2 + 7,008 \cdot 10^{-3} \cdot R_\mu + \\
 & + 6,718 \cdot 10^{-3} \cdot X_\mu + 2,210 \cdot 10^{-2} \cdot R'_2 \cdot X'_2 + \\
 & + 5,048 \cdot 10^{-3} \cdot R_2' \cdot R_\mu + 6,718 \cdot 10^{-3} \cdot X_\mu + \\
 & + 2,876 \cdot 10^{-3} \cdot R_2' \cdot X_\mu - 2,151 \cdot 10^{-4} \cdot R_\mu \cdot X_\mu - \\
 & - 5,813 \cdot 10^{-2} \cdot R_2'^2 - 6,238 \cdot 10^{-5} \cdot X_\mu^2. \quad (22)
 \end{aligned}$$

Исследуем адекватность уравнений в диапазоне, превышающем исходную область планирования эксперимента, ранее заданной $\pm 25\%$. Для этого будем варьировать R'_2 от -40% до $+50\%$ с шагом 10% .

В таблице 4 приведены значения относительных абсолютных отклонений анализируемых параметров, рассчитанных по полным ММ МПЭ и по упрощенным ММ МПЭ от значений, рассчитанных по исходной Т-образной математической модели. Здесь индексами «полн» отмечены величины, полученные по моделям (11)–(13); индексами «упр» отмечены величины полученные по моделям (16)–(18).

Таблица 4. Отклонения характеристик ПЭД**Table 4.** Deviations of SEM characteristics

$\Delta R'_2, \%$	$R'_2, \text{ Ом}$	$\Delta M_{\text{полн}}, \%$	$\Delta M_{\text{упр}}, \%$	$\Delta \eta_{\text{полн}}, \%$	$\Delta \eta_{\text{упр}}, \%$	$\Delta \cos \varphi_{\text{полн}}, \%$	$\Delta \cos \varphi_{\text{упр}}, \%$
-40	0,581	1,94	1,94	0,51	1,01	0,39	0,40
-30	0,678	0,17	0,17	0,18	0,46	0,08	0,09
-20	0,774	0,55	0,55	0,02	0,14	0,03	0,03
-10	0,871	0,52	0,52	0,06	0,03	0,05	0,05
0	0,968	0,13	0,13	0,10	0,10	0,03	0,03
10	1,065	0,23	0,23	0,13	0,10	0,02	0,02
20	1,162	0,17	0,17	0,17	0,05	0,05	0,05
30	1,258	0,76	0,76	0,24	0,05	0,14	0,14
40	1,355	2,97	2,97	0,35	0,17	0,31	0,31
50	1,452	6,89	6,89	0,50	0,31	0,59	0,58

Из таблицы 4 следует, что максимальное расхождение между точным решением и значениями, полученными по упрощенной модели, в области применимости не превышает 1 %, что вполне удовлетворительно для решаемой задачи.

Выводы

1. Обоснован набор задач, связанных с повышением энергетической эффективности нефтедобычи и увеличением межремонтных периодов основного оборудования применительно к погружному электродвигателю — «комплекс задач построения цифрового двойника ПЭД».

2. Предложена методика построения математической модели ПЭД на базе подходов МПЭ.

3. Показана удовлетворительная точность полученной математической модели в области применимости.

Список источников

1. Экспертный Совет по механизированной добыче нефти // Механизированная добыча-2021: междунар. практ. конф. 2021. № 5. С. 94-97. URL: http://pump-sovet.com/upload/itogi_mdn-2021_neftegaz.ru_№5_2021.pdf (дата обращения: 05.03.2022).

2. Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Васильева Н.С. Статистический анализ технологических нарушений в эксплуатации

4. Показано сокращение вычислительных операций в 2–8 раз в полученной математической модели ПЭД по сравнению с классическим подходом.

5. Получены для ПЭД зависимости электромагнитного момента, КПД и коэффициента мощности от параметров цепи намагничивания и активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора. Показан их нелинейный характер.

6. Обоснована необходимость применения ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка, позволяющего получить независимые оценки коэффициентов математической модели при упрощенных вычислениях энергетических зависимостей ПЭД в составе региональных обособленных электротехнических комплексов.

погружных электродвигателей // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 3-16. С. 114-121. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.114-121.

3. Abulfaz H.I., Malik A.S. Evaluation of the Inter-Repair Operation Period of Electric Submersible Pump Units // Eureka: Physics and Engineering. 2020. Vol. 2020. No. 1. P. 79-86. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001105.

4. Копырин В.А., Портнягин А.Л., Хамитов Р.Н. Пути повышения эффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 11. С. 155-162. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361.
5. ГОСТ Р 56624-2020. Энергетическая эффективность. Скважинные электроприводные лопастные насосы и электродвигатели для добычи нефти. Определение индикаторов энергетической эффективности. Введ. 2021-10-01. М.: Стандартинформ, 2021. 20 с.
6. Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А. Имитационное моделирование асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4 (53). С. 13-18. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18.
7. Ding L., Li Y.W., Zargari N.R., Paes R. Sensorless Control of CSC-Fed PMSM Drives with Low Switching Frequency for Electrical Submersible Pump Application // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020. Vol. 56. No. 4. P. 3799-3808. DOI: 10.1109/TIA.2020.2990895.
8. Стариков А.В., Лисин С.Л., Табачникова Т.В. и др. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 4 (64). С. 155-167.
9. Архипова О.В., Чертов Р.А., Денисенко А.В. и др. Математическая модель погружного асинхронного двигателя как электротехнического комплекса // Инженерный вестник Дона. 2020. № 12 (72). С. 146-158.
10. Глазырин А.С., Полищук В.И., Тимошкин В.В. и др. Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 10. С. 213-227. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3404.
11. Barzegari Bafghi M.H., Vahedi A. Investigation of Start-Up Conditions on Electric Submersible Pump Driven with Flux Switching Motor // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2019. Vol. 27. No. 5. P. 3967-6979. DOI: 10.3906/elk-1811-197.
12. Kovalev V.Z., Arhipova O.V., Esin S.S. e.a. Identification of Mathematical Models Parameters of Electromechanical Consumers of Regionally Isolated Electrotechnical Complexes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260. P. 052014. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052014.
13. Каширских В. Г. Обоснование упрощения математической модели асинхронного электродвигателя для динамической идентификации // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 5 (145). С. 33-37. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-33-37.
14. Chen J., Huang J., Sun Y. Resistances and Speed Estimation in Sensorless Induction Motor Drives Using a Model with Known Regressors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66. No. 4. P. 2659-2667. DOI: 10.1109/TIE.2018.2849964.
15. Mohamed M., Mohamed E., Mohamed Al.A. e.a. Detection of Inter Turn Short Circuit Faults in Induction Motor using Artificial Neural Network // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2020. No. 26. P. 297-304. DOI: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087535.
16. Tomczyk M., Mielnik R., Sułowicz M. e.a. Application of Genetic Algorithm for Inter-Turn Short Circuit Detection in Stator Winding of Induction Motor // Energies. 2021. Vol. 14. No. 24. P. 8523. DOI: 10.3390/en14248523.
17. Хакимьянов М.И. Проблемы повышения энергоэффективности и управления электроприводами в нефтедобывающей промышленности // Главный энергетик. 2019. № 4. С. 46-59.
18. Kovalev V.Z., Bessonov V.O., Kuznetsov Y.M., Pavlov D.O. Direct Measurement of Rotational Rate of Asynchronous Electrical Submersible Motors for Oil Production // 12th International Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Dynamics 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8601471. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601471.
19. Шабонас А.Р. Оптимизация работы электроцентробежного насоса для повышения наработки на отказ // Нефтепромысловое дело. 2021. № 8 (632). С. 30-36. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-8(632)-30-36.

20. Хамитов Р.Н., Аникин В.В., Ковалев В.З., Парамзин А.О. Исследование функционирования электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов при вариациях внешних температурных воздействий // Омский научный вестник. 2020. № 4 (172). С. 19-25. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-19-25.
21. Gupta Y.B.S.S., Rao S.S. Experimental Evaluation of Direct Torque-Controlled 3-Phase Induction Motor under Inverter Faults // International Journal of Electronics. 2020. Vol. 107. No. 5. P. 719-739. DOI: 10.1080/00207217.2019.1672809.
22. Echeikh H., Quynh N.V., Alhelou H.H. e.a. Enhancement of Induction Motor Dynamics Using a Novel Sensorless Predictive Control Algorithm // Energies. 2021. Vol. 14. No. 14. DOI: 10.3390/en14144377.
23. Lu Z., Zhang R., Hu L. e.a. Model Predictive Control of Induction Motor Based on Amplitude-Phase Motion Equation // IET Power Electronics. 2019. Vol. 12. No. 9. P. 2400-2406. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0093.
24. Aziz A.G.M.A., Zaki Diab A.A., Rez H. Robust Sensorless Model-Predictive Torque Flux Control for High-Performance Induction Motor Drives // Mathematics. 2021. Vol. 9. No. 4. P. 1-29. DOI: 10.3390/math9040403.
25. Архипов Д.С., Латыпов Б.М., Сильнов Д.В. и др. Пути повышения энергоэффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти с применением цифровых двойников // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 1. С. 42-50. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-1-42-50.
26. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. Москва: Энергия, 1975. 184 с.
27. Durakovic B. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2017. Vol. 5. No. 3. P. 421-439. DOI: 10.21533/pen.v5i3.145.
28. Jankovic A., Chaudhary G., Goia F. Designing the Design of Experiments (DOE) — An Investigation on the influence of Different Factorial Designs on the characterization of Complex Systems // Energy and Buildings. 2021. Vol. 250. P. 111298. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111298.
29. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 9th Ed. Hoboken, NJ.: John Wiley and Sons, 2017. 734 p.
30. Schrangl P., Giarre L. On Optimal Design of Experiments for Static Polynomial Approximation of Nonlinear Systems // Systems and Control Letters. 2020. Vol. 143. P. 104758. DOI: 10.1016/j.sysconle.2020.104758.

References

1. Ekspertnyi Sovet po mekhanizirovannoi dobyche nefiti [Expert Council on Mechanized Oil Production]. *Mezhdunarodnaya prakticheskaya konferentsia «Mekhanizirovannaya dobycha — 2021»*. [International Practical Conference «Mechanized Production — 2021»]. 2021, No. 5, pp. 94-97. URL: http://pump-sovet.com/upload/itogi_mdn-2021_neftegaz.ru_No5_2021.pdf (accessed 05.03.2022). [in Russian].
2. Romanov V.S., Gol'dshtein V.G., Vasil'eva N.S. Statisticheskii analiz tekhnologicheskikh narushenii v ekspluatatsii pogruchnykh elektrodvigateli [Statistical Analysis of Technological Violations in Operation of Submersible Electric Motors of Oil Production]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Science Centre of the RAS]. 2018, Vol. 9, No. 3-16, pp. 114-121. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.114-121. [in Russian].
3. Abulfaz H.I., Malik A.S. Evaluation of the Inter-Repair Operation Period of Electric Submersible Pump Units. *Eureka: Physics and Engineering*, 2020, Vol. 2020, No. 1, pp. 79-86. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001105.
4. Kopyrin V.A., Portnyagin A.L., Khamitov R.N. Puti povysheniya effektivnosti ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov dobychi nefiti [Ways to Improve the Efficiency of Electric Submersible Pump Units for Oil Production]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*, 2019, Vol. 330, No. 11, pp. 155-162. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361. [in Russian].
5. GOST R 56624-2020. *Energeticheskaya effektivnost'. Skvazhinnye elektroprivodnye lopastnye nasosy i elektrodvigateli dlya dobychi nefiti. Opredelenie indikatorov energeticheskoi effektivnosti. Vved. 2021-10-01* [State Standard R 56624-2020. Energy Efficiency. Electrically

Driven Submersible Bladed Pumps and Electric Motors for Oil Production. Determination of Energy Efficiency Indicators. Introduced 2021–10–01]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 20 p. [in Russian].

6. Shandarova E.B., Bukreev V.G., Bystrov E.A. Imitatsionnoe modelirovanie asinkhronnogo elektroprivoda nasosa pogrurnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Simulation Modeling of Induction Motor Drive of a Submersible Technological Equipment Pump]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy — Electrotechnical Systems and Complexes*, 2021, No. 4 (53), pp. 13-18. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18. [in Russian].

7. Ding L., Li Y.W., Zargari N.R., Paes R. Sensorless Control of CSC-Fed PMSM Drives with Low Switching Frequency for Electrical Submersible Pump Application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, Vol. 56, No. 4, pp. 3799-3808. DOI: 10.1109/TIA.2020.2990895.

8. Starikov A.V., Lisin S.L., Tabachnikova T.V. e.a. Linearizovannaya matematicheskaya model' pogrurnogo asinkhronnogo dvigatelya [Linearized Mathematical Model of Submersible Asynchronous Motor]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki — Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2019, No. 4 (64), pp. 155-167. [in Russian].

9. Arkhipova O.V., Chertov R.A., Denisenko A.V. e.a. Matematicheskaya model' pogrurnogo asinkhronnogo dvigatelya kak elektrotekhnicheskogo kompleksa [Mathematical Model of a Submersible Asynchronous Motor as an Electrotechnical Complex]. *Inzhenernyy vestnik Dona — Engineering Journal of Don*, 2020, No. 12 (72), pp. 146-158. [in Russian].

10. Glazyrin A.S., Polishchuk V.I., Timoshkin V.V. i dr. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya v mul'tifaznoi sisteme koordinat pri nesimmetrii rotornykh tsepei [Modelling of Induction Motor in Multiphase Coordinate System for Asymmetry Rotor Cage]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*, 2021, Vol. 332, No. 10, pp. 213-227. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3404. [in Russian].

11. Barzegari Bafghi M.H., Vahedi A. Investigation of Start-Up Conditions on Electric Submersible Pump Driven with Flux Switching Motor. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2019, Vol. 27, No. 5, pp. 3967-6979. DOI: 10.3906/elk-1811-197.

12. Kovalev V.Z., Arhipova O.V., Esin S.S. e.a. Identification of Mathematical Models Parameters of Electromechanical Consumers of Regionally Isolated Electrotechnical Complexes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1260, pp. 052014. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052014.

13. Kashirskikh V. G. Obosnovanie uproscheniya matematicheskoi modeli asinkhronnogo elektrodvigateleya dlya dinamicheskoi identifikatsii [Reasons for Simplifying the Mathematical Model of Induction Motor for Dynamic Identification]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika — Mining Equipment and Electromechanics*. 2019, No. 5 (145), pp. 33-37. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-33-37. [in Russian].

14. Chen J., Huang J., Sun Y. Resistances and Speed Estimation in Sensorless Induction Motor Drives Using a Model with Known Regressors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, Vol. 66, No. 4, pp. 2659-2667. DOI: 10.1109/TIE.2018.2849964.

15. Mohamed M., Mohamed E., Mohamed Al.A. e.a. Detection of Inter Turn Short Circuit Faults in Induction Motor using Artificial Neural Network, *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*, 2020, No. 26, pp. 297-304. DOI: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087535.

16. Tomczyk M., Mielnik R., Sułowicz M. e.a. Application of Genetic Algorithm for Inter-Turn Short Circuit Detection in Stator Winding of Induction Motor. *Energies*, 2021, Vol. 14, No. 24, pp. 8523. DOI: 10.3390/en14248523.

17. Khakim'yanov M.I. Problemy povysheniya energoeffektivnosti i upravleniya elektroprivodami v neftedobyvayushchei promyshlennosti [Problems of Increasing Energy Efficiency and Management of Electric Drives in Oil Producing Industry]. *Glavnyy energetik — Electrical Superintendent*, 2019, No. 4, pp. 46-59. [in Russian].

18. Kovalev V.Z., Bessonov V.O., Kuznetsov Y.M., Pavlov D.O. Direct Measurement of Rotational Rate of Asynchronous Electrical

Submersible Motors for Oil Production. *12th International Scientific and Technical Conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», Dynamics 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8601471. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601471.

19. Shabonas A.R. Optimizatsiya raboty elektrosentrobezhnogo nasosa dlya povysheniya narabotki na otkaz [Electric Submersible Pump Operation Mode Optimization to Increase the Run-to-Failure Time]. *Neftepromyslovoe delo — Oilfield Engineering*, 2021, No. 8 (632), pp. 30-36. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-8(632)-30-36. [in Russian].

20. Khamitov R.N., Anikin V.V., Kovalyev V.Z., Paramzin A.O. Issledovanie funktsionirovaniya elektrotekhnicheskikh kompleksov ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov pri variatsiyakh vneshnykh temperaturnykh vozdeystvii [Research of Operation of Electrotechnical Complexes of Electric Centrifugal Pumps Units for Variations in External Temperature Effects]. *Omskij nauchnyj vestnik — Omsk Scientific Bulletin*, 2020, No. 4 (172), pp. 19-25. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-172-19-25. [in Russian].

21. Gupta Y.B.S.S., Rao S.S. Experimental Evaluation of Direct Torque-Controlled 3-Phase Induction Motor under Inverter Faults. *International Journal of Electronics*, 2020, Vol. 107, No. 5, pp. 719-739. DOI: 10.1080/00207217.2019.1672809.

22. Echeikh H., Quynh N.V., Alhelou H.H. e.a. Enhancement of Induction Motor Dynamics Using a Novel Sensorless Predictive Control Algorithm. *Energies*, 2021, Vol. 14, No. 14. DOI: 10.3390/en14144377.

23. Lu Z., Zhang R., Hu L. e.a. Model Predictive Control of Induction Motor Based on Amplitude-Phase Motion Equation. *IET Power Electronics*, 2019, Vol. 12, No. 9, pp. 2400-2406. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0093.

24. Aziz A.G.M.A., Zaki Diab A.A., Rez H. Robust Sensorless Model-Predictive Torque Flux Control for High-Performance Induction Motor Drives. *Mathematics*, 2021, Vol. 9, No. 4, pp. 1-29. DOI: 10.3390/math9040403.

25. Arkhipov D.S., Latypov B.M., Sil'nov D.V. e.a. Puti povysheniya energo-effektivnosti ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov dobychi nefti s primeneniem tsifrovyykh dvoynikov [Ways to Improve the Energy Efficiency of Electric Submersible Pump Units for Oil Production Using Digital Twins]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 1, pp. 42-50. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-1-42-50. [in Russian].

26. Ivobotenko B.A., Il'inskii N.F., Kopylov I.P. *Planirovanie Eksperimenta v elektromekhanike* [Designing of Experiments in Electromechanics]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 184 p. [in Russian].

27. Durakovic B. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2,17, Vol. 5, No. 3, pp. 421-439. DOI: 10.21533/pen.v5i3.145.

28. Jankovic A., Chaudhary G., Goia F. Designing the Design of Experiments (DOE) — An Investigation on the Influence of Different Factorial Designs on the Characterization of Complex Systems. *Energy and Buildings*, 2021, Vol. 250, pp. 111298. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111298.

29. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 9th Ed. Hoboken, NJ., John Wiley and Sons, 2017. 734 p.

30. Schrangl P., Giarre L. On Optimal Design of Experiments for Static Polynomial Approximation of Nonlinear Systems. *Systems and Control Letters*, 2020, Vol. 143, pp. 104758. DOI: 10.1016/j.sysconle.2020.104758.



Фанис Фанилович Сираев
Fanis F. Siraev

*студент кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*



Регина Тагировна Хазиева
Regina T. Khazieva

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, Уфа, Россия*

УДК 62-83(07)

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-45-51

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Актуальность

Электропривод переменного тока широко используется в промышленности, он позволяет снизить энергопотребление и обеспечивает высокую надежность. Свое широкое распространение получил из-за высоких технологических характеристик и простоты конструкции, положительно отражающихся на внедрение в производство и модернизации.

Моделирование системы управления электропривода осуществляется с целью регулирования и улучшения технологических параметров. Собранный модель в программе Matlab/Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystem позволяет исследовать эффективность управления электроприводом насоса с помощью наглядной модели перед переходом на реальные объекты благодаря плавному регулированию частоты вращения в широком диапазоне оборотов.

Цель исследования

В данной работе осуществляется исследование частотно-регулируемого электропривода насоса. В часы минимума нагрузки предприятий, где используется данная система, будет уменьшаться нагрузка на устройство, так как расход будет значительно меньше. При нагрузках, мощность, потребляемую электроприводом можно снизить, если изменить скорость вращения двигателя. Это достигается разными способами, но наиболее актуальным является использование преобразователя частоты.

Основной задачей является компьютерное моделирование частотно-регулируемого электропривода насоса и исследование результатов моделирования.

Методы исследования

В данном исследовании были использованы следующие методы: изучение научной литературы, компьютерное моделирование, выполненное в программном комплексе Matlab/Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystem.

Результаты

Авторами осуществляется исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса, реализующей снижение скорости вращения для уменьше-

ния мощности, потребляемой электроприводом в часы минимума нагрузки предприятий. Компьютерная модель исследуемого объекта разработана в программном комплексе Matlab/Simulink, произведена оценка скалярного управления электроприводом. В результате моделирования получены осциллограммы, где наглядно видна возможность снижения потребляемой мощности за счет регулирования частоты вращения двигателя.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный электродвигатель, преобразователь частоты, частотное регулирование, энергоэффективность

INVESTIGATION OF A FREQUENCY-REGULATORY ELECTRIC DRIVE WITH ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

Relevance

AC electric drive is widely used in industry, it reduces power consumption and provides high reliability. It has received its wide distribution due to its high technological characteristics and simplicity of design, which have a positive impact on the introduction into production and modernization.

Modeling of the electric drive control system is carried out in order to regulate and improve technological parameters. The assembled model in the Matlab/Simulink program using the SimPowerSystem library allows you to study the efficiency of controlling the electric drive of the pump using a visual model before switching to real objects, thanks to smooth speed control in a wide range of revolutions.

Aim of research

In this paper, a study is made of a frequency-controlled pump electric drive. During the hours of minimum load of enterprises where this system is used, the load on the device will decrease, since the consumption will be much less. Under loads, the power consumed by the drive can be reduced by changing the motor speed. This is achieved in many ways, but the most relevant is the use of a frequency converter.

The main task is computer simulation of a frequency-controlled electric pump drive and the study of simulation results.

Research methods

In this study, the following methods were used: the study of scientific literature, computer modeling performed in the Matlab/Simulink software package using the SimPowerSystem library.

Results

The authors carry out a study of a frequency-controlled electric drive of the pump, which implements a reduction in the rotation speed to reduce the power consumed by the electric drive during the hours of minimum load of enterprises. The computer model of the object under study was developed in the Matlab/Simulink software package, the scalar control of the electric drive was evaluated. As a result of the simulation, oscillograms were obtained, where the possibility of reducing power consumption by adjusting the engine speed is clearly visible.

Keywords: electric drive, asynchronous motor, frequency converter, frequency control, energy efficiency

Для снижения потребляемой нагрузки в часы минимума нагрузки предприятий, где используется данная система, можно снизить мощность, потребляемую электроприводом, если изменить скорость вращения двигателя. Это достигается разными способами, но наиболее актуальным является использование преобразователя частоты.

Актуальной задачей является исследование системы управления частотно-регулируемого электропривода насоса с системой управления на основе диодов и IGBT-транзисторов, реализующих способ изменения напряжения или частоты для регулирования исследуемых параметров.

Преобразователь частоты — это полупроводниковое силовое устройство, которое позволяет питать электрические двигатели переменным напряжением и частоты, при этом сам преобразователь подключается к сети.

Большой набор параметров расширяет область применения преобразователей. Кроме того, такие устройства имеют 8 коммутационных комбинаций:

- 6 дискретных pnp/rnp входов;
- 2 аналоговых входа, которые могут использоваться как дискретные входы.

Таким образом, при регулировании частоты питания осуществляется и регулирование частоты вращения ротора. Поэтому такие устройства являются наиболее перспективными, так как они более экономичны и обеспечивают высокое качество регулирования скорости по сравнению с другими способами управления электропривода с асинхронным электродвигателем.

Способ изменения скорости вращения двигателя путем изменения действующего значения частоты и напряжения источника называется скалярным управлением, который изменяется по закону:

$$\frac{U}{f^n} = const, \quad (1)$$

где $n \geq 1$.

Скорость вращения ротора асинхронного двигателя:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (2)$$

где n — скорость вращения ротора, которая определяется формулой

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s), \quad (3)$$

где s — скольжение.

Механические характеристики электропривода приведены на рисунке 1, их описывает выражение:

$$M_C = M_{C0} + (M_{СНОМ} - M_{C0}) * \left(\frac{\omega}{\omega_{НОМ}}\right)^\gamma, \quad (4)$$

где M_C — статический момент сопротивления;

M_{C0} — статический момент сопротивления механизма в режиме холостого хода (то есть без нагрузки);

s — статический момент сопротивления механизма, вращающегося со скоростью равной номинальной ;

γ — показатель степени, учитывающий характер зависимости $M_C(\omega)$.

Объектом исследования является электропривод с асинхронным электродвигателем, соответственно, $\gamma = 2$.

В общем случае движение электропривода, совершающего вращательное движение, можно представить в виде следующего уравнения:

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (5)$$

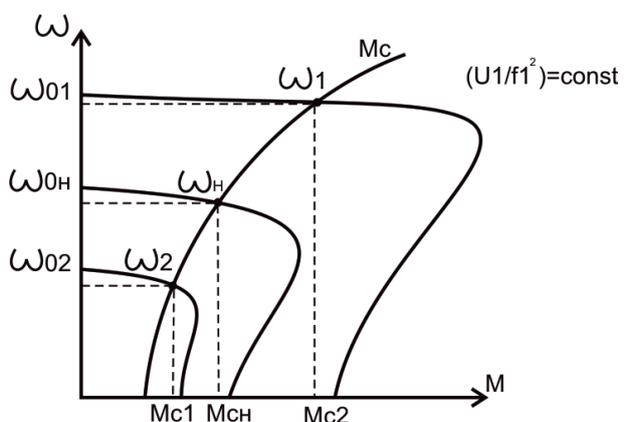


Рисунок 1. Механические характеристики

Figure 1. Mechanical characteristics

Регулирование вращения электропривода позволяет реализовать плавный процесс работы насоса, что благоприятно влияет на процесс перекачки. Данный способ регулирования является энергетически эффективным, позволяет снизить мощность электропривода, когда это необходимо.

В статье рассматривается проектирование частотно-регулируемого электропривода насоса, который позволяет добиться снижения ресурсоемкости, её стоимости, увеличить КПД устройства.

Система управления электропривода представляет собой электротехнический комплекс, модель которого построена с использованием библиотеки SimPower-System в программном комплексе Matlab/Simulink (рисунок 2). Необходимость компьютерного моделирования обусловлена режимами работы частотно-регулируемого привода и дороговизной элементной базы. Использование наглядной модели позволяет избежать затрат на дорогостоящие комплектующие перед переходом на реальные объекты.

Источник постоянного напряжения (DC Voltage Source) подключается к преобразователю частоты. В качестве преобразователя частоты был использован блок

Universal Bridge с IGBT-транзистором, которые рассматриваются как ключи на исследуемой частоте. Такие транзисторы имеют малые потери в открытом состоянии при больших токах и высоких значениях напряжения. Кроме того, имеется блок широтно-импульсной модуляции PWM Generator, который подключается к инвертору. Результаты исследования выводятся в осциллографы.

Полученная информация в результате решения задачи магнитного поля переменных токов позволила понять, как ведут себя параметры в ходе проведения исследования. Так, четко видно снижение угловой скорости ротора при снижении напряжения по осциллограмме, неизменное значение электромагнитного момента в течение рассматриваемого времени. Результаты решенной задачи приведены на рисунках 3–5.

Осциллограммы, полученные в ходе исследования, показывают торможение электродвигателя при снижении напряжения. На рисунке 3 представлена осциллограмма, которая показывает, что при увеличении статического момента происходит снижение угловой скорости ротора.

Осциллограмма электромагнитного момента при уменьшении напряжения

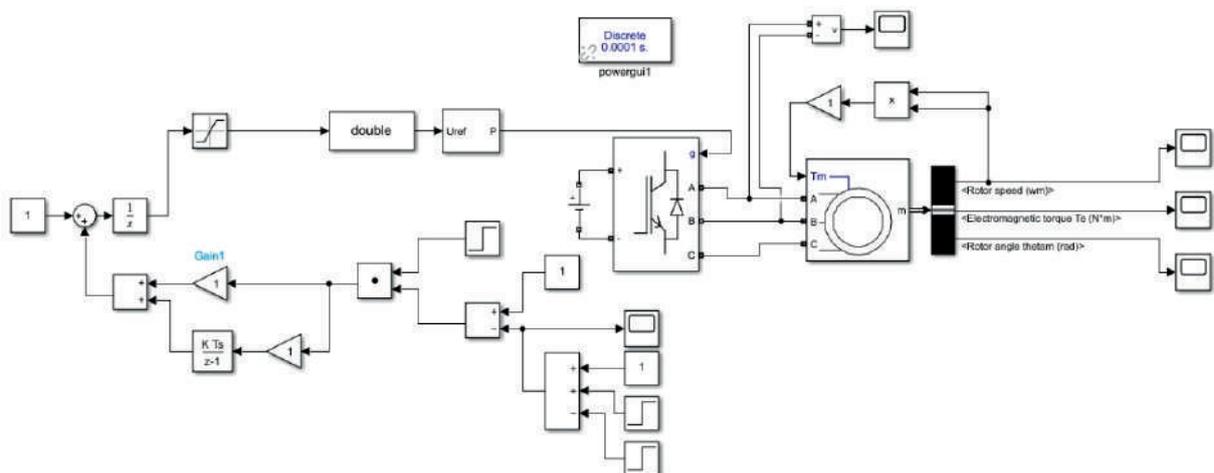


Рисунок 2. Модель частотно-регулируемого электропривода с асинхронным электродвигателем

Figure 2. Model of frequency-controlled electric drive with asynchronous electric motor

представлена на рисунке 4. Среднее значение электромагнитного момента остается неизменным в течение рассматриваемого промежутка времени. В начальный интервал времени, когда машина разгоняется, момент изменяется в определенных пределах. Через 6 с момент принимает постоянное значение.

На рисунке 5 видно, что угол поворота ротора увеличивается в интервале $t = 0-6$ с, затем снижается. Снижение происходит из-за того, что угол поворота

ротора имеет зависимость от скольжения, которое, в свою очередь, зависит от напряжения.

При снижении напряжения снижается угловая скорость двигателя, которая определяет частоту вращения, что свидетельствует об уменьшении потребления реактивной мощности за счет снижения тока намагничивания, при этом одновременно уменьшаются потери активной мощности, соответственно, увеличивается КПД.

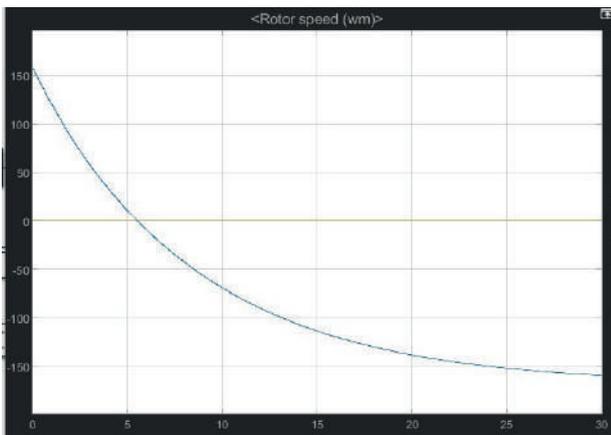


Рисунок 3. Осциллограмма угловой скорости ротора при снижении напряжения

Figure 3. Oscillogram of the angular velocity of the rotor when the voltage decreases

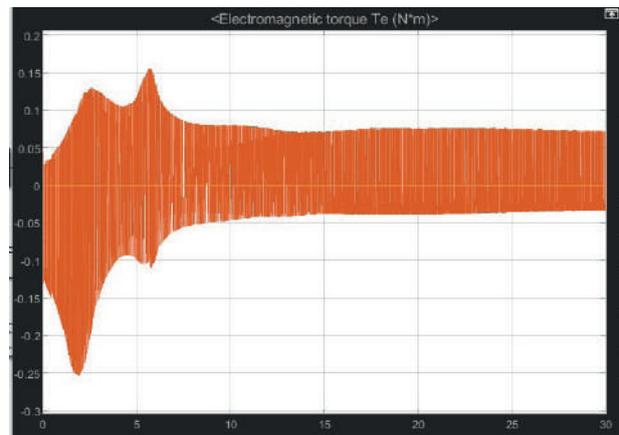


Рисунок 4. Осциллограмма электромагнитного момента при снижении напряжения

Figure 4. Oscillogram of the electromagnetic moment when the voltage decreases



Рисунок 5. Осциллограмма угла поворота ротора при снижении напряжения

Figure 5. Oscillogram of the angle of rotation of the rotor when the voltage decreases

Заключение

Авторами проведено исследование частотно-регулируемого электропривода насоса, реализующего снижение потребляемой мощности в часы минимума нагрузки предприятий, за счет регулирования частоты вращения электродвигателя, что позволит достичь экономии электроэнергии. В программном комплексе Matlab/Simulink разработана компьютерная модель частотно-регулируемого электропривода с асинхронным электродвигателем, произведена оценка энергоэффективности. Использование преобразователя частоты увеличивает энергоэффективность благодаря плавному регулированию частоты вращения в широком диапазоне оборотов.

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

Список источников

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АCADEMA, 2004. 202 с.
2. Коломиец А.П. Электропривод и электрооборудование. М.: КолосС, 2007. 328 с.
3. Усольцев А.А. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 164 с.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
5. Воронин П.А. Системы управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода: метод. указания по курсу «Системы управления электроприводов». Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2011. 51 с.
6. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: АCADEMA, 2006. 265 с.
7. Димукашева Г.Е., Стрельников Д.С., Зекрин Б.Р., Хазиева Р.Т. Изучение устойчи-

1. Основной задачей компьютерного моделирования разработанного технического решения являлось получение количественных и качественных результатов процесса скалярного управления электропривода.

2. В результате исследования работы электропривода при уменьшении напряжения определено снижение угловой скорости ротора, что позволило характеризовать уменьшение потребляемой мощности за счет снижения тока намагничивания, что влечет за собой увеличение КПД, соответственно, подтверждает эффективность частотного регулирования при небольших нагрузках.

3. Решение задачи с помощью компьютерного моделирования позволило подтвердить повышение энергоэффективности при скалярном управлении электропривода в широком диапазоне оборотов.

ности работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода магистрального насосного агрегата // Булатовские чтения: сб. ст. IV Международной научно-практической конференции, 2020. С. 275-280.

References

1. Braslavskii I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayushchii asinkhronnyi elektroprivod* [Energy-Saving Asynchronous Electric Drive]. Moscow, ACADEMA Publ., 2004. 202 p. [in Russian].
2. Kolomiets A.P. *Elektroprivod i elektrooborudovanie* [Electric Drive and Electrical Equipment]. Moscow, KolosS Publ., 2007. 328 p. [in Russian].
3. Usol'tsev A.A. *Sovremennyi asinkhronnyi elektroprivod optiko-mekhanicheskikh kompleksov: ucheb. posobie* [Modern Asynchronous Electric Drive of Optical-Mechanical Complexes: Training Manual]. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO, 2011. 164 p. [in Russian].
4. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical

Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p. [in Russian].

5. Voronin P.A. *Sistemy upravleniya chastotno-reguliruemogo asinkhronnogo elektroprivoda: metod. ukazaniya po kursu «Sistemy upravleniya elektroprivodov»* [Control Systems of Frequency-Controlled Asynchronous Electric Drive: Methodological Guidelines for the Course «Control Systems of Electric Drives»]. Orenburg, IPK GOU OGU, 2011. 51 p. [in Russian].

6. Sokolovskii G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Alternating Current Electric Drives with

Frequency Control]. Moscow, ACADEMA Publ., 2006. 265 p. [in Russian].

7. Dimukasheva G.E., Strel'nikov D.S., Zekrin B.R., Khazieva R.T. *Izuchenie ustoi-chivosti raboty chastotno-reguliruemogo asinkhronnogo elektroprivoda magistral'nogo nasosnogo agregata* [Studying the Operation Stability of a Frequency-Controlled Asynchronous Electric Drive of the Main Pumping Unit]. *Sbornik statei «Bulatovskie chteniya» IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Collection of Articles «Bulatov Readings» of the IV International Scientific and Practical Conference]. 2020, pp. 275-280. [in Russian].



Александр Владимирович Сорокин
Alexander V. Sorokin

*аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*



Виталий Алексеевич Шабанов
Vitaly A. Shabanov

*кандидат технических наук, профессор кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*

УДК 621.316.925.1

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-52-62

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Актуальность

По оценкам различных исследований на однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью приходится до 75 % от всех видов повреждений. При этом значительная часть однофазных замыканий переходит в многофазные короткие замыкания. В настоящее время разрабатываются различные алгоритмы релейной защиты от замыканий на землю и определения места повреждения, для работы которых необходимо знать поврежденную фазу. Неправильное определение поврежденной фазы будет приводить к нарушению функционирования этих алгоритмов.

Цель исследования

Разработка алгоритма определения поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю и его функциональной схемы и исследование разработанного алгоритма на модели.

Методы исследования

Имитационное моделирование реализовано в программном комплексе Matlab Simulink.

Результаты

Произведена оценка факторов, влияющих на работу устройств, определяющих поврежденную фазу при однофазных замыканиях на землю по наименьшему значению фазного напряжения. Разработаны алгоритм определения поврежденной фазы и его функциональная схема. С помощью имитационного моделирования выполнены исследования, показавшие работоспособность разработанного алгоритма.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика, однофазное замыкание на землю, сеть с изолированной нейтралью, определение поврежденной фазы

ALGORITHM FOR DETERMINING THE DAMAGED PHASE DURING A SINGLE-PHASE EARTH FAULT IN NETWORKS WITH AN ISOLATED NEUTRAL

Relevance

According to various studies, single-phase earth faults in networks with isolated neutral account for up to 75 % of all types of damage. At the same time, a significant part of single-phase short circuits turn into multiphase short circuits. Currently, various algorithms are being developed for relay protection against earth faults and determining the location of damage, for which it is necessary to know the damaged phase. Incorrect determination of the damaged phase will lead to a malfunction of these algorithms.

Aim of research

Development of an algorithm for determining the damaged phase in single-phase earth faults and its functional scheme and the study of the developed algorithm on the model.

Research methods

Simulation modeling is implemented in the Matlab Simulink software package.

Results

The factors affecting the operation of devices that determine the damaged phase in single-phase earth faults by the lowest value of the phase voltage are evaluated. An algorithm for determining the damaged phase and its functional scheme have been developed. With the help of simulation modeling, studies were carried out that showed the efficiency of the developed algorithm.

Keywords: relay protection and automation, single-phase earth fault, network with isolated neutral, determination of the damaged phase

Введение

Одним из наиболее распространенных повреждений в сетях с изолированной нейтралью является однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). Несмотря на возможность работы распределительной сети с однофазным замыканием, по ряду причин он недопустим в течение длительного времени. Одной из существенных причин является возможность перехода ОЗЗ в междуфазное короткое замыкание [1]. Согласно статистике, до 80 % однофазных замыканий в сетях собственных нужд электрических станций переходят в междуфазные короткие замыкания и 70 % — в распределительных сетях [2, 3]. В настоящее время различными исследователями ведется разработка новых алгоритмов релейной защиты и противоаварийной автоматики, направленных на локализацию и ликвидацию ОЗЗ [4–7]. Но пока не разработано универсального селективного алгоритма релейной защиты, подходящего для разных конфи-

гураций сетей. Во многих разрабатываемых алгоритмах используются параметры поврежденной фазы [8–11]. Особенно стоит отметить разработку алгоритмов определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима [12–16]. От точности работы подобных устройств зависит время, которое будет затрачено на локализацию и ремонт поврежденного участка сети [17]. Это, естественно, влияет на величину материального ущерба от нарушения электроснабжения. Однако для корректной работы данных устройств и алгоритмов необходимо, прежде всего, безошибочно определить поврежденную фазу. В противном случае возможны отказы устройств релейной защиты и автоматики, неверное определение расстояния до места ОЗЗ.

В литературе [18] описываются устройства и способы, предназначенные для определения поврежденной фазы. Принцип действия представленных схем

основан на выявлении фазы с наименьшим значением фазного напряжения. Однако использование данного принципа может привести к алгоритмическому отказу в ряде случаев. Для того чтобы прояснить причины возникновения подобных отказов, проанализируем факторы, влияющие на величину напряжения в поврежденной фазе.

При металлическом ОЗЗ напряжение в месте замыкания равно нулю, а напряжение замкнувшейся фазы определяется падением напряжения на участке линии от шин до точки замыкания от протекания токов нагрузки и замыкания. В соответствии с методом симметричных составляющих напряжение в поврежденной фазе при металлическом замыкании можно определить как [19]:

$$\dot{U}_{\text{нф}} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0, \quad (1)$$

где U_1 , U_2 , U_0 — падения напряжения в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей (В).

Преобразуем выражение (1), учитывая, что сопротивление прямой и обратной последовательностей для линий электропередачи равны:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{нф}} &= \underline{Z}_1 \cdot (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0) \cdot \dot{I}_0 (\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1) = \\ &= \underline{Z}_1 (\dot{I}_\phi + k \cdot \dot{I}_0); \end{aligned} \quad (2)$$

где $\dot{I}_1; \dot{I}_2; \dot{I}_0$ — токи прямой, обратной и нулевой последовательностей (А);

$\underline{Z}_1; \underline{Z}_0$ — сопротивления прямой и нулевой последовательностей (Ом);

$k = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1}$; — коэффициент компенсации.

При наличии переходного сопротивления в месте ОЗЗ выражение (2) должно учитывать падение напряжения на переходном сопротивлении:

$$\dot{U}_{\text{нф}} = \underline{Z}_{1\text{уд}} \cdot L_x \cdot (\dot{I}_\phi + k \cdot \dot{I}_0) + 3\dot{I}_0 R_{\text{п}}; \quad (3)$$

где $Z_{1\text{уд}}$ — удельное сопротивление линии электропередачи (Ом/км);

L_x — расстояние до точки ОЗЗ (км);

$R_{\text{п}}$ — переходное сопротивление (Ом).

Из выражения (3) следует, что величина фазного напряжения поврежденной фазы зависит от следующих факторов: расстояния до места ОЗЗ; тока нагрузки поврежденной фазы; величины тока нулевой последовательности; наличия переходного сопротивления и его величины.

Фазные напряжения относительно земли в режиме однофазного замыкания на землю можно выразить через напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{AS} = \dot{U}_{AL} + \dot{U}_{NS}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_{BS} = \dot{U}_{BL} + \dot{U}_{NS}; \quad (5)$$

$$\dot{U}_{CS} = \dot{U}_{CL} + \dot{U}_{NS}, \quad (6)$$

где $\dot{U}_{AL}; \dot{U}_{BL}; \dot{U}_{CL}$; — доаварийные фазные напряжения соответствующих фаз (соответствующие аварийным напряжениям относительно нейтрали);

$\dot{U}_{AS}; \dot{U}_{BS}; \dot{U}_{CS}$ — фазные напряжения в режиме однофазного замыкания на землю, соответствующих фаз.

Напряжение смещения нейтрали равно напряжению нулевой последовательности U_0 и связано с фазными напряжениями выражением:

$$\dot{U}_{NS} = \frac{\dot{U}_{AS} + \dot{U}_{BS} + \dot{U}_{CS}}{3}. \quad (7)$$

Как известно, с течением времени переходное сопротивление в месте замыкания может изменяться как в сторону уменьшения (прогорание изоляции), так и в сторону увеличения (увеличение длины дуги). При изменении переходного сопротивления в месте ОЗЗ будет изменяться напряжение в поврежденной фазе по (3), а, следовательно, напряжение смещения нейтрали по (7) и фазные напряжения в неповрежденных фазах по (4). Таким образом, при изменении переходного сопротивления изменяются все фазные напряжения относительно земли. Треугольник линейных напряжений остается неизменным [20], при этом концы векторов фазных напряжений относительно земли перемещаются по

полуокружностям, как показано на рисунке 1, а.

В зависимости от соотношений векторов фазных напряжений по величине и направлению возможны три режима ОЗЗ:

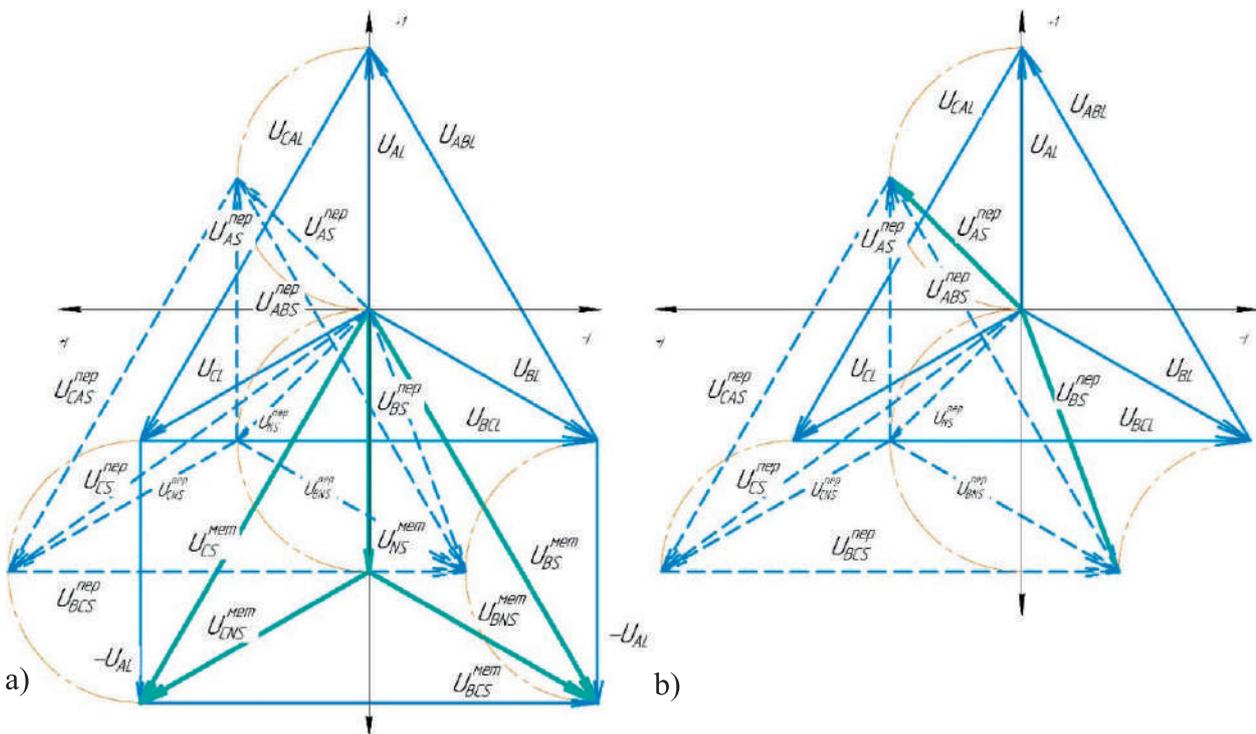
режим 1 — фазное напряжение в поврежденной фазе меньше напряжения в неповрежденных фазах (рисунок 1, б);

режим 2 — напряжение поврежденной фазы (фаза «А» на рисунке 2, а) равно напряжению фазы, отстающей на 120° (фазы «В» на рисунке 2, а);

режим 3 — напряжение поврежденной фазы «А» больше напряжения отстающей на 120° фазы «В» (рисунок 2, б).

Как видно из перечисленных трех режимов и диаграмм на рисунках 1 и 2, корректная работа алгоритмов, работающих по принципу определения фазы с наименьшим значением фазного напря-

жения, возможна только в режиме 1. В режимах 2 и 3 возникнет алгоритмическая ошибка, которая приведет к тому, что в алгоритм ОМП или релейной защиты будут поданы токи и напряжения неповрежденной фазы. Это, в свою очередь, приведет к ошибке вычисления расстояния до места ОЗЗ или к излишним и ложным действиям релейной защиты. Рассмотрим разработанный алгоритм, способный правильно определять поврежденную фазу во всех трех режимах ОЗЗ. Определение вида повреждения в алгоритме не рассматривается, так как проблем с определением вида повреждения не возникает. Однофазное замыкание на землю можно определять, например, по появлению напряжения или тока нулевой последовательности [21].



верхний индекс «пер» — замыкание с наличием переходного сопротивлением в месте ОЗЗ;
 верхний индекс «мет» — металлическое замыкание

the upper index «пер» is a short circuit with a transient resistance at the point of closure;
 the upper index «мет» is a metal short circuit

Рисунок 1. Векторные диаграммы напряжений: при изменении величины переходного сопротивления (а), режим 1 (б)

Figure 1. Vector diagrams of stresses: when the value of the transient resistance changes (а), mode 1 (б)

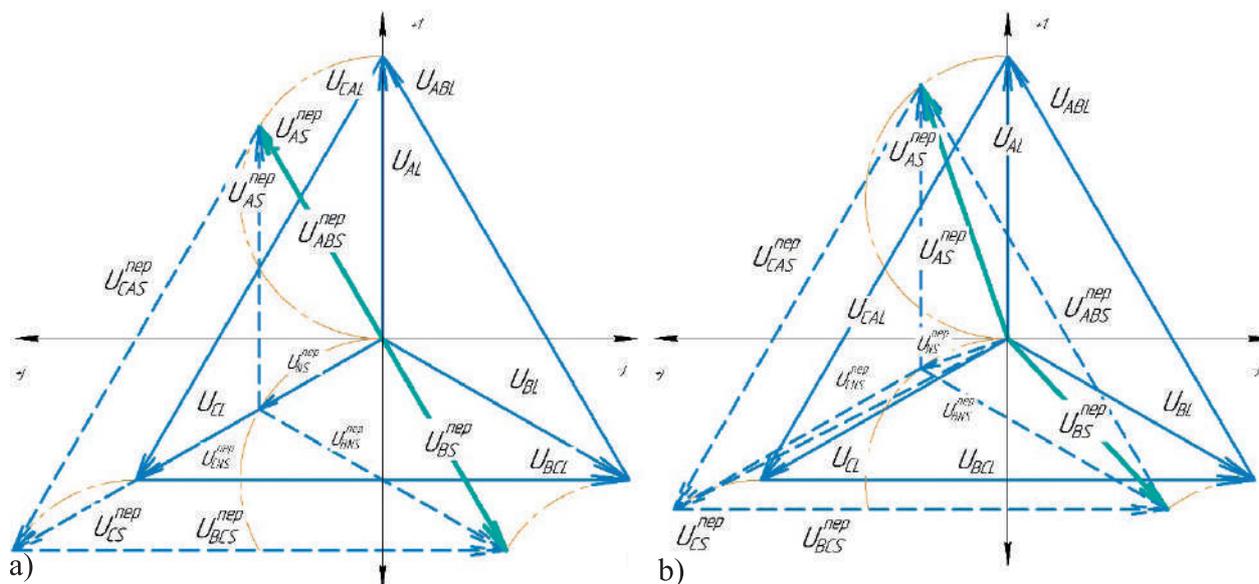


Рисунок 2. Векторные диаграммы напряжений: режим 2 (а), режим 3 (б)

Figure 2. Vector stress diagrams: mode 2 (a), mode 3 (b)

Алгоритм определения поврежденной фазы

Алгоритм определения поврежденной фазы, учитывающий все три режима, содержит следующие этапы.

1. После регистрации возникновения ОЗЗ фиксируются комплексные значения фазных напряжений относительно земли и напряжение нулевой последовательности.

2. Вычисляется коэффициент полноты замыкания.

$$\beta = \frac{U_0}{U_\phi}; \quad (8)$$

где U_ϕ — доаварийное фазное напряжение.

Если его значение больше 0,9, то это соответствует металлическому замыканию на землю или близкому замыканию через малое переходное сопротивление. В этом случае алгоритм определяет поврежденную по минимальному уровню напряжения. Применение этого условия необходимо для правильной работы алгоритма при наличии несимметрии системы фазных напряжений.

3. Если значение коэффициента полноты замыкания по (8) меньше 0,9, то выделяется наибольшее из фазных напряжений.

Как видно из векторных диаграмм, представленных на рисунках 1 и 2, значение напряжения в данной фазе остается наибольшим в любом из трех режимов ОЗЗ.

Вычисляется аргумент отношения наибольшего фазного напряжения к напряжению смещения нейтрали:

$$\alpha = \arg\left(\frac{\dot{U}_{\max}}{\dot{U}_N}\right); \quad (9)$$

где \dot{U}_{\max} — напряжение фазы с наибольшим значением фазного напряжения.

4. По значению найденного по (9) аргумента определяется режим ОЗЗ. При отсутствии погрешностей измерения: при $\alpha < 0$ определяется режим 1; при $\alpha = 0$ — режим 2; при $\alpha > 0$ — режим 3. Для учета погрешностей измерения вместо нуля нужно водить некоторое малое значение — уставку срабатывания избирателя.

4.1 При выборе режима 1 ($\alpha < 0$) поврежденной является фаза с наименьшим значением фазного напряжения.

4.2 При выборе режима 2 ($\alpha = 0$) из анализа исключается фаза с наибольшим фазным напряжением. Для каждой из двух оставшихся фаз определяется аргумент их отношения к линейному напряжению этих фаз. Например, при наиболь-

шем фазном напряжении фазы С определяются аргументы отношений

$$\gamma_A = \arg\left(\frac{\dot{U}_A}{\dot{U}_{AB}}\right) \text{ и } \gamma_B = \arg\left(\frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_{AB}}\right). \quad (10)$$

Линейное напряжение либо принимается равным доаварийному значению, либо определяется как векторная разность аварийных фазных напряжений.

Поврежденной является фаза, для которой значение аргумента γ близко к нулю

(меньше принятой уставки срабатывания). Для другой фазы значение аргумента γ будет близким 180° .

4.3. При выборе режима 3 из анализа, как и при режиме 2, исключается фаза с наибольшим фазным напряжением. Поврежденной является фаза с наибольшим значением напряжения из оставшихся двух.

На рисунке 3 разработанный алгоритм представлен в трехфазном исполнении в

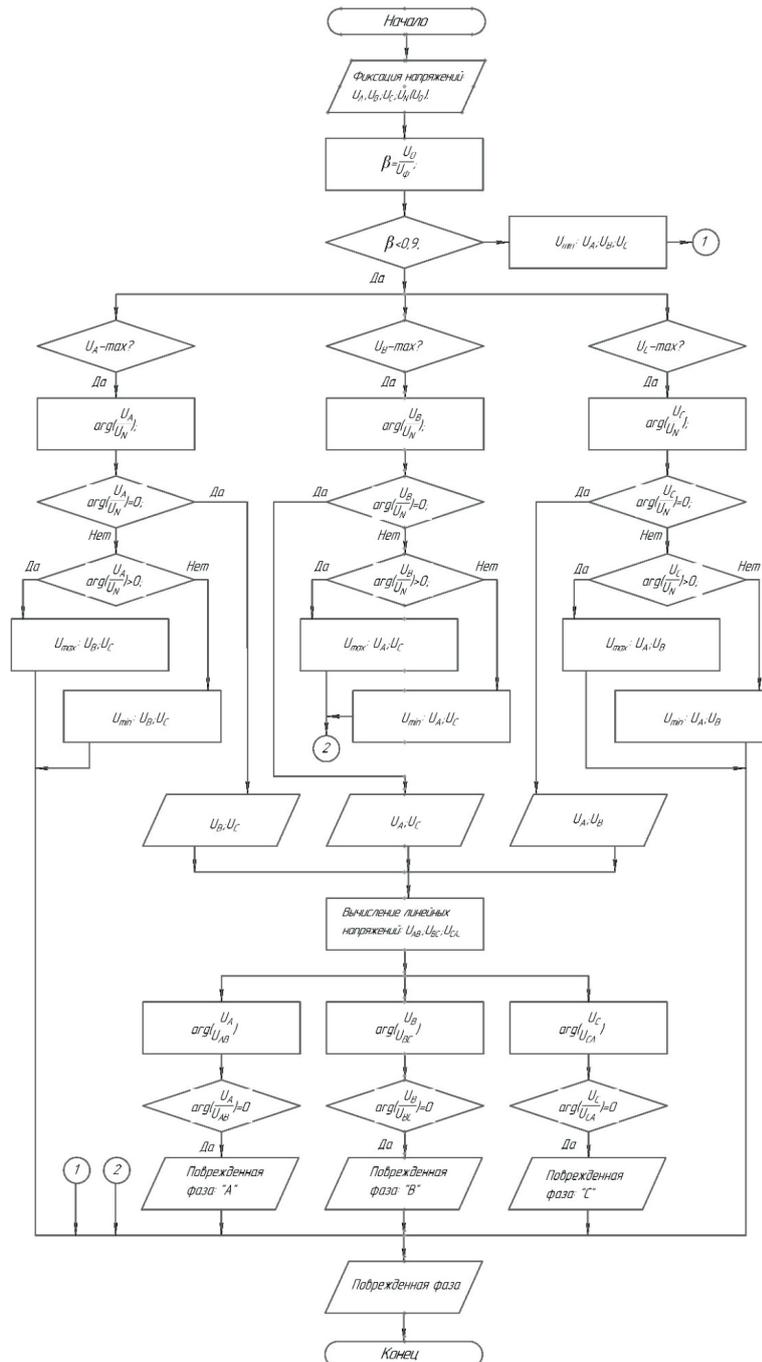


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма определения поврежденной фазы

Figure 3. Block diagram of the algorithm for determining the damaged phase

виде блок-схемы. В зависимости от того, в какой фазе наибольшее фазное напряжение, алгоритм работает по одной из трех фазных ветвей. Общим для трех ветвей является определение линейных напряжений и значений аргументов по выражениям (10).

Результаты исследований

Для оценки работы алгоритма была разработана модель устройства в программном комплексе Matlab Simulink (рисунок 4).

Функциональная схема на рисунке 4 состоит из восьми блоков: блок фиксации и вычисления напряжений — 1, блок определения минимального напряжения — 2, блок определения режима — 3, блок выделения максимального напряжения — 4, блок логики второго режима — 5, блок логики первого и третьего режимов — 6, шина — 7 и выходной блок 8.

К блоку фиксации и вычисления напряжений 1 подводится система фазных напряжений относительно земли. В нем производится обработка входных сигналов, вычисление линейных напряжений и коэффициента полноты замыкания. Если коэффициент полноты замыкания больше 0,9, то система фазных напряжений подается в блок 2. В блоке 2 определение поврежденной фазы производится по

принципу выбора фазы с наименьшим значением фазного напряжения. Если коэффициент полноты замыкания меньше 0,9, то система фазных напряжений подается в блоки 3, 5, 6. В блоке 3 определяется фаза с наибольшим значением напряжения, и это напряжение подается в блок 4. В блоке 4 определяется режим ОЗЗ. Если выбран режим 2, то управляющий сигнал подается на блок 5; если выбраны режимы 1 или 3, то управляющий сигнал подается на блок 6.

Блок логики второго режима 5 производит определение поврежденной фазы по выражениям (10). Блок 6 определяет режим ОЗЗ (1 или 3), исключает фазу с наибольшим напряжением и определяет поврежденную фазу по признаку наибольшего или наименьшего фазного напряжения. Выходные сигналы с блоков 2, 5 и 6 передаются на шину 7, по которой информация о поврежденной фазе передается к устройству вывода информации 8.

Для исследования работы устройства в программном комплексе Matlab Simulink была разработана модель сети с изолированной нейтралью, параметры, которой приведены в таблице 1.

Результаты работы устройства определения поврежденной фазы на модели электрической сети представлены в таблице 2.

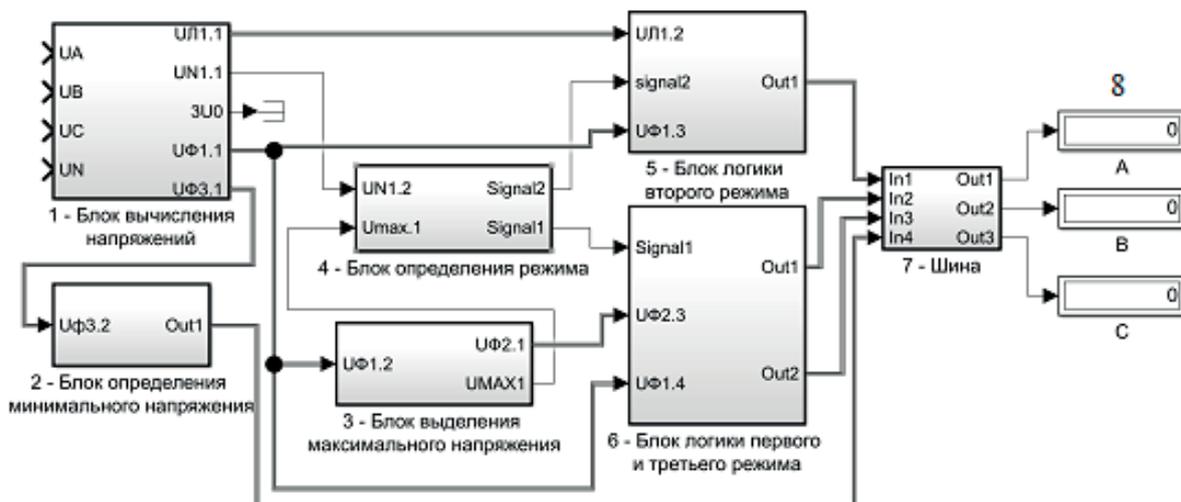


Рисунок 4. Модель устройства определения поврежденной фазы в Matlab Simulink

Figure 4. Model of the device for detecting the damaged phase in Matlab Simulink

Таблица 1. Основные характеристики модели сети**Table 1.** The main characteristics of the network model

Параметры сети	Модель
Номинальное напряжение, кВ	6
Тип линий	КЛ
Суммарная протяженность линий, отходящих от шин ПС, км	50
Протяженность испытываемой линии, км	5
Суммарный емкостной ток сети, А	28,4

Таблица 2. Результаты исследований**Table 2.** Research results

№	Расстояние до ОЗЗ, км	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$R_{пер}, Ом$	Поврежденная фаза		Фаза с наименьшим напряжением
						на модели	по алгоритму	
1	0,5	$19,9e^{j60,3^\circ}$	$6274,2e^{-j151,3^\circ}$	$6291,6e^{j148,7^\circ}$	0	А	А	А
2	2	$369,6e^{j75,5^\circ}$	$6042,9e^{-j153,8^\circ}$	$6407e^{j145,7^\circ}$	10	А	А	А
3	5	$1463,9e^{j61,6^\circ}$	$5120e^{-j160,2^\circ}$	$6528,5e^{j135,9^\circ}$	50	А	А	А
4	0,5	$3111,4e^{j28,5^\circ}$	$3173,1e^{-j151^\circ}$	$5430,7e^{j119,1^\circ}$	220	А	А	А
5	2,5	$3131,8e^{j28^\circ}$	$3153,1e^{-j150,4^\circ}$	$5400,3e^{j118,9^\circ}$	220	А	А	А
6	5	$3156,5e^{j27,3^\circ}$	$3130e^{-j149,7^\circ}$	$5361,5e^{j118,7^\circ}$	220	А	А	В
7	0,5	$3314,2e^{j21,6^\circ}$	$3024,3e^{-j143,3^\circ}$	$5032,2e^{j117,1^\circ}$	300	А	А	В
8	2,5	$3328,3e^{j21,2^\circ}$	$3016,9e^{-j142,9^\circ}$	$5007,9e^{j117^\circ}$	300	А	А	В
9	5	$3345,1e^{j20,7^\circ}$	$3009e^{-j142,2^\circ}$	$4977,3e^{j116,9^\circ}$	300	А	А	В

Расстояние до места ОЗЗ варьировалось от 0,5 до 5 км, переходное сопротивление варьировалось от нуля до 300 Ом. Во всех девяти экспериментах разработанный алгоритм правильно определял поврежденную фазу «А». В пунктах 6–9 наименьшее напряжение наблюдалось в неповрежденной фазе и определение поврежденной фазы по наименьшему фазному напряжению привело бы к алгоритмической ошибке.

Выводы

Разработан алгоритм, позволяющий определять фазу с однофазным замыканием на землю в сети с изолированной

нейтралью при любой величине переходного сопротивления.

Разработана функциональная схема устройства определения поврежденной фазы при ОЗЗ, которое может быть реализовано в терминалах релейной защиты и автоматики.

Выполненные исследования на модели электрической сети показали работоспособность алгоритма. Устройство, реализующее разработанный алгоритм, определяло поврежденную фазу верно, вне зависимости от расстояния до места однофазного замыкания и величины переходного сопротивления.

Список источников

1. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 104 с.
2. Шабанов М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007. 64 с.
3. Качанов А.Н., Чернышов В.А. Прогнозирование вероятности возникновения однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 10 кВ с учетом влияния погодных-климатических факторов // Промышленная энергетика. 2020. № 10. С. 10-17.
4. Левиуш А.И. Сигнализация и защита от замыкания на землю в сети 6-35 кВ // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 1 (14).
5. Kulikov A.L., Anan'ev V.V., Vukolov V.Y., Platonov P.S., Lachugin V.F. Modeling of Wave Processes on Power Transmission Lines to Improve the Accuracy of Fault Location // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 49. No. 5. P. 378-385.
6. Liamets Yu., Efimov E., Nudelman G., ZakonjSek J. The Principle of Relay Protection Information Perfection. Colloquium and Meeting, Session Papers, CIGRE, Romania, Sibiu, 2001. 2001. Report 112. P. 1-6.
7. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. London: Springer, 2010. 432 p.
8. Маслов А.Н., Мартынов М.В., Смирнова И.В. Усовершенствование органа манипуляции ДФЗ с целью определения повреждённых фаз // Электротехника, электроэнергетика, электромеханика — 2018: матер. Молодежн. конф. Академии электротехнических наук Чувашской республики (АЭН ЧР). Чебоксары, 2018.
9. Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С. Особенности моделирования определения мест повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ // Промышленная энергетика. 2020. № 3. С. 33-40.
10. Сорокин А.В., Шабанов В.А. Дистанционный метод определения расстояния до однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование: сб. науч. тр. Уфа, ООО «Научно-инжиниринговый центр «Энергодиагностика», 2020. С. 193-198.
11. Шабанов В.А., Сорокин А.В. Алгоритмы дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1, Т. 17. С. 33-43.
12. Izykowski J. Fault Location on Power Transmission Line. Springer, 2008.
13. Brahma S.M. Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements // IEEE Trans. Power Del. Apr. 2005. Vol. 20. No. 2. Part 2. P. 1325-1331.
14. Brahma S.M. New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements // Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. May, 2006. 2006. P. 853-857.
15. Abe M., Otsuzuki N., Emura T., Takeuchi M. Development of a New Fault Location System for Multi-Terminal Single Transmission Lines // IEEE Trans. Power Del. Jan., 1995. Vol. 10. No. 1. P. 159-168.
16. Козлов В.Н., Павлов А.О., Бычков Ю.В. Развитие микропроцессорных средств определения места повреждения на линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 2 (15).
17. Kezunovic M., Perunicic B. Synchronized Sampling Improves Fault Location // IEEE Computer Applications in Power. 1995. Vol. 8. No. 2. P. 30-33.
18. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2007. 639 с.
19. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определения места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.
20. Шабанов В.А. Симметричные составляющие токов и напряжений при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью. Уфа: Изд-во УНИ, 2002. 60 с.
21. Алексеев Л.Л., Вуколов В.Ю., Кривоногов С.В., Пнев Е.Р. Определение вида

повреждения распределительных электрических сетей 6-35 кВ сельскохозяйственного назначения на основе анализа осциллограмм аварийных событий // Вестник НГИЭИ. 2020. № 2 (92).

References

1. Shuin V.A., Gusenkov A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6-10 kV* [Protection Against Earth Faults in Electrical Networks of 6-10 kV]. Moscow, NTF «Energoprogress», 2001. 104 p. [in Russian].
2. Shabad M.A. *Zashchita ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh 6-35 kV* [Protection Against Single-Phase Earth Faults in 6-35 kV Networks]. Moscow, NTF «Energoprogress», 2007. 64 p. [in Russian].
3. Kachanov A.N., Chernyshov V.A. Prognostirovanie veroyatnosti vozniknoveniya odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v raspredelitel'nykh setyakh 10 kV s uchetom vliyaniya pogodno-klimaticheskikh faktorov [Forecasting the Probability of Occurrence of Single-Phase Earth Faults in 10 kV Distribution Networks Taking into Account the Influence of Weather and Climatic Factors]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Energy*, 2020, No. 10, pp. 10-17. [in Russian].
4. Leviush A.I. Signalizatsiya i zashchita ot zamykaniya na zemlyu v seti 6-35 kV [Alarm and Earth Fault Protection in the 6-35kV Network]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya — Relay Protection and Automation*, 2014, No. 1 (14). [in Russian].
5. Kulikov A.L., Anan'ev V.V., Vukolov V.Y., Platonov P.S., Lachugin V.F. Modeling of Wave Processes on Power Transmission Lines to Improve the Accuracy of Fault Location. *Power Technology and Engineering*, 2016, Vol. 49, No. 5, pp. 378-385.
6. Liamets Yu., Efimov E., Nudelman G., ZakonjSek J. The Principle of Relay Protection Information Perfection. *Colloquium and Meeting, Session Papers, CIGRE, Romania, Sibiu, 2001*. 2001, Report 112, pp. 1-6.
7. Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. *Fault Location on Power Networks*. London, Springer Publ., 2010. 432 p.
8. Maslov A.N., Martynov M.V., Smirnova I.V. Uovershenstvovanie organa manipulyatsii DFZ s tsel'yu opredeleniya povrezhdennykh faz [Improvement of the DPZ Manipulation Organ in Order to Determine Damaged Phases]. *Molodezhnaya konferentsiya Akademii elektro-tekhnicheskikh nauk Chuvashskoi respubliki (AEN ChR) «Elektrotekhnika, elektro-energetika, elektromekhanika — 2018»* [Youth Conference of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Chuvash Republic (AEN of the Chuvash Republic) «Electrical Engineering, Electric Power Engineering, Electromechanics — 2018»]. Cheboksary, 2018. [in Russian].
9. Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S. Osobennosti modelirovaniya opredeleniya mest povrezhdeniya vozdukhnykh linii elektroperedachi napryazheniem 6(10) kV [Features of Modeling the Determination of Damage Sites of Overhead Power Lines with a Voltage of 6(10) kV]. *Promyshlennaya energetika — Industrial Power Engineering*, 2020, No. 3, pp. 33-40. [in Russian].
10. Sorokin A.V., Shabanov V.A. Distantstionnyi metod opredeleniya rasstoyaniya do odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v seti s izolirovannoi neutral'yu [Remote Method for Determining the Distance to a Single-Phase Earth Fault in a Network with an Isolated Neutral]. *Sbornik nauchnykh trudov «Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie»* [Collection of Scientific Works «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment»]. Ufa, OOO «Nauchno-inzhiringovyi tsentr «Energodiagnostika», 2020, pp. 193-198. [in Russian].
11. Shabanov V.A., Sorokin A.V. Algoritmy distantstionnogo opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo zamykaniya s ispol'zovaniem toka nulevoi posledovatel'nosti v kachestve opornogo toka [Algorithms for Remote Determination of the Distance to the Single-Phase Fault Location Using the Zero-Sequence Current as the Reference Current]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, No. 1, Vol. 17, pp. 33-43. [in Russian].
12. Izykowski J. *Fault Location on Power Transmission Line*. Springer, 2008.
13. Brahma S.M. Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements. *IEEE Trans. Power Del.* Apr. 2005. Vol. 20. No. 2. Part 2. P. 1325-1331.

14. Brahma S.M. New Fault Location Scheme for a Two-Terminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements. *Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May, 2006*. 2006, pp. 853-857.
15. Abe M., Otsuzuki N., Emura T., Takeuchi M. Development of a New Fault Location System for Multi-Terminal Single Transmission Lines. *IEEE Trans. Power Del.* Jan., 1995, Vol. 10, No. 1, pp. 159-168.
16. Kozlov V.N., Pavlov A.O., Bychkov Yu.V. Razvitie mikroprotsessornykh sredstv opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh elektroperedachi [Development of Microprocessor Means for Determining the Location of Damage on Power Transmission Lines]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya — Relay Protection and Automation*, 2014, No. 2 (15). [in Russian].
17. Kezunovic M., Perunicic B. Synchronized Sampling Improves Fault Location. *IEEE Computer Applications in Power*, 1995, Vol. 8, No. 2, pp. 30-33.
18. Andreev V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya: ucheb. dlya vuzov* [Relay Protection and Automation of Power Supply Systems: Textbook for Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007. 639 p. [in Russian].
19. Arzhannikov E.A., Lukoyanov V.Yu., Misrikhanov M.Sh. *Opredeleniya mesta korotkogo замыканиya na vysokovol'tnykh liniyakh elektroperedachi* [Determining the Location of a Short Circuit on High-Voltage Power Transmission Lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 272 p. [in Russian].
20. Shabanov V.A. *Simmetrichnye sostavlyayushchie tokov i napryazhenii pri odnofaznykh замыканиyakh na zemlyu v setyakh s izolirovannoi neutral'yu* [Symmetrical Components of Currents and Voltages at Single-Phase Earth Faults in Networks with an Isolated Neutral]. Ufa, Izd-vo UNI, 2002. 60 p. [in Russian].
21. Alekseev L.L., Vukolov V.Yu., Krivonogov S.V., Pnev E.R. *Opredelenie vida povrezhdeniya raspredelitel'nykh elektricheskikh setei 6-35 kV sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya na osnove analiza ostsillogramm avariinykh sobytii* [Determination of the Type of Damage to 6-35 kV Agricultural Distribution Networks Based on the Analysis of Emergency Event Waveforms]. *Vestnik NGIEI — Bulletin NGIEI*, 2020, No. 2 (92). [in Russian].



Ле Ван Тунг
Le Van Tung

кандидат технических наук,
кафедра «Автоматизации»,
Куангниньский промышленный университет,
Куангнинь, Вьетнам



Данг Нгок Хюу
Dang Ngoc Huu

кандидат технических наук,
кафедра «Автоматизации»,
Куангниньский промышленный университет,
Куангнинь, Вьетнам



До Чи Тхань
Do Chi Thanh

кандидат технических наук,
кафедра «Автоматизации»,
Куангниньский промышленный университет,
Куангнинь, Вьетнам



Буй Чунг Кьен
Bui Trung Kien

кандидат технических наук,
кафедра «Электротехники»,
Куангниньский промышленный университет,
Куангнинь, Вьетнам

УДК 621.314.57

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-63-72

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И УМЕНЬШЕНИЕ ГАРМОНИК ТОКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЙЕРОВ

Актуальность

В настоящее время преобразователи частоты с диодными выпрямителями очень часто используются в системах электропривода конвейеров. Однако преобразователи частоты генерируют гармоники тока, отрицательно влияя на качество сети и долговечность электрического оборудования. В системе электропривода асинхронный двигатель потребляет реактивную мощность источника, что вызывает потери в сети и снижает коэффициент мощности на входе преобразователя. Следовательно, для системы электропривода необходимо проанализировать методы повышения коэффи-

циента мощности и уменьшения гармонических искажений тока в сети. Преобразователь частоты с реактором имеет простую конструкцию, но не обладает высокой эффективностью. Преобразователь частоты с многоимпульсным выпрямителем будет использовать несколько выпрямительных цепей в сочетании с трансформатором для устранения гармоник высокого порядка. Преобразователь частоты с реактором имеет простую структурную схему, но не обладает высокой эффективностью. Преобразователь частоты с многоимпульсным выпрямителем будет использовать несколько выпрямительных цепей в сочетании с трансформатором для устранения гармоник высокого порядка. Метод активного фильтра будет производить волны тока той же амплитуды, но с противоположным фазовым углом к гармоникам, генерируемым нагрузкой, что устраняет большинство гармоник высокого порядка и способно компенсировать реактивную мощность.

Цель исследования

Повышение энергетической эффективности электропривода конвейера с минимизацией его влияния на качество электрической энергии карьерной сети за счёт использования активных выпрямителей с системой прямого управления мощностью в многоинверторных преобразователях частоты.

Методы исследования

В данном исследовании использованы следующие методы: изучение научной литературы, компьютерное моделирование, выполненное в программном комплексе MatLab.

Результаты

В преобразователях частоты используются активные выпрямители с прямым управлением активной и реактивной мощностью, коэффициент мощности близок к единице, обмен энергией происходит в двух направлениях между двигателем и сетью. В статье сравнивается эффективность методов при рассмотрении системы частотно-регулируемого электропривода конвейеров.

Ключевые слова: активный выпрямитель, активный фильтр, многоимпульсный выпрямитель, прямое управление мощностью, прямое управление моментом, электропривод конвейера

IMPROVING THE POWER FACTOR AND REDUCING THE HARMONICS OF THE POWER SUPPLY CURRENT IN THE ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF CONVEYORS

Relevance

Currently, frequency converters with diode rectifiers are very often used in conveyor drive systems. However, frequency converters generate current harmonics, adversely affecting the quality of the network and the durability of electrical equipment. In the electric drive system, the induction motor consumes the reactive power of the source, which causes losses in the network and reduces the power factor at the input of the converter. Therefore, for the electric drive system, it is necessary to analyze methods for improving the power factor and reducing harmonic distortion of the current in the network. The reactor frequency converter has a simple structure but does not have high efficiency. A frequency converter with a multi-pulse rectifier will use multiple rectifier circuits in combination with a transformer to eliminate high order harmonics. The reactor frequency converter has a simple structure but does not have high efficiency. A frequency converter with a multi-pulse rectifier will use multiple rectifier circuits in combination with a transformer to eliminate high order harmonics. The active filter method will produce current waves of the same amplitude but opposite phase angle to the harmonics generated by the load, which eliminates most high-order harmonics and can compensate for reactive power.

Aim of research

Improving the energy efficiency of the conveyor electric drive with minimizing its impact on the quality of the electric power of the quarry network through the use of active rectifiers with a direct power control system in multi-inverter frequency converters.

Research methods

In this study, the following methods were used: the study of scientific literature, computer simulation performed in the MatLab software package.

Results

The frequency converters use active rectifiers with direct control of active and reactive power, the power factor is close to unity, and the energy exchange occurs in two directions between the motor and the network. The article compares the effectiveness of methods when considering a system of the frequency-controlled electric drive of conveyors.

Keywords: active rectifier, active filter, multi-pulse rectifier, direct power control, direct torque control, conveyor drive

В настоящее время в преобразователях частоты (ПЧ) используются выпрямители, которые вызывают в сети искажения формы тока и напряжения. Гармоники тока и напряжения оказывают большое влияние на качество электроэнергии, передачу электроэнергии, режим работы и срок службы электрооборудования горных предприятий [1]. В системах электроприводов переменного тока преобразователи частоты потребляют реактивную мощность из сети. Это приводит к потерям в линиях и снижению коэффициента мощности на входе ПЧ [2]. Некоторые решения для уменьшения уровня гармоник и повышения коэффициента мощности в системе привода с частотным регулированием широко применяются, например выходные реакторы и пассивные фильтры [3]. Однако использование многоимпульсного выпрямителя, активного фильтра (АФ) и ПЧ с активным выпрямителем имеет много преимуществ в повышении качества сетевого питания [4].

Многоимпульсный выпрямитель позволит устранить определенные гармоники в зависимости от количества выпрямителей, гарантируя, что общее гармоническое искажение (Total Harmonic Distortion (THD)) находится в допустимом диапазоне. В настоящее время ПЧ с активными выпрямителями постепенно

заменяют диодные выпрямители [5]. Метод прямого управления мощностью (Direct Power Control (DPC)) в активном выпрямителе обеспечивает контроль активной и реактивной мощности сети. Преимущество метода в том, что величина компенсации реактивной мощности может регулироваться [6].

Режимы работы двигателей конвейеров также влияют на качество электроэнергии на входе ПЧ [7]. В статье используется метод DPC для управления скоростью и крутящим моментом двигателей конвейеров с разными режимами работы [8]. Посредством рабочих режимов двигателей будут оцениваться преимущества и недостатки многоимпульсного выпрямителя, активного фильтра и активного выпрямителя в системе электропривода конвейерного двигателя [9].

6-пульсный выпрямитель обычно используется в современных промышленных преобразователях частоты, но имеет недостаток, заключающийся в искажении тока питания источника существующими гармоническими составляющими тока 5-, 7-, 11-, 13-, 17-, 19-го порядков. Чтобы уменьшить THD, вызванное работой 6-пульсного выпрямителя, можно использовать 12-пульсный выпрямитель, как показано на рисунке 1. В 12-пульсном выпрямителе используются два 6-пульсных выпрямителя, включен-

ных параллельно (12 диодов) для формирования постоянного напряжения на выходе. Это устраняет 5-ю и 7-ю гармоники с большой амплитудой и снижает THD сетевого тока на входе ПЧ [10].

В статье анализируются только результаты работы 12-пульсного выпрямителя в системе электропривода конвейерного двигателя.

Активный фильтр

Активные фильтры включают в себя активные выпрямители (на базе IGBT-транзисторов) и датчики измерения напряжения и тока (рисунок 2). Согласно теории мгновенной мощности от Акаги [11], в электрической системе мгновен-

ную мощность p и мгновенную реактивную мощность q нагрузки можно разделить на две составляющие: компоненту (\bar{p}, \bar{q}) , соответствующую основной частоте тока нагрузки, и осциллирующую компоненту (\tilde{p}, \tilde{q}) , соответствующую гармонической волне высокого порядка [5]. Теория Акаги позволяет выбирать сигналы нужной частоты, что является основой для разработки активных фильтров [11].

Структура управления АФ, как показано на рисунке 3, с трехфазной электрической системой, где компонент тока i_0 не существует, удовлетворяет условию $i_a + i_b + i_c = 0$.

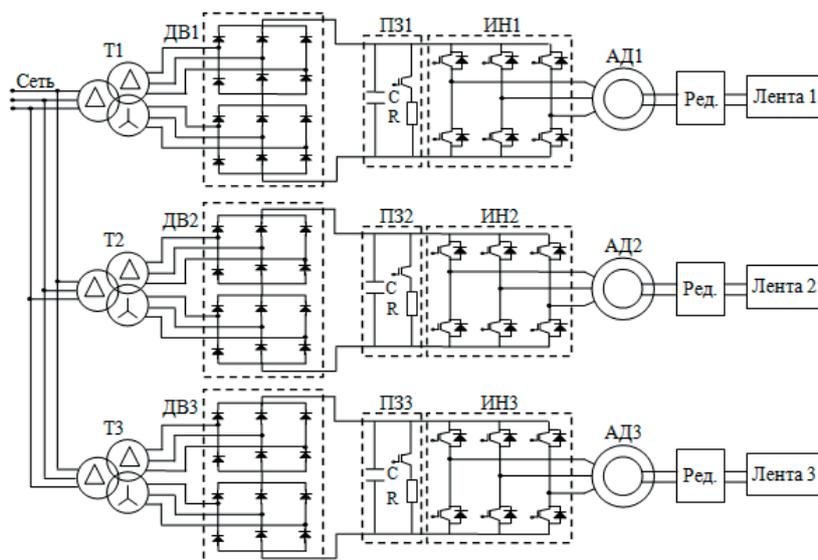
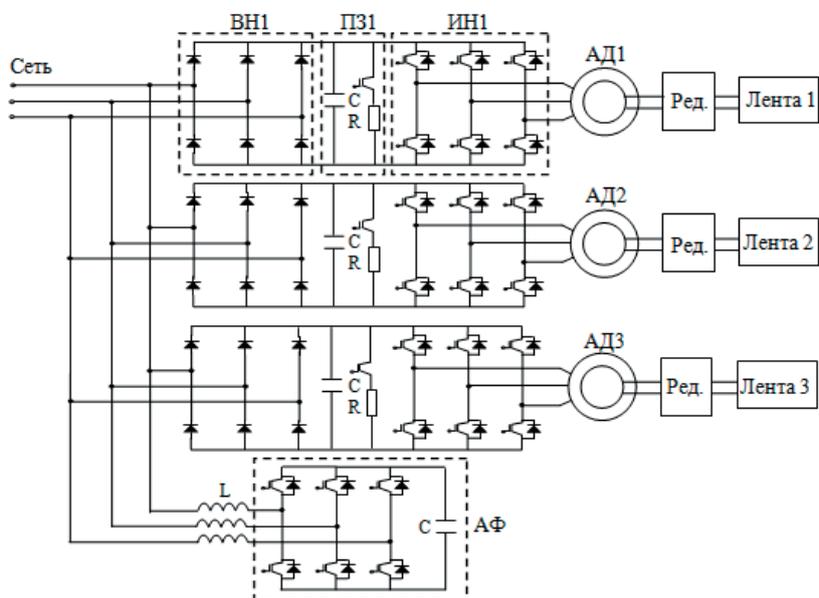


Рисунок 1. Схема электропривода с 12-пульсным выпрямителем и асинхронными двигателями

Figure 1. Scheme of an electric drive with a 12-pulse rectifier and asynchronous motors



АФ — активный фильтр

АФ — active filter

Рисунок 2. Схема электропривода с активным фильтром

Figure 2. Scheme of an electric drive with an active filter

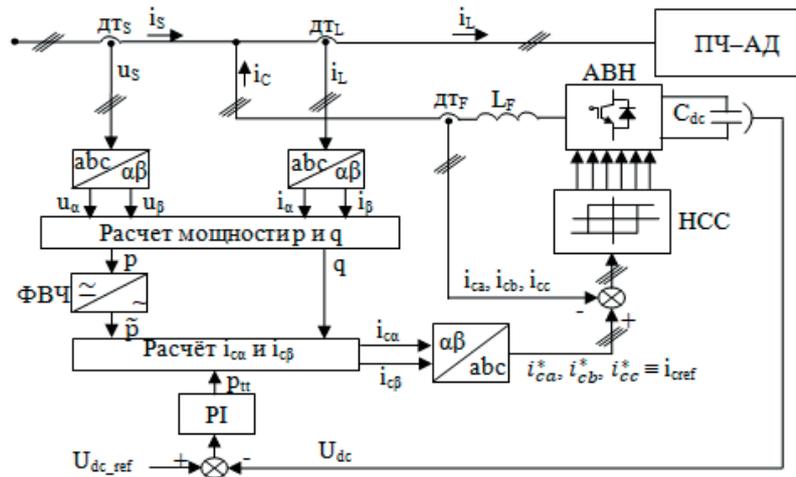


Рисунок 3. Структура управления активным фильтром

Figure 3. Active filter control structure

Ток нагрузки $i_L = [i_{La} \ i_{Lb} \ i_{Lc}]^T$ и напряжение источника $u_s = [u_a \ u_b \ u_c]^T$ преобразуются в систему координат $\alpha\beta$ путем преобразования Кларка [11]:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) определяют суммарную мгновенную мощность нагрузки в системе координат $\alpha\beta$:

$$\begin{aligned} S &= u \cdot i^* = (u_\alpha + j u_\beta) \cdot (i_\alpha - j i_\beta); \\ S &= (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) + j(u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, мгновенная активная мощность и реактивная мощность определяются:

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p}; \quad (4)$$

$$q = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta = q + \tilde{q}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) будут вычислять i_α , i_β следующим образом:

$$i_\alpha = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} (p \cdot u_\alpha + q \cdot u_\beta); \quad (6)$$

$$i_\beta = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} (p \cdot u_\beta - q \cdot u_\alpha). \quad (7)$$

Активный фильтр отвечает за обеспечение составляющей мощности переменного тока \tilde{p} от значения p и реактивной мощности \tilde{q} , включая составляющие \bar{q} и \tilde{q} . Кроме того, напряжение на конденсаторе

является нестабильным, поэтому, чтобы обеспечить постоянное напряжение на конденсаторе, источник питания должен обеспечивать необходимый уровень мощности p_0 фильтра.

АФ обеспечивает мощность p_{AF} и q_{AF} в сети следующим образом:

$$p_{AF} = \bar{p} - \bar{p} - \tilde{p} + p_0 = -\tilde{p} + p_0; \quad (8)$$

$$q_{AF} = -\bar{q} - \tilde{q}. \quad (9)$$

Из формул (6)–(9) рассчитывается ток компенсации следующим образом:

$$i_{c\alpha} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} (p_{AF} \cdot u_\alpha + q_{AF} \cdot u_\beta); \quad (10)$$

$$i_{c\beta} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} (p_{AF} \cdot u_\beta - q_{AF} \cdot u_\alpha). \quad (11)$$

Из формул (6)–(11) видно, что ток сети в системе координат $\alpha\beta$ будет повторно проверен, когда будет произведена компенсация, и в результате будет получен только основной компонент гармонической волны ($i_s = i_L + i_c$):

$$i_{s\alpha} = i_{c\alpha} + i_\alpha = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} (\bar{p} + p_0) \cdot u_\alpha; \quad (12)$$

$$i_{s\beta} = i_{c\beta} + i_\beta = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} (\bar{p} + p_0) \cdot u_\beta. \quad (13)$$

Уравнения (10) и (11) вычисляют необходимый ток компенсации в системе координат $\alpha\beta$ с двумя функциями фильтрации гармоник и компенсации реактивной мощности. Из компенсационного тока в системе $\alpha\beta$ ток, подлежащий компенсации в реальной системе координат

abc, будет рассчитываться по формулам (1), (2), (10) и (11):

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = i_{cref} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Таким образом, алгоритм управления активным фильтром, основанный на теории мгновенной мощности p-q, рассчитывает требуемый ток компенсации, чтобы установить значение для внутреннего контура. Внутренний контур управляет активным фильтром для создания мгновенного тока компенсации, уравнивает гармонические токи, генерируемые нагрузкой.

Метод прямого управления мощностью (DPC) основан на схемах, которые управляют мгновенной активной и мгновенной реактивной мощностью. В структуре DPC состояния переключения преобразователя выбираются на основе разницы между вычисленным значением и регулируемым значением активной мощности p и реактивной мощности q.

Оценка мощности является важной частью системы. Цель такой оценки состоит в том, чтобы определить расчетную мощность и затем сравнить ее с установленной мощностью для формирования корректного сигнала управления [2].

Структурная схема преобразователя частоты (см. рисунок 3) показывает, что

использование одного активного выпрямителя в сочетании с тремя инверторами напряжения уменьшит размер устройств.

Для оценки качества работы электропривода конвейеров предположим, что скорость и момент возрастают, а затем резко уменьшаются. Это является двумя наиболее важными изменениями при работе асинхронного двигателя конвейеров. Модель системы электропривода была разработана для обеспечения стабильной работы при резком изменении момента нагрузки M_c (рисунок 4).

Результаты моделирования

В данной работе было использовано программное обеспечение Matlab& Simulink для моделирования системы электропривода.

На рисунке 5 показан процесс плавного пуска и останова электропривода. Из характеристик электромагнитного момента и скорости вращения трех конвейерных двигателей видно, что прямое управление моментом двигателя обеспечивает высокое качество управления без перерегулирования скорости и электромагнитного момента.

Рисунок 6 показывает, что форма тока и значение коэффициента мощности у электропривода с активным фильтром лучше, чем у методов с реактором на входе преобразователя частоты и 12-пульсным выпрямителем.

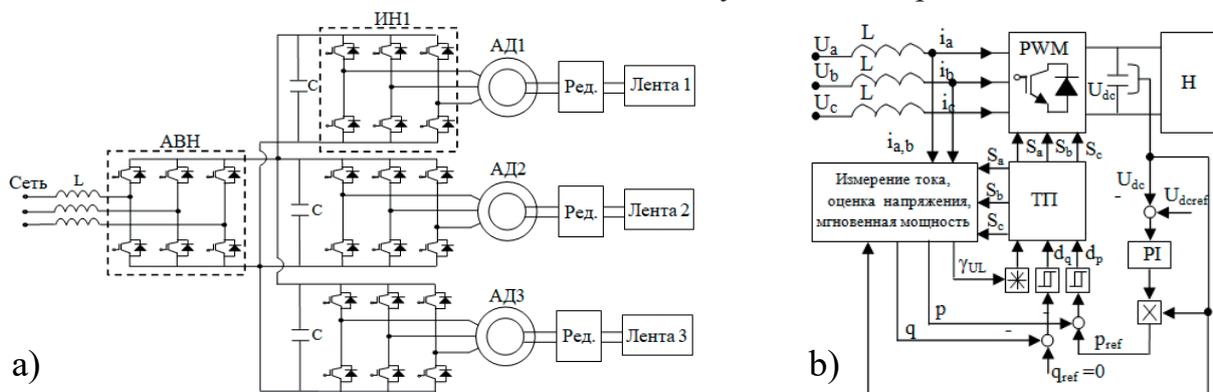
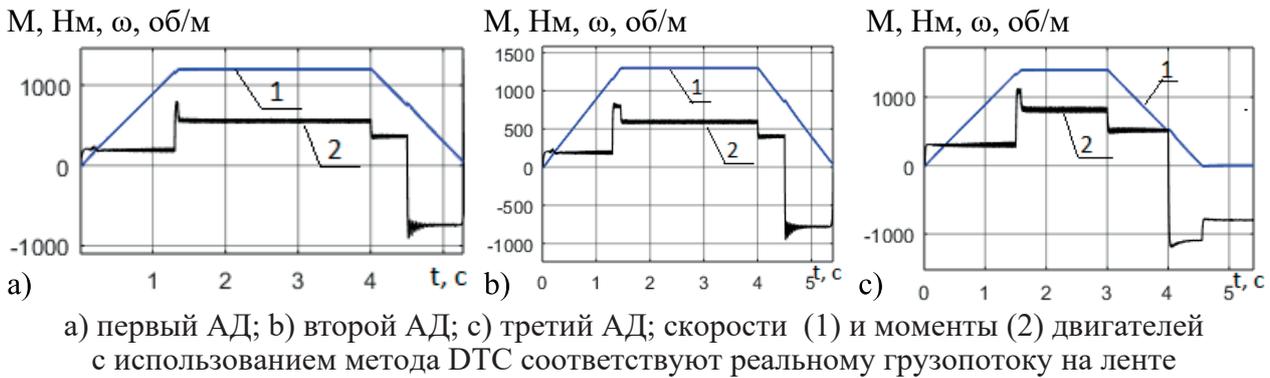


Рисунок 4. Схема электропривода с активным выпрямителем (а), структурная схема прямого управления мощностью АВН (б)

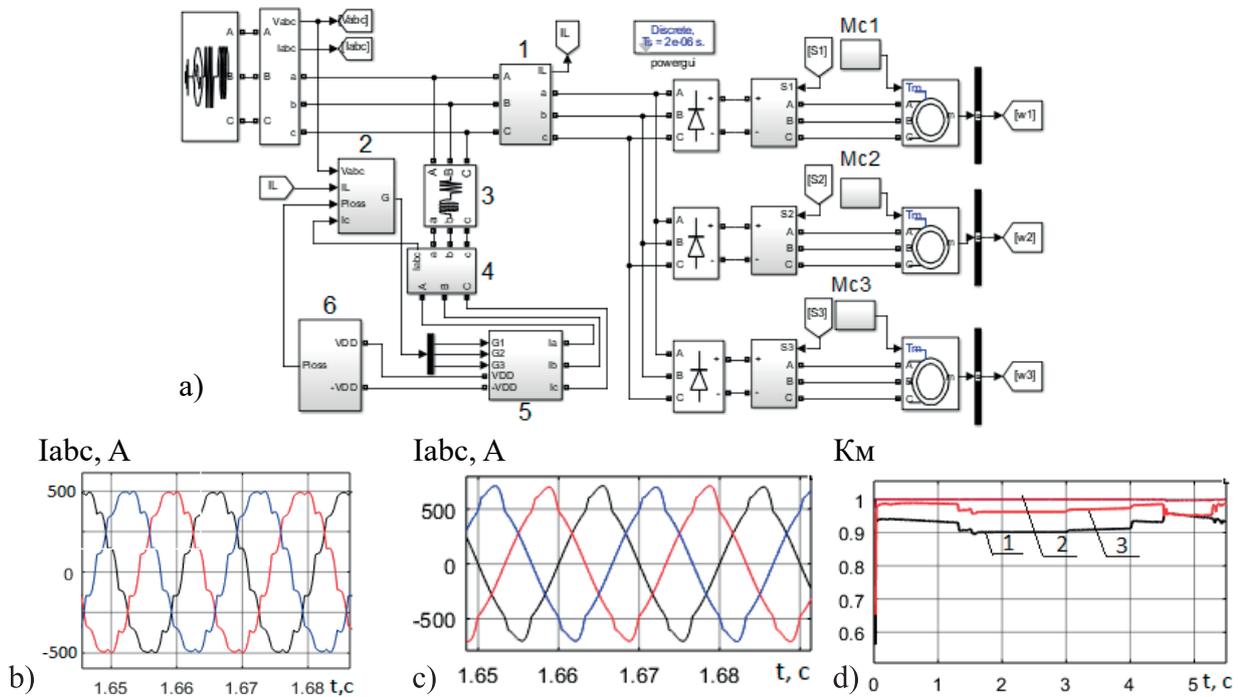
Figure 4. Diagram of an electric drive with an active rectifier (a), block diagram of the direct power control of the active rectifier (b)



a) the first IM; b) the second IM; c) the third IM; the speeds (1) and torques (2) of the engines using the DTC method correspond to the real cargo flow on the belt

Рисунок 5. Процесс плавного пуска и останова электропривода

Figure 5. The process of soft start and stop of the electric drive



1 — измеритель тока; 2 — расчет тока компенсации; 3 — индуктор связи; 4 — измерение тока компенсации; 5 — трехфазный IGBT мост; 6 — блок расчета потерь активной мощности

а) структурная схема модели с активным фильтром; б) график формы тока сети с 12-пульсным выпрямителем; в) график формы тока сети с активным фильтром; д) коэффициента мощности K_m : 1 — при использовании диодного выпрямителя с реактором ($K_m = 0,9-0,94$), 2 — при использовании активного фильтра ($K_m \approx 1$), 3 — при использовании 12-пульсного выпрямителя

1 — current meter; 2 — calculation of the compensation current; 3 — coupling inductor; 4 — compensation current measurement; 5 — three-phase IGBT bridge; 6 — block for calculating active power losses

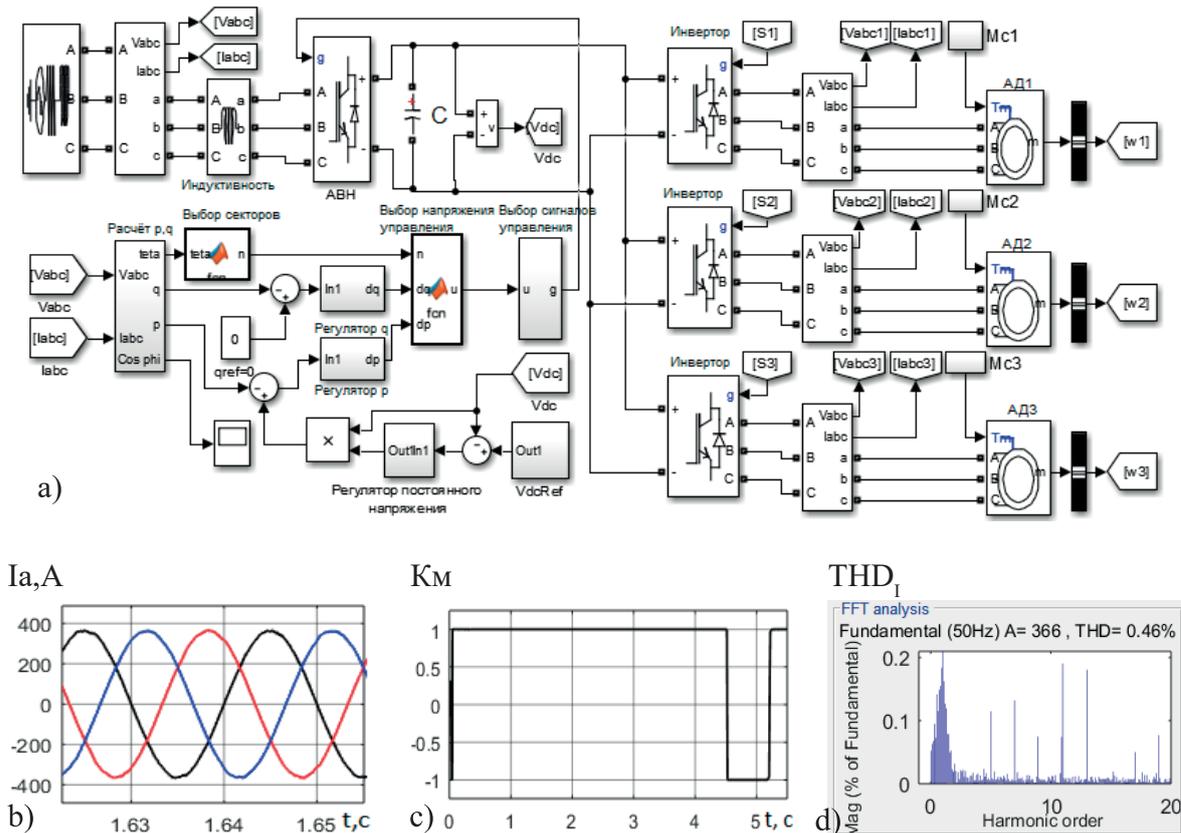
a) block diagram of the model with an active filter; б) graph of the current shape of the network with a 12-pulse rectifier; в) graph of the current shape of the network with an active filter; д) power factor K_m : 1 — when using a diode rectifier with a reactor ($K_m = 0,9-0,94$), 2 — when using an active filter ($K_m \approx 1$), 3 — when using a 12-pulse rectifier

Рисунок 6. Математическая модель моделирования системы электропривода

Figure 6. Mathematical model for simulation of the electric drive system

Рисунок 7, б и рисунок 5 показывают, что электропривод конвейеров работает стабильно на заданной скорости, ток сети близок к синусоидальной форме основной частоты ($THD_I(\text{ном}) = 0,46 \%$), что является лучшим результатом, чем при использовании 12-импульсного выпрями-

теля и активного фильтра. Когда двигатели работают в режиме рекуперативного торможения, энергия возвращается в сеть через активный выпрямитель. Используя активный выпрямитель и метод активного фильтра, коэффициент мощности улучшается $K_m \approx 1$.



a) структурная схема модели с активным выпрямителем с алгоритмом прямого управления мощностью; б) форма тока сети; с) коэффициент мощности $K_m \approx 1$; д) коэффициент искажения тока сети при стабильной работе двигателей

a) block diagram of the model with an active rectifier with a direct power control algorithm; б) grid current shape; с) power factor $K_m \approx 1$; д) grid current distortion factor with stable operation of motors

Рисунок 7. Математическая модель моделирования системы электропривода

Figure 7. Mathematical model for modeling the electric drive system

Выводы

Результаты моделирования показывают, что 12-импульсный выпрямитель, активная фильтрация и активный выпрямитель уменьшают гармоники сетевого тока и увеличивают коэффициент мощности на входе системы электропривода конвейеров. Двигатели конвейера рабо-

тают в устойчивом состоянии при изменении грузопотока нагрузки на ленте. В преобразователе частоты используется активный выпрямитель, который не только уменьшает гармоники и компенсирует реактивную мощность, но также регулирует напряжение постоянного тока в промежуточной цепи преобразователя.

Энергия также передается в двух направлениях между сетью и двигателем, таким образом происходит экономия электроэнергии для системы. В системах электропривода с несколькими конвейерными двигателями использование ПЧ с актив-

ным выпрямителем имеет преимущество, поскольку использование одного активного выпрямителя в сочетании с тремя инверторами напряжения уменьшит размер устройств.

Список источников

1. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. Оценка эффективности гибридных систем коррекции формы кривых тока и напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 45-54.

2. Козярук А.Е., Камышьян А.М. Improving the Energy Efficiency of the Electromechanical Transmission of an Open-Pit Dump // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 239. P. 576-582. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576.

3. Costabeber A., Tenti P., Caldognetto T., Verri E. Selective Compensation of Reactive, Unbalance, and Distortion Power in Smart Grids by Synergistic Control of Distributed Switching Power Interfaces // 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). 2013. Vol. 1. P. 1-9.

4. Meshcheryakov V.N., Khabibullin M.M., Pikalov V.V., Valtchev S. Active Power Filter with Common DC Link for Compensation of Harmonic Distortion in Power Grids // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC 2014). 2014. P. 1586-1590.

5. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Abdallah W.J. Development and Design of a Mobile Power Plant in the Form of a Standalone Power Supply // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2020. Vol. 1753(2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012006.

6. Лепалов М.Г., Розанов И.К. Operation Modes of Converters with SMES on DC-Side Used for Improving of Electrical Systems Efficiency // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe. 2012. P. 6397438.

7. Заголило С.А., Семенов А.С., Семенова М.Н., Якушев И.А. Компьютерное моделирование многодвигательной системы электропривода в пакете программ MatLab // Моделирование, оптимизация и информаци-

онные технологии. 2020. Т. 8. № 2(29). С.1-18. DOI:10.26102/2310-6018/2020.29.2.012.

8. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам. СПб: Ладога, 2017. 177 с.

9. Кондрахин В.П., Стадник Н.И., Белицкий П.В. Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съемного тензоизмерительного устройства с учетом натяжения ленты // Горная электромеханика. 2013. № 1. С. 79-87.

10. Костин В.Н., Сериков В.А., Шерстеникова И.А. Higher Harmonics and Limiting Thereof in Power Supply Systems of Different Voltages // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 378 (1). 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012051.

11. Hirofumi A., Edson H.W., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning // Institute of Electrical and Electronic Engineers. 2017. 454 p. DOI:10.1002/9781119307181.

References

1. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Zimin R.Yu. Otsenka effektivnosti gibridnykh sistem korrektsii formy krivykh toka i apyazheniya v elektricheskikh setyakh s raspredelennoi generatsiei [Estimation of the Effectiveness of Hybrid Systems for Correcting the shape of Current and Voltage Curves in Electrical Networks with Distributed Generation]. *Promyshlennaya energetika – Industrial Energy*, 2018, No. 1, pp. 45-54. [in Russian].

2. Kozyaruk A.E., Kamysh'yan A.M. Improving the Energy Efficiency of the Electromechanical Transmission of an Open-Pit Dump. *Journal of Mining Institute*, 2019, Vol. 239, pp. 576-582. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576.

3. Costabeber A., Tenti P., Caldognetto T., Verri E. Selective Compensation of Reactive, Unbalance, and Distortion Power in Smart Grids

by Synergistic Control of Distributed Switching Power Interfaces. *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013, Vol. 1, pp. 1-9.

4. Meshcheryakov V.N., Khabibullin M.M., Pikalov V.V., Valtchev S. Active Power Filter with Common DC Link for Compensation of Harmonic Distortion in Power Grids. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC 2014)*, 2014, pp. 1586-1590.

5. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Abdallah W.J. Development and De-sign of a Mobile Power Plant in the Form of a Standalone Power Supply. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2020, Vol. 1753(2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012006.

6. Lepalov M.G., Rozanov I.K. Operation Modes of Converters with SMES on DC-Side Used for Improving of Electrical Systems Efficiency. *15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe*. 2012, pp. 6397438.

7. Zagolilo S.A., Semenov A.S., Semenova M.N., Yakushev I.A. Kom-p'yuternoe modelirovanie mnogodvigatel'noi sistemy elektroprivoda v pakete programm MatLab. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii – Modeling, Optimization and Information*

Technologies, 2020, Vol. 8, No. 2(29), pp. 1-18. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.012. [in Russian].

8. Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Elektromekhanotronnyye komplekxy i ikh modelirovanie po vzaimosvyazannym podsistemam* [Electromechanotron Complexes and Their Modeling by Interconnected Subsystems]. Saint-Petersburg, Ladoga Publ., 2017. 177 p. [in Russian].

9. Kondrakhin V.P., Stadnik N.I., Belitskii P.V. Izmerenie gruzo-potoka na lentochnom konveiere s pomoshch'yu s"emnogo tenzoizmeritel'nogo ustroystva s uchetom natyazheniya lenty [Measurement of Cargo Flow on a Belt Conveyor Using a Removable Strain Gauge Device Taking into Account the Tension of the Belt]. *Gornaya elektromekhanika – Mining Electromechanics*, 2013, No. 1, pp. 79-87. [in Russian].

10. Kostin V.N., Serikov V.A., Sherstennikova I.A. Higher Harmonics and Limiting Thereof in Power Supply Systems of Different Voltages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 378 (1), P. 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012051.

11. Hirofumi A., Edson H.W., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. *Institute of Electrical and Electronic Engineers*. 2017. 454 p. DOI:10.1002/9781119307181.



Виталий Алексеевич Шабанов
Vitaly A. Shabanov

кандидат технических наук, профессор кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Россия



Айгуль Анваровна Басырова
Aigul A. Basyrova

студент Института цифровых систем,
автоматизации и энергетики,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия



Никита Русланович Кантюков
Nikita R. Kantuykov

студент Института цифровых систем,
автоматизации и энергетики,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, Уфа, Россия

УДК 621.3.062.88

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-73-81

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПЛОСКОСТИ ДВУХ УГЛОВ

Актуальность

Основные технологические установки нефтегазовой отрасли требуют электропитания по первой категории и получают питание от двух независимых источников. Возможные кратковременные перерывы электроснабжения таких установок по своей продолжительности не должны приводить к нарушению устойчивости электродвигателей и расстройству технологических процессов. Особенно актуальна проблема устойчивости на предприятиях, оснащенных устройствами автоматического включения резерва с самозапуском синхронных двигателей после кратковременного перерыва электроснабжения. Поэтому оценка условий сохранения динамической устойчивости синхронных двигателей после кратковременного перерыва электропитания является актуальной задачей.

Цель исследования

На основе метода площадей разработать методику оценки динамической устойчивости синхронных двигателей в плоскости двух параметров.

Методы исследования

В статье для оценки динамической устойчивости синхронных двигателей используются области динамической устойчивости в плоскости двух углов: угла нагрузки синхронного двигателя в предаварийном режиме δ_0 и угла включения $\delta_{вкл}$ между векторами напряжения сети и остаточного напряжения на секции шин, потерявшей питание, в аварийном режиме.

Результаты

Построена область динамической устойчивости в плоскости двух углов: угла нагрузки δ_0 и угла включения $\delta_{вкл}$. Граничные линии области динамической устойчивости строятся для диапазона значений углов нагрузки, в котором сохраняется статическая устойчивость синхронного двигателя в предаварийном режиме.

На примере синхронного двигателя типа STD-2500 показано определение области динамической устойчивости в плоскости исследуемых параметров. Показано, что область динамической устойчивости в плоскости двух углов можно трансформировать в область динамической устойчивости других исследуемых параметров.

Ключевые слова: синхронный двигатель, динамическая устойчивость, метод площадей, граничные линии, область динамической устойчивости

STABILITY ASSESSMENT OF SYNCHRONOUS MOTORS IN THE PLANE OF TWO ANGLES

Relevance

The main technological installations of the oil and gas industry require power supply of the first category and are fed from two independent sources. Possible short-term interruptions of power supply of such installations by their duration should not lead to a violation of the stability of electric motors and disruption of technological processes. The problem of stability at enterprises equipped with automatic standby switching devices with self-starting of synchronous motors after a short interruption of power supply is especially relevant. Therefore, the assessment of conditions for preserving the dynamic stability of synchronous motors after a short interruption of power supply is an urgent task.

Aim of research

Based on the method of areas, develop a method for assessing the dynamic stability of synchronous motors in the plane of two parameters.

Methods

The article uses dynamic stability areas in the plane of two angles to assess the dynamic stability of synchronous motors: the load angle of the synchronous motor in the pre-emergency mode δ_0 and the inclusion angle $\delta_{вкл}$ between the mains voltage vectors and the residual voltage on the section that lost power, in the emergency mode.

Results

The dynamic stability area in the plane of two angles is plotted: the load angle δ_0 and the turn-on angle $\delta_{вкл}$. The boundary lines of dynamic stability area are plotted for the range of values of load angles, in which the static stability of the synchronous motor in the pre-emergency mode is preserved.

On the example of synchronous motor of STD-2500 type, the definition of the dynamic stability area in the plane of parameters under study is shown. It is shown that the region of dynamic stability in the plane of two angles can be transformed into the dynamic stability area of other investigated parameters.

Keywords: synchronous motor, dynamic stability, area method, boundary lines, dynamic stability area

Введение

Технологические установки нефтегазовой отрасли требуют повышенной надежности электроснабжения [1] и получают питание от двух независимых источников. Возможные перерывы электроснабжения от одного из источников лик-

видируются действиями релейной защиты и автоматики [2]. При этом перерывы электроснабжения таких установок по своей продолжительности не должны приводить к нарушению бесперебойности технологического процесса [3, 4]. Основными техническими средствами сни-

жения длительности нарушений электро-снабжения, являются защиты от потери питания и устройства автоматического включения резерва (АВР). Одной из причин нарушения бесперебойности технологического процесса при работе устройств АВР является потеря динамической устойчивости синхронных двигателей (СД) при восстановлении электро-снабжения после его кратковременного исчезновения [5–8]. Поэтому сохранение динамической устойчивости СД при восстановлении напряжения после его кратковременного исчезновения и разработка простых и наглядных инженерных методов оценки сохранения динамической устойчивости является актуальной задачей.

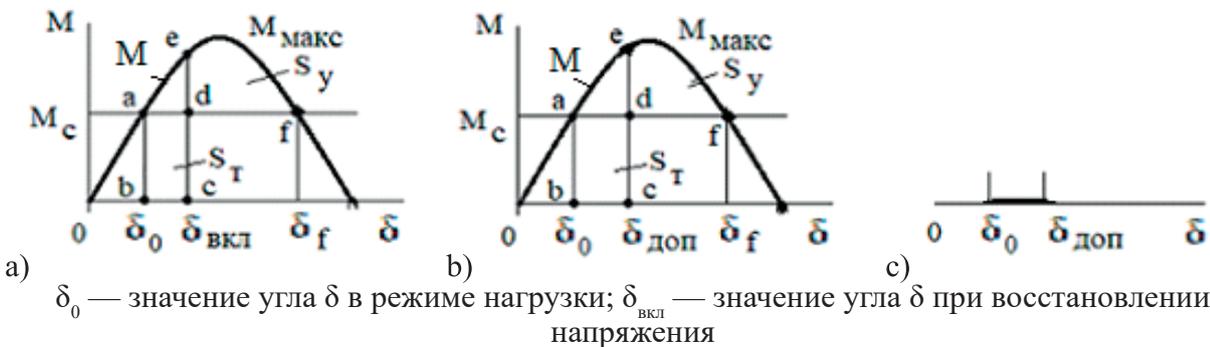
Цель статьи: на основе метода площадей разработать методику оценки динамической устойчивости СД путем построения области динамической устойчивости в плоскости двух углов: угла нагрузки δ_0 синхронного двигателя в предаварийном режиме и угла между векторами напряжения сети и остаточного напряжения на резервируемой секции, потерявшей питание напряжения (угла включения $\delta_{вкл}$).

Метод исследования

Поведению синхронных машин при кратковременном снижении или исчезно-

вании напряжения посвящено много публикаций [9–15]. При исчезновении напряжения СД переходят в режим выбега с генерацией остаточного напряжения на потерявшей питание секции шин, а после восстановления напряжения переходят в режим самозапуска. Для исследования устойчивости СД в таких режимах наибольшее распространение получил метод площадей [16]. В методе площадей энергия, поступающая в электродвигатель из питающей сети, и энергия, расходуемая в СД, оцениваются косвенно по площадкам ускорения и торможения. При исчезновении напряжения питания электромагнитный момент двигателя M исчезает и СД начинает тормозиться под действием момента сопротивления M_c (рисунок 1, а). Площадь под линией момента сопротивления образует площадь торможения S_T . При восстановлении напряжения питания электромагнитный момент СД восстанавливается и ротор СД начинает ускоряться. Угол δ , при котором происходит восстановление напряжения, называют углом включения $\delta_{вкл}$. Площадь между угловой характеристикой СД и линией момента сопротивления образует площадь ускорения S_y .

Граничным условием синхронной динамической устойчивости по методу площадей является равенство площади торможения S_T и площади ускорения S_y .



δ_0 — value of angle δ in the load mode; $\delta_{вкл}$ — value of the angle δ when voltage is restored

Рисунок 1. Площади торможения и ускорения

Figure 1. Braking and acceleration areas

Угол включения при равенстве площадей называют допустимым углом $\delta_{доп}$ (рисунок 1, *b*). Динамическая устойчивость по методу площадей сохраняется, если угол включения не превышает допустимого значения. На рисунке 1 принято, что напряжение после кратковременного перерыва восстанавливается до предаварийного значения. При этом для допустимого угла можно получить:

$$\delta_{доп} = \text{Arc cos} \left[\text{Cos } \delta_f + \frac{M_c \cdot (\delta_f - \delta_0)}{M_{МАКС}} \right], \quad (1)$$

где $M_{МАКС}$ — максимальное значение синхронного момента;

M_c — момент сопротивления;

δ_0 — угол нагрузки в предаварийном режиме;

$\delta_{вкл}$ — значение угла δ при восстановлении электроснабжения;

$$\delta_f = 180^\circ - \delta_0. \quad (2)$$

Графически область динамической устойчивости СД в методе площадей можно изобразить на оси углов δ в виде интервала углов включения от δ_0 до $\delta_{доп}$ (рисунок 1, *c*). Такое изображение области устойчивости, во-первых, является малоинформативным и, во-вторых, затрудняет наглядное представление о влиянии на устойчивость режимов работы сети и электродвигателя.

Более информативным и наглядным является исследование путем построения областей динамической устойчивости в плоскости двух параметров. Для асинхронных двигателей широко используется плоскость с координатами «остаточное напряжение — время». Для исследования динамической устойчивости синхронных машин используется фазовая плоскость [17]. Для исследования устой-

чивости в плоскости двух параметров строится граничная линия, соответствующая нахождению двигателя на границе устойчивости. Если такая граничная линия является замкнутой, то область динамической устойчивости располагается внутри граничной линии. Рассмотрим построение граничных линий области устойчивости СД в плоскости двух параметров при использовании метода площадей. Выполним подстановку

$$\sin \delta_0 = M_c / M_{МАКС}, \quad (3)$$

и преобразуем уравнение (1) к виду:

$$\delta_{доп} = \text{Arc cos} [(-\text{Cos } \delta_0 + (\pi - 2\delta_0) \cdot \sin \delta_0)]. \quad (4)$$

В плоскости ($\delta_{вкл}$, δ_0) граничная линия по уравнению (4) соответствует максимально допустимым углам включения.

Минимально возможным углам включения соответствует уравнение

$$\delta_{мин} = \delta_0. \quad (5)$$

В соответствии с рисунком 1, *c* на оси углов область динамической устойчивости располагается между значениями δ_0 и $\delta_{доп}$. В плоскости двух углов ($\delta_{вкл}$, δ_0) область динамической устойчивости будет располагаться между граничными линиями, построенными по уравнениям (4) и (5).

Расчеты по уравнению (4) при изменении начального угла δ_0 от нуля до 90° приведены в таблице 1.

По результатам расчета допустимых углов включения на рисунке 2 в плоскости угол нагрузки — угол включения построены две граничные линии: $\delta_{доп} = f(\delta_0)$ по уравнению (4) и $\delta_{мин} = f(\delta_0)$ по уравнению (5).

Область, ограниченная этими линиями, представляет собой область динами-

Таблица 1. Значения допустимых углов включения синхронного двигателя

Table 1. Values of permissible angles of activation of the synchronous motor

δ_0 , град	0	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90
$\delta_{доп}$, град	0	120,0	96,0	79,4	73,7	69,2	66,2	64,7	64,7	66,1	68,4	71,7	80,3	90,0

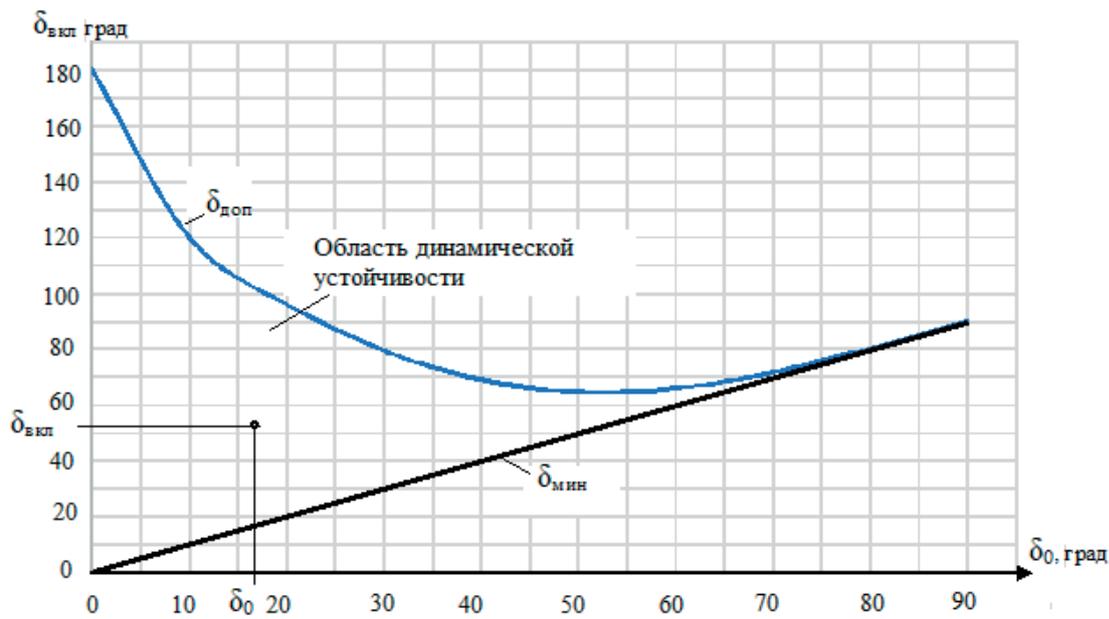


Рисунок 2. Граничные линии области динамической устойчивости синхронного двигателя в плоскости $(\delta_{\text{вкл}}, \delta_0)$

Figure 2. Boundary lines of the dynamic stability area of the synchronous motor in the plane $(\delta_{\text{вкл}}, \delta_0)$

ческой устойчивости. Так как граничные линии построены без использования информации о параметрах двигателя, то область динамической устойчивости на рисунке 2 является обобщенной и применима для любого СД.

Область динамической устойчивости конкретного СД в конкретном режиме работы является частью обобщенной области на рисунке 2.

Пример исследования

Для определения области динамической устойчивости конкретного СД в определенных условиях достаточно найти начальный угол нагрузки δ_0 в предаварийном режиме, затем задать угол включения $\delta_{\text{вкл}}$ (исходя из времени срабатывания АВР) и построить точку с координатами $(\delta_0, \delta_{\text{вкл}})$. Если точка с найденными координатами $(\delta_0, \delta_{\text{вкл}})$ находится в области устойчивой работы, то СД в исследуемом режиме обладает динамической устойчивостью, и синхронный режим СД после восстановления напряжения питания будет восстановлен.

Рассмотрим использование области динамической устойчивости в плоскости $\delta_0, \delta_{\text{вкл}}$ для оценки устойчивости СД серии СТД мощностью 2500 кВт. Согласно [15], угол нагрузки δ_0 для синхронного режима СД может быть определен из выражения:

$$\delta_0 = \arctan \frac{X_d \cdot K_3 \cdot \cos \varphi}{U^2 + X_d \cdot K_3 \cdot \sin \varphi}, \quad (6)$$

где X_d — синхронное реактивное сопротивление СД;

K_3 — коэффициент загрузки;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности;

U — напряжение на зажимах двигателя.

Результаты расчета угла нагрузки по (6) при изменении коэффициента загрузки от 0,2 до 1,0; при двух значениях напряжения: номинальном $U_{\text{ном}}$ и $0,9U_{\text{ном}}$ и при значениях коэффициента мощности $\cos \varphi = 0,9$ и $\cos \varphi = 1,0$ приведены таблице 2.

Для построения области динамической устойчивости в любом из режимов, представленных в таблице 2, достаточно на универсальную область, приведенную на рисунке 2, нанести значения углов

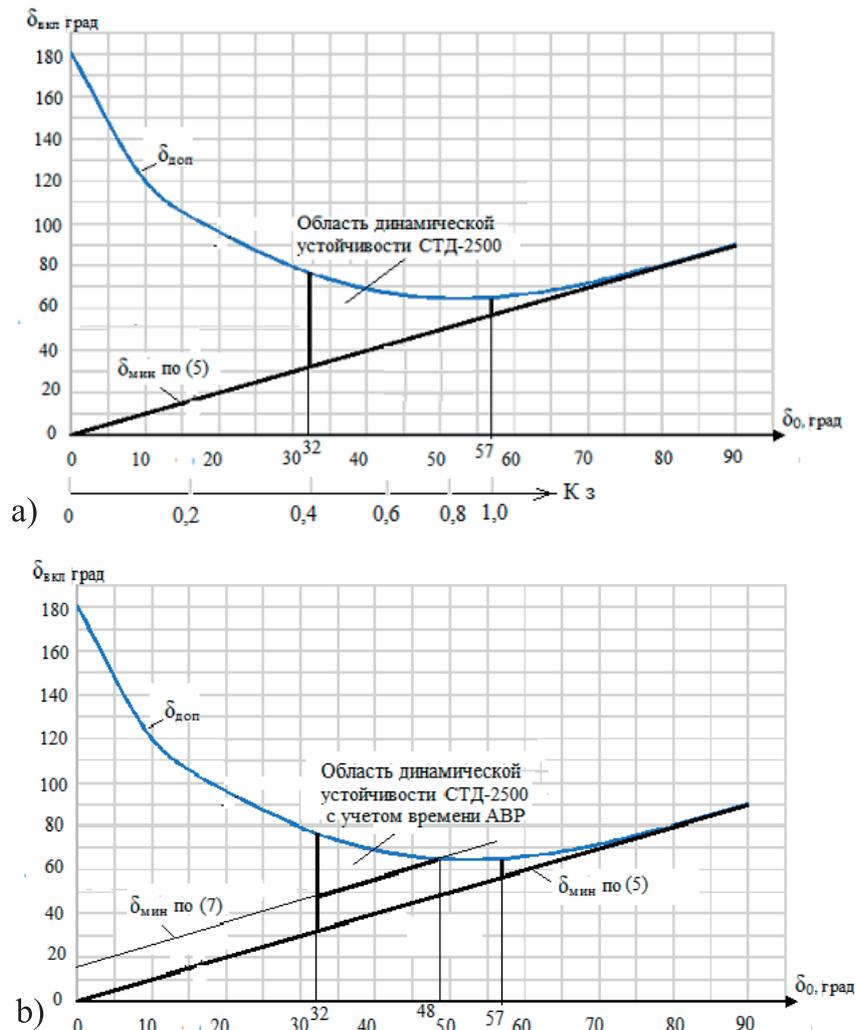
Таблица 2. Значения углов нагрузки δ_0 для СТД-2500**Table 2.** Values of loading angles δ_0 for CTD-2500

K_3	$U = U_{ном}$		$U = 0,9U_{ном}$	
	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 1,0$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 1,0$
0,2	13,73	17,12	16,35	18,87
0,4	23,61	31,63	27,19	34,36
0,6	30,66	42,74	34,43	45,72
0,8	35,80	50,93	39,45	53,82
1,0	39,67	57,00	43,09	59,67

нагрузки δ_0 в этом режиме. Области динамической устойчивости, построенные по данным таблицы 2, для значений коэффициента нагрузки от 0,4 до 1,0 при $\cos \varphi = 1,0$ и $U = U_{ном}$ приведены на рисунке 3, а.

Из таблицы 2 и рисунка 3, а видно, что динамическая устойчивость СТД-2500

возможна только при углах нагрузки меньше 57° . Горизонтальную ось на рисунках 2 и 3 можно проградуировать в значениях любого из параметров предварительного режима, входящих в (6): коэффициента загрузки СД, коэффициента мощности или напряжения питания на шинах. При этом плоскость двух углов

**Рисунок 3.** Области динамической устойчивости СТД-2500**Figure 3.** CTD-2500 dynamic stability areas

трансформируется в плоскость «угол — исследуемый параметр». В такой плоскости наглядно видно влияние исследуемого параметра на динамическую устойчивость СД. На рисунке 3, *a* показана ось коэффициентов загрузки двигателя K_z . По форме области динамической устойчивости в плоскости «угол включения — коэффициент загрузки» на рисунке 3 видно, что увеличение коэффициента загрузки двигателя приводит к снижению диапазона углов включения ($\delta_0 < \delta_{вкл} < \delta_{дон}$), при которых СД типа СТД-2500 сохраняет динамическую устойчивость.

Уравнение (5) для минимально возможного угла включения записано для идеального случая, когда устройство АВР срабатывает мгновенно. Для учета времени срабатывания АВР запишем уравнение (5) в виде:

$$\delta_{мин} = \delta_0 + \Delta\delta, \quad (7)$$

где $\Delta\delta$ — изменения угла δ за время срабатывания АВР.

Граничная линия по уравнению (7) и область динамической устойчивости СТД-2500 с учетом времени срабатывания АВР показаны на рисунке 3, *b*. При этом максимально возможный угол

Список источников

1. Абрамович Б.Н., Бабуринов С.В., Можая И.А. и др. Надежность промышленных электротехнических комплексов / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Н. Абрамовича. СПб: Наука, 2021. 154 с.

2. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Обеспечение бесперебойной работы потребителей при потере питания. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. 216 с.

3. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Юсупов Р.З. Условия устойчивости технологического режима НПС при кратковременных нарушениях электроснабжения // Межвуз. сб. науч. тр. «Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов». Уфа: Изд-во УГНТУ, 2010. С. 105-113.

нагрузки, при котором возможно сохранение динамической устойчивости, снижается до 48° .

Если обобщенная область динамической устойчивости на рисунке 2 относится ко всему диапазону изменения угла δ_0 без привязки к параметрам СД, то области на рисунке 3 построены для конкретного двигателя и конкретных режимов и во всех случаях являются частью обобщенной области динамической устойчивости.

Выводы

1. По форме области динамической устойчивости в плоскости двух углов можно исследовать влияние угла нагрузки в предаварийном режиме на динамическую устойчивость СД. При этом использование плоскости двух углов делает исследование влияния параметров режима на динамическую устойчивость СД более наглядным.

2. На примере синхронного двигателя типа СТД-2500 показано определение области динамической устойчивости в плоскости ($\delta_0, \delta_{вкл}$) и ее применение для оценки устойчивости СД при изменении одного из параметров (коэффициента загрузки), влияющих на устойчивость.

4. Лосев Ф.А., Прокопчук И.А., Сушков В.В. Оценка устойчивости ответственных нефтепромысловых потребителей // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 56-61.

5. Шабанов В.А., Юсупов Р.З., Пашкин В.А. Допустимые углы рассогласования СД на НПС при восстановлении питания // Сборник «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий». Уфа, 2009. С. 3-10.

6. Поляхов Н.Д., Михалев С.В. Повышение устойчивости синхронных двигателей при кратковременной потере питания // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 10. С. 62-68.

7. Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э., Мударисов Р.М. Методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфаз-

ных коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. № 21 (3-4). С. 90-99. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-90-99>.

8. Мударисов Р.М. Методики оценки устойчивости узлов нагрузки с синхронными двигателями при кратковременных нарушениях электроснабжения: дисс. ... канд. техн. наук. Казань: КГЭУ, 2020. 180 с.

9. Carlsson F., Sadarangani C. Behavior of Synchronous Machines Subjected to Voltage Sags of Type A, B and E // EPE Journal. December 2005. Vol. 15. No. 4. P. 35-42.

10. Babescu M., Prosteian O., Prosteian G., Szeidert I., Vasar C. Considerations Above Synchronous Machine Stability Analysis by Using Phase Portraits // 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems, 2007.

11. Aguilar D., Luna A., Rolan A., Vazquez G., Acevedo G. Modeling and Simulation of Synchronous Machine and Its Behaviour against Voltage Sags // IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009). Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009. Seoul, 2009. P. 729-733.

12. Alipoor J., Doroudi A., Ghaseminezhad M. Detection of the Critical Duration of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillation // Energy and Power Engineering. 2012. № 4. P. 117-124. doi: 10.4236/epe.2012.43016.

13. Alipoor J., Doroudi A., Hosseinian S.H. Identification of the Critical Characteristics of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillations // Electric Power Components and Systems. 2014. No. 42. Vol. 13. P. 1347-1355.

14. Moeini A., Kamwa I., Brunelle P., Sybille G. Synchronous Machine Stability Model // an Update to IEEE Std Technique Conference: 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 1110-2002, August 2018. 2018. doi:10.1109/PESGM.2018.8586169.

15. Шабанов В.А., Басырова А.А., Кантюков Н.Р. Анализ требований к времени включения БАВР при параллельном алгоритме // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во

ООО «Научно-инженерный центр «Энергодиагностика», 2021. С. 74-81.

16. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.

17. Андреев В.А., Овсиенко Л.Ф., Свиридов Ю.П. Обоснование времени действия устройств автоматического включения резерва, установленных на подстанциях с синхронными двигателями // Вестник УлГТУ. 2000. № 1.

References

1. Abramovich B.N., Baburin S.V., Mozhaeva I.A. e.a. Nadezhnost' promyshlennykh elektrotekhnicheskikh kompleksov [Reliability of Industrial Electrical Systems]. Edited by Doctor of Engineering Sciences, Professor B.N. Abramovich. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2021. 154 p. [in Russian].

2. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu. *Obespechenie bespereboinoi raboty potrebiteli pri potere pitaniya* [Ensuring Uninterrupted Operation of Consumers in the Event of a Power Loss]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2013. 216 p. [in Russian].

3. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Yusupov R.Z. Usloviya ustoichivosti tekhnologicheskogo rezhima NPS pri kratkovremennykh narusheniyakh elektrosnabzheniya [Conditions for the Stability of the Technological Mode of the Pumping Stations during Short-Term Power Failures.]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Povyshenie nadezhnosti i energo-effektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov»* [Interuniversity Collection of Scientific Papers «Improving the Reliability and Energy Efficiency of Electrical Systems and Complexes»]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2010, pp. 105-113. [in Russian].

4. Losev F.A., Prokopchuk I.A., Sushkov V.V. Otsenka ustoichivosti otvetstvennykh neftepromyslovykh potrebiteli [Stability Assessment of Responsible Oil-Field Power Consumer]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin — Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2019, Vol. 7, No. 2, pp. 56-61. [in Russian].

5. Shabanov V.A., Yusupov R.Z., Pashkin V.A. Dopustimye ugly rassoglasovaniya SD na NPS pri vosstanovlenii pitaniya [Permissible

Angles of Mismatch of the LED on the PS When Power is Restored]. *Sbornik «Elektrotehnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii»* [Collection «Electrical Technologies, Electric Drive and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, 2009, pp. 3-10. [in Russian].

6. Polyakhov N.D., Mikhalev S.V. Povyshenie ustoichivosti sinkhronnykh dvigatelei pri kratkovremennoi potere pitaniya [Improving the Stability of Synchronous Motors with Short-Term Power Loss]. *Izvestiya SPbGETU «LETI» — Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*, 2012, No. 10, pp. 62-68. [in Russian].

7. Fedotov A.I., Abdullazyanov R.E., Mudarisov R.M. Metodiki otsenki ustoichivosti sinkhronnykh dvigatelei pri trekhfaznykh korotkikh zamykaniyakh v sisteme vneshnego elektrosnabzheniya [Methods for Assessing the Stability of Synchronous Motors with Three-Phase Short Circuits in the External Power Supply System]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2019, No. 21 (3-4), pp. 90-99. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-90-99>. [in Russian].

8. Mudarisov R.M. *Metodiki otsenki ustoichivosti uzlov nagruzki s sinkhronnymi dvigatelyami pri kratkovremennykh narusheniyakh elektrosnabzheniya: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Methods for Assessing the Stability of Synchronous Motors during Short-Term Power Failures: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Kazan, KGEU Publ., 2020. 180 p. [in Russian].

9. Carlsson F., Sadarangani C. Behavior of Synchronous Machines Subjected to Voltage Sags of Type A, B and E. *EPE Journal*, December 2005, Vol. 15, No. 4, pp. 35-42.

10. Babescu M., Prostean O., Prostean G., Szeidert I., Vasar C. Considerations Above Synchronous Machine Stability Analysis by Using Phase Portraits. *6th International Conference on Electromechanical and Power Systems*, 2007.

11. Aguilar D., Luna A., Rolan A., Vazquez G., Acevedo G. Modeling and Simulation of Synchronous Machine and Its Behaviour against Voltage Sags. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)*. Seoul

Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009. Seoul, 2009, pp. 729-733.

12. Alipoor J., Doroudi A., Ghaseminezhad M. Detection of the Critical Duration of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillation. *Energy and Power Engineering*, 2012, No. 4, pp. 117-124. doi: 10.4236/epe.2012.43016.

13. Alipoor J., Doroudi A., Hosseinian S.H. Identification of the Critical Characteristics of Different Types of Voltage Sags for Synchronous Machine Torque Oscillations. *Electric Power Components and Systems*, 2014, No. 42, Vol. 13, pp. 1347-1355.

14. Moeini A., Kamwa I., Brunelle P., Sybille G. Synchronous Machine Stability Model. *An Update to IEEE Std Technique Conference: 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 1110-2002, August 2018*. 2018. doi:10.1109/PESGM.2018.8586169.

15. Shabanov V.A., Basyrova A.A., Kantukov N.R. Analiz trebovaniy k vremeni vklyucheniya BAVR pri parallel'nom algoritme [Analysis of the Requirements for the Turn-On Time of the BAVR with a Parallel Algorithm]. *Sbornik nauchnykh trudov VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivod, elektrotehnologii i elektrooborudovanie predpriyatii»* [Collection of Scientific Papers of the VI International Scientific and Technical Conference «Electric Drive, Electrical Technologies and Electrical Equipment of Enterprises»]. Ufa, Izd-vo OOO «Nauchno-inzhenernyi tsentr «Energodiagnostika», 2021, pp. 74-81. [in Russian].

16. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient Electromechanical Processes in Electrical Systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p. [in Russian].

17. Andreev V.A., Ovsienko L.F., Svirodov Yu.P. Obosnovanie vremeni deistviya ustroystv avtomaticheskogo vklyucheniya rezerva, ustanovlennykh na podstantsiyakh s sinkhronnymi dvigatelyami [The Substantiation of Time Operating Devices of Automatic Actuation of a Reserve, Established on Substations with Synchronous Load]. *Vestnik UIGTU — Bulletin of UISTU*, 2000, No. 1. [in Russian].



Антон Николаевич Яшин
Anton N. Yashin

аспирант кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, Уфа, Россия



Андрей Сергеевич Бодылев
Andrey S. Bodylev

аспирант кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, Уфа, Россия



Регина Тагировна Хазиева
Regina T. Khazieva

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, Уфа, Россия



Марат Ильгизович Хакимьянов
Marat I. Khakimyanov

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Электротехника и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, Уфа, Россия

УДК 621.311, 621.311.24, 620.9

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-82-97

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Актуальность

Для удовлетворения растущих потребностей в электроэнергии населения, в особенности проживающего вдали от централизованных центров энергоснабжения, все более актуальным становится применение возобновляемых источников энергии. Кроме того, технологические процессы в нефтегазовой отрасли являются весьма энергоемкими. Предприятия нефтегазовой отрасли, расположенные в том числе в отдаленных районах (Крайний Север и т.д.) легче обеспечить энергоресурсами, в частности с использованием возобновляемых источников энергии. Важным вопросом является организация надежного электроснабжения в автономном режиме.

Также существующие технологии энергоснабжения не всегда легко адаптированы для использования на малых и средних предприятиях. Важную роль в этом вопросе могут сыграть возобновляемые источники энергии. Следовательно, исследование технологий автономной генерации электрической и тепловой энергии, рациональное ее потребление за счет использования энергосберегающих технологий весьма актуальны в настоящее время.

Цель исследования

Необходимо исследовать современные возобновляемые источники энергии. Необходимо выполнить обзор современных электростанций на возобновляемых источниках энергии, исследовать ветро-солнечный энергетический потенциал Республики Башкортостан. Важно провести эксперименты на лабораторной установке. Определить рабочие параметры, снять вольт-амперные характеристики и выбрать оптимальные режимы работы.

Объекты исследования

Возобновляемые источники энергии, лабораторная установка, солнечная электростанция, ветряная электростанция.

Методы исследования

Компьютерное моделирование, математические методы расчета и анализа.

Результаты

Смонтирован лабораторный комплекс для исследования ветро-солнечных энергетических установок. Разработаны компьютерные модели всех основных элементов лабораторного комплекса: ветрогенератора, фотоэлектрического преобразователя, аккумуляторных батарей. Проведены научные эксперименты.

Ключевые слова: возобновляемый источник энергии, солнечная электростанция, ветряная электростанция, ветрогенератор, ветропарк, фотоэлектрический модуль, лабораторный стенд, лабораторная установка

LABORATORY FACILITY FOR STUDYING THE APPLICATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

The relevance

The need for electricity among the population is constantly growing, especially among people living far from centralized energy supply centers. In addition, technological processes in the oil and gas industry are very energy intensive. Oil and gas industry enterprises located incl. in remote areas (Far North, etc.) it is easier to provide energy resources, in particular, using renewable energy sources. An important issue is the organization of reliable power supply in offline mode. Also, existing energy supply technologies are not always easily adapted for use in small and medium-sized enterprises. Renewable energy sources can play an important role in this matter. Therefore, research into technologies for autonomous generation of electrical and thermal energy, its rational consumption through the use of energy-saving technologies are very relevant at the present time.

Aim of research

It is necessary to investigate modern renewable energy sources. It is necessary to review modern power plants using renewable energy sources, to explore the wind and solar energy potential of the Republic of Bashkortostan. It is important to conduct experiments on a laboratory setup. Determine the operating parameters, take the current-voltage characteristics and select the optimal operating modes.

Research objects

Renewable energy sources, laboratory installation, solar power plant, wind farm.

Research methods

Computer modeling, mathematical methods of calculation and analysis.

Results

A laboratory complex for the study of wind-solar power plants was installed. Computer models of all the main elements of the laboratory complex have been developed: wind generator, photoelectric converter, storage batteries. Conducted scientific experiments.

Keywords: renewable energy source, solar power plant, wind power plant, wind generator, wind farm, photovoltaic module, laboratory bench, laboratory installation

Введение

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) становится актуальным трендом практически во всех отраслях промышленности и коммунального хозяйства. Все крупные нефтегазовые, химические и машиностроительные компании инвестируют значительные средства в разработку и постройку солнечных и ветряных электростанций, которые снижают их зависимость от электроснабжающих организаций [1]. Крупные заводы и даже университеты размещают на крышах своих цехов и корпусов солнечные батареи, покрывающие часть их потребностей в электроэнергии.

Следует отметить, что в настоящее время в нашей стране вложения в возобновляемую энергетику не всегда окупают себя. Оборудование имеет слишком высокую стоимость, коэффициент полезного действия солнечных панелей недостаточно высокий и снижается с каждым годом эксплуатации. Ветрогенераторы окупаются только при достаточно большом их количестве. Однако данная ситуация является временной, все более жесткие требования охраны окружающей среды, процессы декарбонизации промышленности заставляют энергетику переориентироваться от углеводородной сырьевой базу в сторону использования возобновляемых источников [2].

В этих условиях на предприятиях различных отраслей промышленности появляется потребность в специалистах для проектирования, монтажа и эксплуатации энергетических установок на основе ВИЭ. Для качественной подготовки студентов соответствующих специальностей

требуется современная лабораторная база, позволяющая исследовать солнечные и ветряные электростанции.

Обзор современных электростанций на возобновляемых источниках энергии

В настоящее время наиболее широко из ВИЭ используются гидроэлектростанции (ГЭС), ветрогенераторы и солнечные электростанции. Самой большой мощностью обладают гидроэлектростанции [3], самыми мощными из которых являются «Три ущелья» (Китай), «Итайпу» (Бразилия и Парагвай), «Силоду» (Китай), «Гури» (Венесуэла), «Тукуруи» (Бразилия), «Гранд-Коули» (США) и Саяно-Шушенская ГЭС (Россия) [4, 5]. Информация по ним приведена в таблице 1.

Недостатками ГЭС является затопление больших территорий для создания водохранилищ, а также опасность техногенных катастроф, которые могут привести к большому количеству жертв (взрыв ДнепроГЭС в годы войны, авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г.)

Следует отметить, что активно развивается также направление использования микроГЭС, в котором ГЭС небольшой мощности используются для электроснабжения отдельных деревень, домов и небольших агропромышленных предприятий [6]. Такие микроГЭС не оказывают большого воздействия на окружающую среду и не несут в себе опасности техногенных катастроф. Однако содержание и техобслуживание таких небольших электростанций связано с определенными затратами.

Таблица 1. Информация по крупнейшим гидроэлектростанциям**Table 1.** Information on the largest hydroelectric power plants

	Наименование гидроэлектростанции Hydroelectric power plant name	Страна Country	Река River	Установленная мощность, МВт Installed capacity, MW
1	Три ущелья/Three gorges	Китай/China	Янцзы/Yangtze	22500
2	Байхэтань/Baihetan	Китай/China	Янцзы/Yangtze	16000
3	Итайпу/Itaipu	Бразилия-Парагвай/ Brazil-Paraguay	Парана/Paraná	14000
4	Силоду/Siloda	Китай/China	Янцзы/Yangtze	13860
5	Белу Монти/Belo Monti	Бразилия/Brazil	Шингу/Xingu	11233
6	Гури/Guri	Венесуэла/Venezuela	Карони/Caroni	10235
7	Удундэ/Udunde	Китай/China	Янцзы/Yangtze	10200
8	Тукуруи/Tucuruí	Бразилия/Brazil	Токатинс/ Tokatins	8370
9	Тасанг/Tasang	Мьянма/Myanmar	Салуин/ Salween	7110
10	Гранд-Кули/Grand Coulee	США/USA	Колумбия/ Colombia	6809
11	Хидасэ/Hidase	Эфиопия/Ethiopia	Голубой Нил/ Blue Nile	6450
12	Сянцзяба/Xiangjiaba	Китай/China	Янцзы/Yangtze	6448
13	Лутань/Lutan	Китай/China	Хуншуйхэ/ Hongshuihe	6426
14	Саяно-Шушенская/ Sayano-Shushenskaya	Россия/Russia	Енисей/Yenisei	6400
15	Тарбела/Tarbela	Пакистан/Pakistan	Инд/Ind	3478
16	Красноярская/Krasnoyarsk	Россия/Russia	Енисей/Yenisei	6000

Ветровые электростанции (ВЭС) достаточно активно устанавливаются как в России, так и во всем мире [7]. Промышленностью выпускаются ветрогенераторы мощностью от единиц киловатт для загородных домов до 6 МВт и более — для крупных ветропарков [8]. Применяются ВЭС следующих типов: наземные, прибрежные, шельфовые, горные, плавающие и парящие.

Среди наиболее крупных ВЭС в мире можно выделить «Ганьсу» (Китай), «Муппандал» (Индия), «Джайсалмер» (Индия), «Альта» и «Шефердс Флэт» (США) [9, 10]. Среди российских ВЭС крупнейшими являются «Кочубеевская»,

«Адыгейская», «Бондаревская», «Марченковская» и другие. Информация о крупнейших ВЭС России и мира приведена в таблице 2.

Ветровые электростанции хоть и относятся в «зеленом» источникам энергии, но оказывают некоторое воздействие на экологию окружающей среды [11, 12]. Так законодательством некоторых стран ограничивается максимальный уровень шума, производимого ветротурбинами, и минимальное расстояние до жилых домов [13].

Одиночно стоящие ветрогенераторы, как правило, не являются рентабельными. Окупаются только ветропарки, состоя-

Таблица 2. Информация о крупнейших ветровых электростанциях России и мира**Table 2.** Information about the largest winds power plants in Russia and the world

	Наименование ветровой электростанции Winds power plant name	Страна Country	Установленная мощность, МВт Installed capacity, MW
1	Ганьсу/Gansu	Китай/China	7 965
2	Муппандал/Muppandal	Индия/India	1 500
3	Джайсалмер/Jaisalmer	Индия/India	1 064
4	Альта/Alta	США/USA	1020
5	Шефордс Флэт/Shefords Flat	США/USA	845
6	Лондон Эррей/London Array	Англия/England	630
7	Кочубеевская ВЭС/Kochubeevskaya WPP	Россия/Russia	210
8	Адыгейская ВЭС/Adygei WPP	Россия/Russia	150
9	Бондаревская ВЭС/Bondarevskaya WPP	Россия/Russia	120
10	Марченковская ВЭС/Marchenkovskaya WPP	Россия/Russia	120
11	Казачья ВЭС/Kazachya WPP	Россия/Russia	100
12	Целинская ВЭС/Tselinskaya WPP	Россия/Russia	100
13	Гуковская ВЭС/Gukovskaya WPP	Россия/Russia	100
14	Каменская ВЭС/Kamenskaya WPP	Россия/Russia	100
15	Салынская ВЭС/Salyn WPP	Россия/Russia	100
16	Сулинская ВЭС/Sulinskaya WPP	Россия/Russia	100

шие из десятков и сотен ветрогенераторов.

Рассматривая наиболее обширно развивающиеся направления в мировой энергетике, можно смело сказать, что самый динамичный рост наблюдается в плоскости функционирования солнечных электростанций (СЭС) [14]. СЭС подразделяются на несколько типов: тарельчатые, башенные, аэростатные, солнечно-вакуумные, параболоцилиндрические концентраторные и комбинированные [15]. Наиболее распространены СЭС на основе фотоэлектрических модулей.

Информация по наиболее мощным СЭС в России и мире приведена в таблице 3.

В России наиболее крупными являются СЭС «Перово» мощностью 105,6 МВт, Самарская СЭС — 75 МВт, СЭС «Николаевка» — 69,7 МВт (Крым),

Ахтубинская СЭС (Астраханская область) — 60 МВт.

Солнечная энергетика также развивается в Республике Башкортостан: Бурибаевская СЭС (20 МВт), Бугульчанская СЭС (10 МВт) и Исянгуловская СЭС (9 МВт). Кроме того, ведется строительство еще нескольких электростанций.

Столь стремительное развитие ветро-солнечной энергетике вызывает рост потребности предприятий энергетических отраслей промышленности в специалистах для проектирования, монтажа, пусконаладки и эксплуатации ВЭС и СЭС.

Лабораторная установка для исследования ветро-солнечных энергетических установок

С целью повышения качества подготовки бакалавров и магистров направлений 13.03.02 и 13.04.02 «Электро-

Таблица 3. Информация по наиболее мощным солнечным электростанциям в России и мире**Table 3.** Information about the most powerful solar power plants in Russia and the world

	Наименование солнечной электростанции Solar power plant name	Страна Country	Установленная мощность, МВт Installed capacity, MW
1	Солнечный парк Тэнгеп/ Tanger Solar Park	Китай/China	1 547
2	Солнечный парк Бхадла/ Bhadla Solar Park	Индия/India	1 365
3	Солнечная электростанция Лунъянся/ Longyangxia Solar Power Plant	Индия/India	1 064
4	Солнечная электростанция Villanueva/ Villanueva Solar Power plant	Мексика/Mexico	828
5	Солнечная электростанция Камути/ Kamuti Solar Power Plant	Индия/India	648
6	Солнечная электростанция Solar Star/ Solar Star Solar Power Plant	США/USA	580
7	Солнечная электростанция имени Мохаммеда бин Рашида Аль Мактума/ Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Power Plant	ОАЭ/UAE	213
8	СЭС Перово/ SPP Perovo	Россия/Russia	105,56
9	Старомарьевская СЭС/ Staromaryevskaya SPP	Россия/Russia	100
10	СЭС Охотниково/SPP Okhotnikovo	Россия/Russia	82,6
11	Фунтовская СЭС/Funtovskaya SPP	Россия/Russia	75
12	Самарская СЭС/ Samara SPP	Россия/Russia	75

энергетика и электротехника», а также для проведения научных исследований аспирантов на кафедре электротехники и электрооборудования предприятий ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» была разработана и смонтирована лабораторная установка для исследования ветро-солнечных электростанций.

Структурная схема лабораторной установки показана на рисунке 1. Она включает в себя ветрогенератор мощностью 1 кВт фирмы YASHEL (1), две солнечные панели мощностью 280 Вт фирмы YASHEL (2), контроллер ветрогенератора FKJ-A1-1KW 24V фирмы YASHEL (3), контроллер заряда для солнечных батарей DELTA Solar Series серии MPPT (4), инвертор напряжения EP30 PLUS-

1.5KW/24V (5), два гелевых аккумулятора емкостью 100 А·ч (6) и нагрузку в виде светодиодного прожектора.

Фотография смонтированной установки показана на рисунке 2.

Моделирование ветро-солнечной энергетической установки

Построена компьютерная модель данной ветро-солнечной энергетической установки в пакете Matlab Simulink.

Одним из основных этапов построения модели является система фотоэлектрического преобразователя, модель которой изображена на рисунке 3.

Задачи фотоэлектрической солнечной батареи выполняет блок Solar Cell. Данный блок включает в себя следующие компоненты: солнечно вызванный ток,

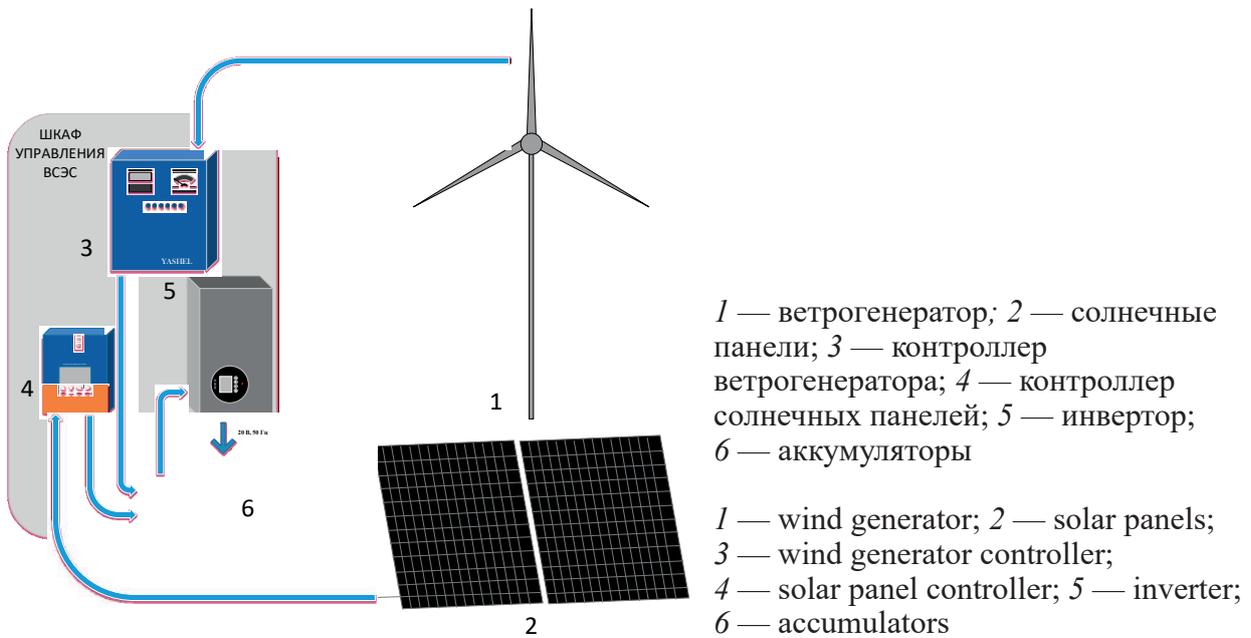


Рисунок 1. Структурная схема лабораторной установки

Figure 1. Structural diagram of the laboratory device



Рисунок 2. Фотография смонтированной установки

Figure 2. Photo of the assembled unit

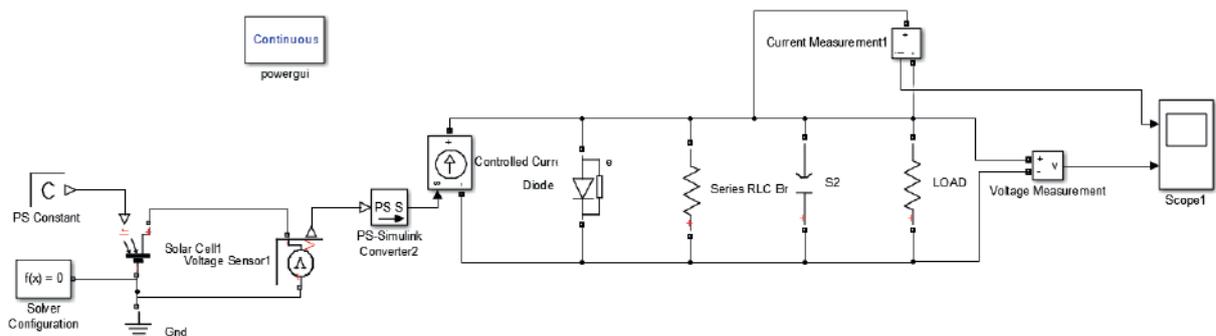


Рисунок 3. Модель системы фотоэлектрического преобразователя

Figure 3. Photovoltaic converter system model

температурную зависимость и тепловой порт [16].

Также модель системы фотоэлектрического преобразователя включает параллельно соединенные диод, резистор, конденсатор и активную нагрузку.

Следующим этапом является построение модели ветроэнергетической установки, изображенной на рисунке 4.

Основной блок данной модели — это Wind Turbine Induction Generator (WTIG). Обмотка статора соединяется непосредственно с сетью, ротор управляется ветряным двигателем. Мощность, полученная ветряным двигателем, преобразована в электроэнергию генератором и передается в сеть обмоткой статора. Углом подачи управляют для того, чтобы ограничить выходную мощность генератора ее номинальной скоростью при сильном ветре. Для того, чтобы произвести энер-

гию, скорость генератора должна быть немного выше синхронной скорости. Но изменение скорости обычно так мало, что WTIG считается ветрогенератором фиксированной скорости.

Также модель ветроэнергетической установки состоит из трехфазного источника питания, параллельно соединенных диода, резистора, конденсатора и активной нагрузки.

Основной блок данной модели — блок Battery. Данный блок реализует общую динамическую модель, которая представляет самые популярные типы аккумуляторных батарей.

Модель системы аккумулирования энергии состоит из блока аккумуляторной батареи, двунаправленного блока постоянного тока (БПТ) и схемы контроля БПТ (рисунок 5).

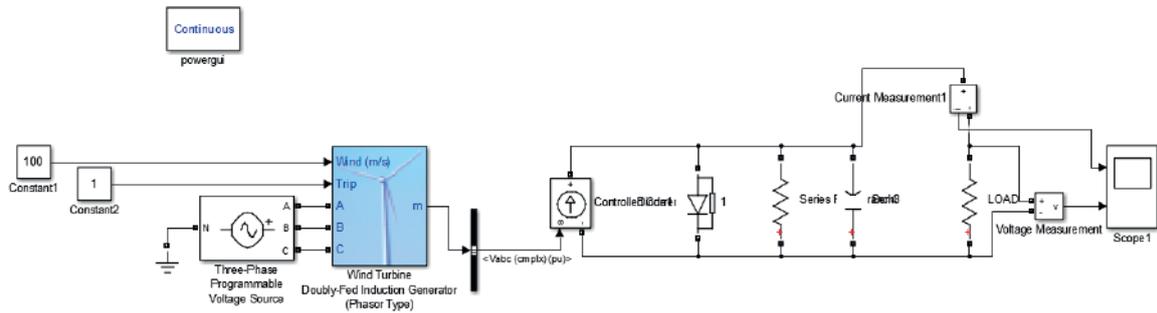


Рисунок 4. Модель ветроэнергетической установки

Figure 4. Wind turbine model

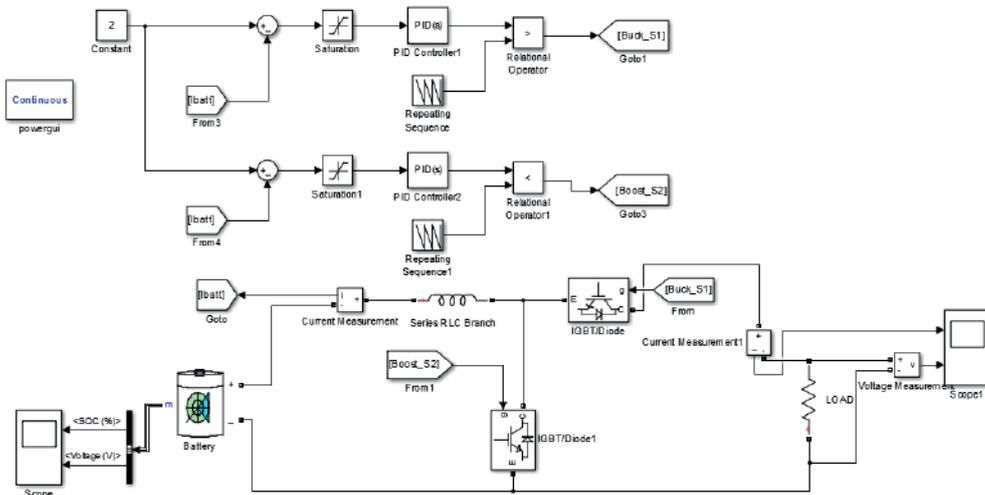


Рисунок 5. Модель системы аккумулирования энергии

Figure 5. Energy storage system model

Двухнаправленный блок постоянного тока позволяет реализовать сложные комбинированные системы электроснабжения, включая ветро-солнечную энергетическую установку. Двухнаправленный БПТ используется с целью передать энергию от фотоэлектрической панели источнику энергии в течение времени, когда скорость ветра и уровень солнечной радиации достаточны, чтобы удовлетворить нагрузку, когда напряжение на шине постоянного тока низкое.

Объединив модели системы фотоэлектрического преобразователя, ветроэнергетической установки и системы аккумулялирования энергии, получаем модель ветросолнечной энергетической установки, представленную на рисунке 6.

Эксперименты, проводимые на лабораторной установке

Лабораторная установка предназначена для использования в учебном процессе на кафедре электротехники и электрооборудования предприятий ФГБОУ ВО «УГНТУ» при подготовке магистров программы «Альтернативные и возобновляемые источники и накопители энергии», а также для проведения научных экспериментов аспирантами кафедры.

Установка позволяет проводить следующие эксперименты:

- определение напряжения холостого хода солнечных панелей;
- определение тока короткого замыкания солнечных панелей;
- снятие вольт-амперных характеристик солнечных элементов;
- исследование зависимости мощности ветрогенератора от скорости ветра;
- исследование вольт-амперной характеристики ветрогенератора в зависимости от вида нагрузки;
- исследование ветро-солнечного энергетического потенциала Республики Башкортостан.

Один из базовых параметров солнечных элементов — напряжение холостого хода U_{xx} , которое создает каждый солнечный элемент. Данное значение напряжения является максимальным и наблюдается при нулевом токе. Это напряжение численно равно прямому смещению, соответствующему изменению напряжения $p-n$ перехода, который наблюдается в ситуации появления светового потока. Необходимо обратить внимание, что U_{xx} отдельного элемента может варьироваться от элемента к элементу даже в пределах одной партии от одного и того же

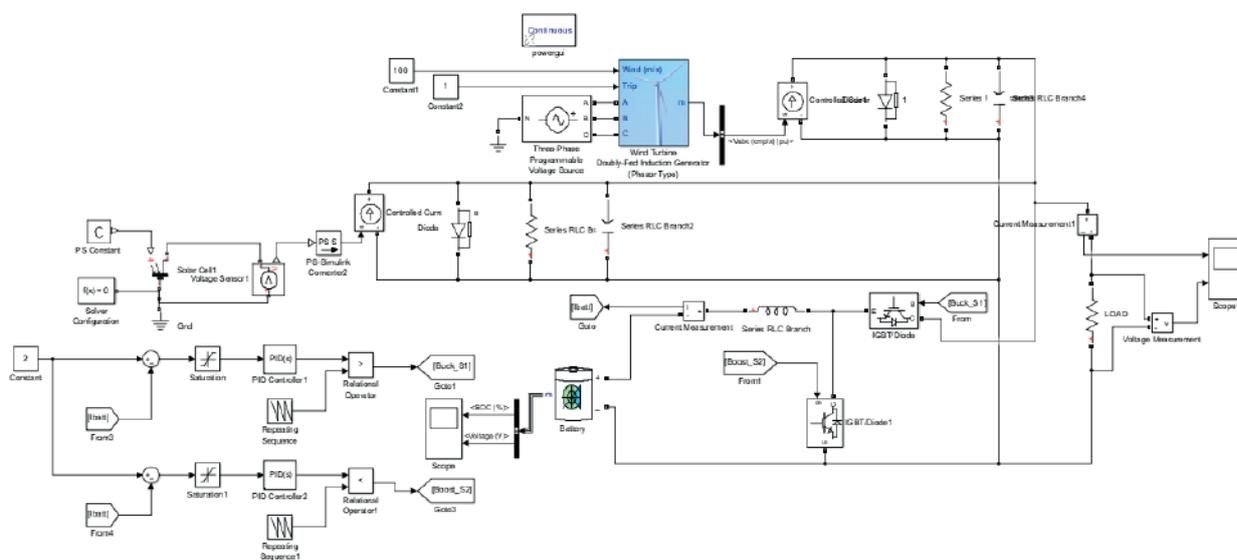


Рисунок 6. Модель ветро-солнечной энергетической установки

Figure 6. Model of a wind-solar power plant

производителя и может составлять около 0,5 В.

Следовательно, при сборке солнечных панелей необходимо выбирать ячейки с одинаковыми напряжениями холостого хода, иначе конечное КПД будет меньше расчетного максимума.

Для выполнения лабораторной работы требуется стенд с солнечными панелями.

В случае разной освещенности значения фото-ЭДС (или U_{xx}) равны точкам пересечения оси напряжения и вольт-амперной характеристики. (Фото-ЭДС ~ 0,50–0,55 В для кремниевого элемента). Таким образом, в зависимости от освещенности (интенсивности источника света) изменяется значение напряжения холостого хода [17].

Опыт проводится при изменении мощности источника света от 30 % до 100 %. Варьируя значение для каждого испытуемого элемента, заполняется таблица. В ходе выполнения лабораторных исследований напряжение холостого хода следует измерять 3 раза.

Напряжение холостого хода также зависит от угла наклона солнечных элементов, который при 100 %-ой интенсивности света изменяется от 0° до 90° с шагом 10°.

Для моделирования изучаемого процесса в диаграмму добавляется линия тренда с высоким значением R_2 (чем ближе значение R_2 к 1, тем ближе линия тренда приближается к изучаемому процессу) [18].

Таким образом, можно проанализировать, как изменяется напряжение холостого хода.

Следующий эксперимент заключается в определении тока короткого замыкания солнечных батарей в зависимости от угла наклона элемента и интенсивности источника света. Значение токов короткого замыкания $I_{KЗ}$ соответствуют точкам пересечения оси тока с вольт-амперной характеристикой. В случае среднего сол-

нечного света плотность тока короткого замыкания для кремниевых элементов будет равняться ~20–25 мА/см².

Это происходит в результате генерации и разделения носителей, генерируемых светом. Ток короткого замыкания в случае рассмотрения его в идеальном солнечном элементе, имеющем умеренные резистивные потери, будет равен световому потоку. Из этого следует, что ток короткого замыкания может быть рассмотрен в качестве максимального тока, генерируемого солнечным элементом.

Ток короткого замыкания прямо пропорционален интенсивности света: при малой освещенности зависимость $I_{KЗ} \sim J$ носит линейный характер, поскольку ток $I_{KЗ}$ прямо пропорционален числу образовавшихся электронно-дырочных пар:

$$I_{KЗ} \sim g, \quad (1)$$

где g — количество образовавшихся электронно-дырочных пар.

Наблюдается прямая пропорциональность количества поглощённых квантов света к электронно-дырочным парам:

$$g = \eta \cdot \alpha \cdot J, \quad (2)$$

где α — показатель поглощения,

J — интенсивность света,

η — внутренний квантовый выход.

Внутренний квантовый выход для кремниевых фотодиодов достигает 100. При помощи экспериментального соотношения $I_{KЗ}(J)$ можно узнать квантовую эффективность. Коэффициентом полезного действия (КПД) называется отношение максимальной мощности, получаемой от фотоэлемента, к полной мощности светового потока, который подаётся на рабочую поверхность:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P}. \quad (3)$$

При измерении в лаборатории фиксируется максимально возможный ток для солнечного элемента в данных условиях. Затем программное обеспечение автоматически снижает нагрузку до макси-

мально возможной. Ток короткого замыкания в этих условиях фиксируют с помощью амперметра. Опыт проводится путем изменения мощности источника света от 30 % до 100 %. Угол солнечного элемента при 100 %-ой интенсивности света изменяется от 0° до 90° с шагом 10°. Ток короткого замыкания необходимо измерять 3 раза [19].

Смысл следующего эксперимента с солнечными элементами заключается в непосредственном снятии вольт-амперной характеристики. Данная характеристика является одной из основных, когда речь идёт о солнечных элементах.

Поскольку рабочей областью является прямо смещенная и обратно смещенная область $p-n$ перехода, вольтамперная характеристика фотоэлемента обычно обратная [20].

Все типы солнечных элементов основаны на полупроводниках и поэтому являются нелинейными устройствами, и закон Ома в линейной форме к ним не применяется. Следовательно, используется графический метод.

В начале лабораторных измерений регулятор мощности источника света устанавливается на максимум (100 %). Программное обеспечение автоматически сканирует и отображает информацию о мощности, генерируемой солнечным элементом, как функцию приложенной нагрузки (тока). Относительная погрешность отображаемых графиков увеличивается при низкой освещенности солнечного элемента. Полученные графики позволяют определить максимальную мощность $P_{\text{макс.}}$, мВт, эффективное напряжение $U_{\text{эфф.}}$, мВ, и эффективный ток $I_{\text{эфф.}}$, мА [21].

Опыт проводится при изменении мощности источника света от 50 % до 100 %.

Можно вывести зависимость и оценить эффективность преобразования солнечной батареи, которая определяется как

отношение по формуле КПД и выглядит следующим образом [22]:

$$\eta = \frac{P_{\text{уд.макс}}}{P_{\text{пад}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $P_{\text{уд.макс}} = \frac{P_{\text{макс}}}{S}$ — максимальная удельная мощность солнечного элемента при 100 % интенсивности источника света, Вт/м² [23];

$P_{\text{пад}}$ — мощность падающего оптического излучения, равна 60 Вт/м².

Следующий опыт: исследование зависимости мощности ветрогенератора от скорости ветра.

Мощность ветрогенератора зависит от скорости ветра так же, как мощность солнечной панели зависит от яркости солнца или мощность гидротурбины зависит от скорости воды [24].

Лучшие горизонтальные ветроустановки могут улавливать до 47 % энергии ветра, а баррельные ветряки — до 25 %. Обычный средний КПД горизонтального ветрогенератора составляет 0,4 и он постоянен, поскольку лопасти имеют фиксированные аэродинамические формы, которые могут работать с максимальной эффективностью только при определенной скорости ветра. То же самое верно и для вертикальных роторов, так как их лопасти также имеют фиксированный размер [25].

Мощность ветрогенератора определяет скорость ветрового потока. Размер винта также определяет площадь ветрового потока, в которой может быть взята энергия [26].

По мере увеличения скорости ветра ветряное колесо начинает вращаться сильнее, поэтому генератор вырабатывает больше энергии для зарядки аккумуляторов и обеспечения полезной нагрузки. В этом случае блок управления выдает сигнал и постепенно увеличивает потребляемую нагревательными элементами мощность, что позволяет полностью

использовать энергию ветра. Если поток ветра уменьшается, скорость ветроколеса также уменьшается, и блок управления снова посылает сигнал, который снижает потребление энергии нагревательными элементами до их остановки. Это означает, что блок управления может поддерживать скорость ветроколеса и нагрузку генератора для заданной скорости ветра.

При больших скоростях ветра велик риск выхода из строя редуктора и генератора, поэтому необходима система автоматического торможения.

В прибрежных районах Дальнего Востока среднегодовая скорость ветра составляет 8 м/с. А средний показатель для Дании — мирового лидера в области электроэнергетики — составляет 5 м/с [27].

Во время работы ветрогенератора производится ток, так как его напряжение напрямую зависит от скорости ветра, он нестабилен. Именно поэтому одним из основных элементов комплектации альтернативной электроустановки является контроллер заряда аккумуляторов.

Для того, чтобы рассчитать, как быстро должен заряжаться аккумулятор при суточном потреблении

$$E_{\text{сут}} = 26,25 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (6)$$

нужно найти среднее ежечасное потребление:

$$E_{\text{ч}} = \frac{E_{\text{сут}}}{24}, \quad (7)$$

$$E_{\text{ч}} = \frac{26,25}{24} = 1,09 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (8)$$

В этом случае скорость заряда аккумулятора должна составлять 1,09 кВт/ч. В будние дни в дневное время энергопотребление будет минимальным, точно так же, как и в ночное время. Соответственно, основное потребление будет происходить утром и вечером.

Кинетическая энергия воздуха, движущегося ламинарно (без завихрений), определяется по формуле [28]:

$$W = \frac{m \cdot V^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (9)$$

где m — масса воздуха, кг;

V — скорость воздуха, м/с.

Массу воздуха можно выразить следующей формулой:

$$m = V \cdot t \cdot S \cdot \rho, \text{ кг}, \quad (10)$$

где S — площадь, описываемая винтом ветрогенератора;

ρ — плотность воздуха.

Мощность P определяется по формуле:

$$P = \frac{V^3 \cdot S \cdot \rho}{2}, \text{ Вт}. \quad (11)$$

Когда умножим выражение на коэффициент преобразования энергии ветра (ζ), можно получить реальную мощность ветрогенератора [29]:

$$P = \frac{V^3 \cdot S \cdot \rho \cdot \zeta}{2}, \text{ Вт}. \quad (12)$$

Мощность ветродвигателя пропорциональна третьей степени скорости ветра [30].

В ходе лабораторных исследований при плавном увеличении частоты вращения вентилятора от 15 до 50 Гц с определенным шагом измерялись значения мощности.

Следующий опыт: исследование вольтамперной характеристики ветрогенератора в зависимости от вида нагрузки.

Вольтамперная характеристика ветрогенератора зависит от вида нагрузки. При активной нагрузке ($\cos \varphi = 1,0$) напряжение на генераторе падает при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной в диапазоне от 10 % до 20 % напряжения холостого хода генератора. Когда нагрузка генератора изменяется от холостого хода до номинальной нагрузки, напряжение падает на 20–30 % от напряжения холостого хода. При активной емкостной нагрузке ($\cos \varphi = 0,8$) напряжение на генераторе несколько увеличивается за счет намагничивающего действия реакции якоря.

Выводы

1. В настоящее время во всем мире наблюдается переход энергетики к использованию возобновляемых источников, таких как энергия солнца, ветра, приливов и отливов, морских волн и других. Так, мощности крупнейших ветровых электростанций достигают 8 ГВт, а крупнейших солнечных электростанций — 1,5 ГВт. В Республике Башкортостан в настоящее время введены в строй три солнечные электростанции (мощностью до 20 МВт), ведется строительство еще нескольких.

2. В связи с этим ведущие вузы начали подготовку бакалавров и магистров по программам, связанным с проектированием, монтажом, эксплуатацией и обслуживанием ветровых и солнечных электростанций. Так, в Уфимском госу-

дарственном нефтяном техническом университете начата подготовка магистров по программе «Альтернативные и возобновляемые источники и накопители энергии».

3. С целью повышения качества подготовки магистров по программе «Альтернативные и возобновляемые источники и накопители энергии», а также для проведения научных экспериментов аспирантами был смонтирован лабораторный комплекс для исследования ветро-солнечных энергетических установок.

4. В математическом пакете Matlab Simulink были сгенерированы компьютерные модели всех основных элементов лабораторного комплекса: ветрогенератора, фотоэлектрического преобразователя, аккумуляторных батарей.

Список литературы

1. Almoghayer M.A., Woolf D.K., Davies G. Integration of Tidal Energy into an Island Energy System — A Case Study of Orkney Islands // 7th PRIMaRE Conference, Plymouth. 2020. P. 122547.
2. Amjith L., Bavanish B. A Review on Biomass and Wind as Renewable Energy for Sustainable Environment // Chemosphere. 2022. Vol. 293. P. 133579.
3. Fouz D.M., Carballo R., Lopez I., Igleasias G. Tidal Stream Energy Potential in the Shannon Estuary // Renewable Energy. 2022. Vol. 185. P. 61-74.
4. Richardson R.L., Buckham B., McWhinnie L.H. Mapping a Blue Energy Future for British Columbia: Creating a Holistic Framework for Tidal Stream Energy Development in Remote Coastal Communities // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 157. P. 112032.
5. Rocha J., Abreu T., Felgueiras C. Evaluation of Potential Tidal Impoundment Energy Systems in Ria de Aveiro, Portugal // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 226-230.
6. Baek H., Chung J. B., Yun G. W. Differences in Public Perceptions of Geothermal Energy Based on EGS Technology in Korea

after the Pohang Earthquake: National vs. Local // Technological Forecasting and Social Change. 2021. Vol. 172. P. 121027.

7. Du X. Dielectric Elastomer Wave Energy Harvester with Self-Bias Voltage of an Ancillary Wind Generator to Power for Intelligent Buoys // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 253. P. 115178.

8. Corrêa K.C., Uriona-Maldonado M., Vaz C.R. The Evolution, Consolidation and Future Challenges of Wind Energy in Uruguay // Energy Policy. 2022. Vol. 161. P. 112758.

9. Gamel J., Bauer A., Decker T., Menrad K. Financing Wind Energy Projects: An Extended Theory of Planned Behavior Approach to Explain Private Households' Wind Energy Investment Intentions in Germany // Renewable Energy. 2022. Vol. 182. P. 592-601.

10. Lebbihiat N., Atia A., Arici M., Noureddine M. Geothermal Energy Use in Algeria: A Review on the Current Status Compared to the Worldwide, Utilization Opportunities and Countermeasures // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 302. P. 126950.

11. Gormo V.G. Wind Power as an Alternative to Sustain the Energy Needs in Garoua and Guider, North Region of Cameroon // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 814-829.

12. Novikau A. Current Challenges and Prospects of Wind Energy in Belarus // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 182. P. 1049-1059.
13. Cousse J., Trutnevyte E., Hahnel U.J. Tell Me how You Feel about Geothermal Energy: Affect as a Revealing Factor of the Role of Seismic Risk on Public Acceptance // *Energy Policy*. 2021. Vol. 158. P. 112547.
14. Kan A., Zeng. Y., Meng X., Wang D. The Linkage between Renewable Energy Potential and Sustainable Development: Understanding Solar Energy Variability and Photovoltaic Power Potential in Tibet, China // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 48. P. 101551.
15. Dezfouli M.M.S., Sopian K., Kadir K. Energy and Performance Analysis of Solar Solid Desiccant Cooling Systems for Energy Efficient Buildings in Tropical Regions // *Energy Conversion and Management*: X. 2022. P. 100186.
16. Montoya-Duque L., Arango-Aramburo S., Arias-Gaviria J. Simulating the Effect of the Pay-as-You-Go Scheme for Solar Energy Diffusion in Colombian Off-Grid Regions // *Energy*. 2022. Vol. 244. P. 123197.
17. Lan H., Gou Z., Xie X. A Simplified Evaluation Method of Rooftop Solar Energy Potential Based on Image Semantic Segmentation of Urban Streetscapes // *Solar Energy*. 2021. Vol. 230. P. 912-924.
18. Li X., Gao Q., Cao Y., Yang Y. Optimization Strategy of Wind Energy Harvesting via Triboelectric-Electromagnetic Flexible Cooperation // *Applied Energy*. 2022. Vol. 307. P. 118311.
19. Zhang W., Li Z., Zhang C., Lin Y., Zhu H., Meng Z., Wu D. Improvement of the Efficiency of Volumetric Solar Steam Generation by Enhanced Solar Harvesting and Energy Management // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 183. P. 820-829.
20. Reyes A. Sawdust Drying in a Series of Rectangular Base Spouted Beds Using Solar Energy // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 48. P. 103881.
21. Yasmeen R., Yao X., Padda I., Shah W. Exploring the Role of Solar Energy and Foreign Direct Investment for Clean Environment: Evidence from Top 10 Solar Energy Consuming Countries // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 185. P. 147-158.
22. Tong G., Chen Q., Xu H. Passive Solar Energy Utilization: A Review of Envelope Material Selection for Chinese Solar Greenhouses // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 50. P. 101833.
23. Rowińska P.A., Veraart A.E.D., Gruet P. A Multi-Factor Approach to Modelling the Impact of Wind Energy On Electricity Spot Prices // *Energy Economics*. 2021. Vol. 104. P. 105640.
24. Rajabi M.M., Chen M., Bozorgpour A., Izady A. Stochastic Techno-economic Analysis of CO₂-Circulated Geothermal Energy Production in a Closed Reservoir System // *Geothermics*. 2021. Vol. 96. P. 102202.
25. Pan J. Improve Efficiency of Harvesting Wind Energy by Integrating bi-Stability and Swinging Balls // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 170. P. 108816.
26. Shahzad U., Schneider N., Jebli M. How Coal and Geothermal Energies Interact with Industrial Development and Carbon Emissions? An Autoregressive Distributed Lags Approach to the Philippines // *Resources Policy*. 2021. Vol. 74. P. 102342.
27. Yu J., Tang Y.M., Chau K.Y., Nazar R. Role of Solar-Based Renewable Energy in Mitigating CO₂ Emissions: Evidence from Quantile-On-Quantile Estimation // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 182. P. 216-226.
28. Zhang Y., Wang W., Wang Z., Gao M. Green Building Design Based on Solar Energy Utilization: Take a Kindergarten Competition Design as an Example // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 1297-1307.
29. Solman H., Kirkegaard J.K., Smits M., Wlient B.J.M.V. Digital Twinning as an Act of Governance in the Wind Energy Sector // *Environmental Science & Policy*. 2022. Vol. 127. P. 272-279.
30. Shetty C., Priyam A. A Review on Tidal Energy Technologies // *Materials Today: Proceedings*. 2021.

References

1. Almoghayer M.A., Woolf D.K., Davies G. Integration of Tidal Energy into an Island Energy System — A Case Study of Orkney Islands. *7th PRIMaRE Conference, Plymouth, 2020*, pp. 122547.
2. Amjith L., Bavanish B. A Review on Biomass and Wind as Renewable Energy for

Sustainable Environment. *Chemosphere*, 2022, Vol. 293, pp. 133579.

3. Fouz D.M., Carballo R., Lopez I., Igleasias G. Tidal Stream Energy Potential in the Shannon Estuary. *Renewable Energy*, 2022, Vol. 185, pp. 61-74.

4. Richardson R.L., Buckham B., McWhinnie L.H. Mapping a Blue Energy Future for British Columbia: Creating a Holistic Framework for Tidal Stream Energy Development in Remote Coastal Communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, Vol. 157, pp. 112032.

5. Rocha J., Abreu T., Felgueiras C. Evaluation of Potential Tidal Impoundment Energy Systems in Ria de Aveiro, Portugal. *Energy Reports*, 2020, Vol. 6, pp. 226-230.

6. Baek H., Chung J. B., Yun G. W. Differences in Public Perceptions of Geothermal Energy Based on EGS Technology in Korea after the Pohang Earthquake: National vs. Local. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, Vol. 172, pp. 121027.

7. Du X. Dielectric Elastomer Wave Energy Harvester with Self-Bias Voltage of an Ancillary Wind Generator to Power for Intelligent Buoys. *Energy Conversion and Management*, 2022, Vol. 253, pp. 115178.

8. Corrêa K.C., Uriona-Maldonado M., Vaz C.R. The Evolution, Consolidation and Future Challenges of Wind Energy in Uruguay. *Energy Policy*, 2022, Vol. 161, pp. 112758.

9. Gamel J., Bauer A., Decker T., Menrad K. Financing Wind Energy Projects: An Extended Theory of Planned Behavior Approach to Explain Private Households' Wind Energy Investment Intentions in Germany. *Renewable Energy*, 2022, Vol. 182, pp. 592-601.

10. Lebbihiat N., Atia A., Arici M., Noureddine M. Geothermal Energy Use in Algeria: A Review on the Current Status Compared to the Worldwide, Utilization Opportunities and Countermeasures. *Journal of Cleaner Production*, 2021, Vol. 302, pp. 126950.

11. Gormo V.G. Wind Power as an Alternative to Sustain the Energy Needs in Garoua and Guider, North Region of Cameroon. *Energy Reports*, 2021, Vol. 7, pp. 814-829.

12. Novikau A. Current Challenges and Prospects of Wind Energy in Belarus. *Renewable Energy*, 2022, Vol. 182, pp. 1049-1059.

13. Cousse J., Trutnevyte E., Hahnel U.J. Tell Me how You Feel about Geothermal Energy: Affect as a Revealing Factor of the Role of Seismic Risk on Public Acceptance. *Energy Policy*, 2021, Vol. 158, pp. 112547.

14. Kan A., Zeng. Y., Meng X., Wang D. The Linkage between Renewable Energy Potential and Sustainable Development: Understanding Solar Energy Variability and Photovoltaic Power Potential in Tibet, China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, Vol. 48, pp. 101551.

15. Dezfouli M.M.S., Sopian K., Kadir K. Energy and Performance Analysis of Solar Solid Desiccant Cooling Systems for Energy Efficient Buildings in Tropical Regions. *Energy Conversion and Management: X*, 2022, pp. 100186.

16. Montoya-Duque L., Arango-Aramburo S., Arias-Gaviria J. Simulating the Effect of the Pay-as-You-Go Scheme for Solar Energy Diffusion in Colombian Off-Grid Regions. *Energy*, 2022, Vol. 244, pp. 123197.

17. Lan H., Gou Z., Xie X. A Simplified Evaluation Method of Rooftop Solar Energy Potential Based on Image Semantic Segmentation of Urban Streetscapes. *Solar Energy*, 2021, Vol. 230, pp. 912-924.

18. Li X., Gao Q., Cao Y., Yang Y. Optimization Strategy of Wind Energy Harvesting via Triboelectric-Electromagnetic Flexible Cooperation. *Applied Energy*, 2022, Vol. 307, pp. 118311.

19. Zhang W., Li Z., Zhang C., Lin Y., Zhu H., Meng Z., Wu D. Improvement of the Efficiency of Volumetric Solar Steam Generation by Enhanced Solar Harvesting and Energy Management. *Renewable Energy*, 2022, Vol. 183, pp. 820-829.

20. Reyes A. Sawdust Drying in a Series of Rectangular Base Spouted Beds Using Solar Energy. *Journal of Energy Storage*, 2022, Vol. 48, pp. 103881.

21. Yasmeen R., Yao X., Padda I., Shah W. Exploring the Role of Solar Energy and Foreign Direct Investment for Clean Environment: Evidence from Top 10 Solar Energy Consuming Countries. *Renewable Energy*, 2022, Vol. 185, pp. 147-158.

22. Tong G., Chen Q., Xu H. Passive Solar Energy Utilization: A Review of Envelope Material Selection for Chinese Solar Green-

houses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, Vol. 50, pp. 101833.

23. Rowińska P.A., Veraart A.E.D., Gruet P. A Multi-Factor Approach to Modelling the Impact of Wind Energy On Electricity Spot Prices. *Energy Economics*, 2021, Vol. 104, pp. 105640.

24. Rajabi M.M., Chen M., Bozorgpour A., Izady A. Stochastic Techno-Economic Analysis of CO₂-Circulated Geothermal Energy Production in a Closed Reservoir System. *Geothermics*, 2021, Vol. 96, pp. 102202.

25. Pan J. Improve Efficiency of Harvesting Wind Energy by Integrating bi-Stability and Swinging Balls. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, Vol. 170, pp. 108816.

26. Shahzad U., Schneider N., Jebli M. How Coal and Geothermal Energies Interact with Industrial Development and Carbon Emissions? An Autoregressive Distributed Lags Approach

to the Philippines. *Resources Policy*, 2021, Vol. 74, pp. 102342.

27. Yu J., Tang Y.M., Chau K.Y., Nazar R. Role of Solar-Based Renewable Energy in Mitigating CO₂ Emissions: Evidence from Quantile-On-Quantile Estimation. *Renewable Energy*, 2022, Vol. 182, pp. 216-226.

28. Zhang Y., Wang W., Wang Z., Gao M. Green Building Design Based on Solar Energy Utilization: Take a Kindergarten Competition Design as an Example. *Energy Reports*, 2021, Vol. 7, pp. 1297-1307.

29. Solman H., Kirkegaard J.K., Smits M., Wliet B.J.M.V. Digital Twinning as an Act of Governance in the Wind Energy Sector. *Environmental Science & Policy*, 2022, Vol. 127, pp. 272-279.

30. Shetty C., Priyam A. A Review on Tidal Energy Technologies. *Materials Today: Proceedings*. 2021.



Александр Сергеевич Беляев
Aleksandr S. Belyaev

*аспирант Отделения автоматизации и робототехники,
Томский политехнический университет,
Томск, Россия*



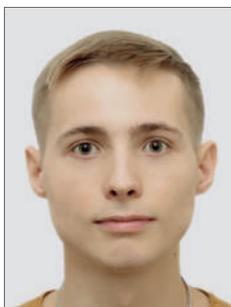
Александр Александрович Филипас
Aleksandr A. Filipas

*кандидат технических наук, доцент,
заведующий Отделением автоматизации
и робототехники,
Томский политехнический университет,
Томск, Россия*



Василий Васильевич Курганов
Vasiliy V. Kurganov

*кандидат технических наук,
доцент Отделения автоматизации и робототехники,
Томский политехнический университет,
Томск, Россия*



Никита Иванович Поберезкин
Nikita I. Poberezkin

*магистрант Отделения автоматизации и робототехники,
Томский политехнический университет,
Томск, Россия*

УДК 681.5.017, 531.133.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-98-106

ЧЕТЫРЕХТРОСОВАЯ СИСТЕМА ОБЕЗВЕШИВАНИЯ С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ВЕКТОРУ СИЛЫ

Актуальность

Системы обезвешивания имеют широкое применение от крановых систем на предприятиях до реабилитации пациентов или компенсации веса трансформируемых элементов космических аппаратов при их наземных испытаниях. При разработке таких систем предъявляются существенные требования не только к их точностным характеристикам, но и ограничениям на ускорения и точность компенсации веса. Одним из наиболее перспективных видов подобных систем являются четырехтросовые активные системы, которые компенсируют вес и перемещают груз в пространстве за счет сил натяжения тросов.

Цель исследования

Исследовать динамику работы системы четырехтросового обезвешивания и разработать структуру системы управления, направленную на создания заданного вектора силы.

Методы исследования

Произведен синтез математической модели на основе уравнения Ньютона. Для решения прямой и обратной задач кинематики использованы методы линейной алгебры, в том числе псевдообратные матрицы. Использовано имитационное моделирование в среде MatLab Simulink.

Результаты

Получена система дифференциальных уравнений, описывающих работу системы четырехтросового обезвешивания. На ее основе разработана имитационная модель системы, и реализован алгоритм управления ею по вектору силы. Проведено моделирование работы системы на примере обезвешивания груза массой 5 кг. Динамическая точность обезвешивания составила 5,5 %, а статическая точность 1,5 %.

Ключевые слова: система обезвешивания, система управления, вектор силы, трос, моделирование

FOUR-ROPE SUSPENSION SYSTEM WITH FORCE VECTOR CONTROL

Relevance

Weightless systems are widely used from crane systems at enterprises, to the rehabilitation of patients or compensation for the weight of transformable elements of spacecraft during their ground tests. When developing such systems, significant not only their accuracy characteristics are imposed, but also restrictions on acceleration and accuracy of weight compensation. One of the most promising types of such systems are four-cable active systems that compensate for weight and move the load in space due to the tension forces of the cables.

Aim of research

The main aim investigate the dynamics of the 4-rope weightless system and develop the structure of the control system aimed at creating a given force vector.

Research methods

A synthesis of a mathematical model based on Newton's equation has been made. To solve the direct and inverse problems of kinematics, methods of linear algebra, including pseudoinverse matrices, were used. Simulation modeling in the MatLab Simulink environment was used.

Results

A system of differential equations is obtained that describes the operation of a four-rope weightless system. On its basis, a simulation model of the system was developed and an algorithm for controlling it along the force vector was implemented. The simulation of the system operation was carried out on the example of weighing a load weighing 5 kg. The dynamic accuracy of weightlessness was 5.5%, and the static accuracy was 1.5%.

Keywords: weightless system, control system, force vector, cable, modeling

Введение

Системы обезвешивания (СО) имеют широкое применение, начиная от крановых систем, 3D печати, наземных испытаний космических аппаратов до реабилитации пациентов с проблемами опорно-двигательного аппарата. Наиболее рас-

пространенными являются именно тросовые системы обезвешивания, поскольку они являются самыми простыми и легко настраиваемыми. Один из вариантов подобных систем функционирует за счет кареток, передвигающихся по специально закрепленным к потолку

или стенам помещения рельсам. Через систему к обезвешиваемому элементу (ОЭ) через тросы присоединяют груз, равный по массе ОЭ, в результате создается эффект противовеса, за счет которого происходит компенсация веса ОЭ [1], такие системы, получившие название пассивные, распространены еще и в медицине [2–4]. Данный принцип наиболее прост в исполнении, однако является абсолютно не подстраиваемым, что сказывается на времени настройки и отсутствии универсальности. Поэтому наиболее передовыми на сегодняшний момент являются активные системы обезвешивания, которые за счет управляемых электроприводов и датчиков подстраиваются под вес объекта и самостоятельно перемещаются в пространстве. Однако при переходе от пассивных тросовых систем к активным выяснилось, что за счет приводов, обеспечивающих движение, и привода, создающего силу обезвешивания, вес системы обезвешивания значительно вырос и стал больше веса ОЭ [5–7]. Перемещение настолько тяжелой системы значительно усложнило процесс настройки и синтез системы управления (СУ).

Альтернативным методом обезвешивания является использование СО, построенной на принципе обезвешивания со статически закреплёнными лебедками (с неподвижными лебедками в процессе раскрытия), создающими силы натяжения тросов таким образом, чтобы создать вектор тяги, противодействующий весу обезвешиваемого элемента. Такие системы получили широкое применение в медицине [8–12] и смогли решить проблемы систем кареточного типа. Подобные системы имеют 4 и более тросов, присоединенных к лебедкам, приводящимся в движение при помощи электродвигателей. Данные электродвигатели создают момент, который натягивает тросы и тем самым создают силы обезвешивания. При использовании минимум 4

тросов область работы таких систем является параллелепипед и позволяет не только осуществлять обезвешивание пациента, но и перемещать его в пространстве. По сравнению с кареточными СО данные системы производят обезвешивания за счет сил натяжения тросов. Таким образом, сводятся к минимуму перемещаемые массы, инерция, но при этом остается большая рабочая зона. Исследования работы данного устройства показали, что точная регулировка вертикальных и горизонтальных сил позволяет повторить физиологическую особенность походки. Однако несмотря на то, что свобода передвижения ОЭ была значительно увеличена, мощность электродвигателей также возросла, что требует обеспечения мер безопасности. Те же двигатели, которые должны обеспечивать большие разгрузочные усилия в вертикальном направлении, также должны обеспечивать высокие скорости в горизонтальном направлении. Следовательно, приводы должны быть способны генерировать высокие крутящие моменты, а также скорости. Данные недостатки были устранены в системе, состоящей из пассивных механических элементов и специфичных соединений тросов [11]. Исполнительные механизмы нужны только для обеспечения вертикального перемещения и небольших горизонтальных усилий в целях компенсации трения. Однако в большинстве данных систем задача позиционирования ОЭ решается как задача слежения за положением объекта по показаниям датчика. Это приводит к значительному усложнению системы управления за счет использования многоконтурной системы с вложенными контурами, что приводит к уменьшению быстродействия системы. Кроме того, во многих задачах необходимым условием является отработка рывка и заданного ускорения движения объекта, что сложно реализуемо в такого рода системах управления.

Решением данной проблемы может стать прямое управление моментами исполнительных механизмов путем их расчета, исходя из заданного вектора сил [13]. Данный принцип формирует рабочий объем, в котором возможно движение точки подвеса по произвольной траектории. Причем, исходя из требований, исходящих от объекта обезвешивания, данное движение возможно с ограничениями по рывку, ускорению, скорости и положению в поверхности или в слое. Данный принцип управления может позволить получить более высокие точностные характеристики и проще решить траекторию задачу с ограничениями в старших производных.

Структура системы обезвешивания

В качестве структуры системы обезвешивания была выбрана типовая четырехтросовая система с электролебедками, приведенная на рисунке 1, а, которая была реализована в виде натурального стенда в Томском политехническом университете 1, б.

Каждый блок электролебедки состоит из следующих основных элементов: электропривода постоянного тока, оптического энкодера; редуктора; узкого барабана, моделирующего растяжение троса,

ввиду использования стального троса с малым коэффициентом растяжения. Управление электролебедкой осуществляется микроконтроллером через силовые драйверы. Микроконтроллер обрабатывает информацию с датчиков тока электролебедок и данные с энкодера. Задание управляющей траекторией осуществляется с персонального компьютера, подключенного к микроконтроллеру.

Система векторного управления

При разработке системы обезвешивания возможны случаи, когда координаты лебедок будут независимыми друг от друга, что существенно усложняет рассматриваемую задачу по сути. Для описания системы в общем виде пусть система состоит из 4-х лебедок с тросами, закрепленными в точках $A_i = \{x_i, y_i, z_i\}$, создающими силу F_i и имеющими длину троса l_i , где i – номер лебедки, а обезвешиваемый груз массой m имеет координаты $\{x, y, z\}$.

Исходя из предлагаемой концепции управления, необходимо определить математические зависимости между моментами электролебедок и вектором движения тела с учетом силы обезвешивания. Поскольку на ОЭ действуют 5 основных сил: силы натяжения троса и

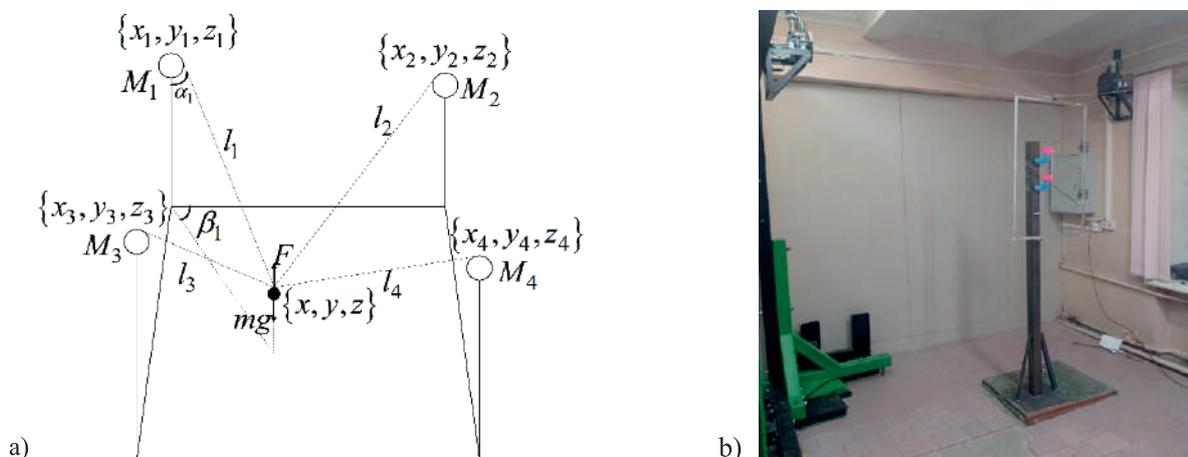


Рисунок 1. Кинематическая система обезвешивания: схема (а), внешний вид разработанного стенда (б)

Figure 1. Kinematic weightless system: scheme (a), appearance of the developed stand (b)

вес элемента, то по закону Ньютона получено основное уравнение динамики, характеризующее движение элемента в пространстве:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 - \vec{F}_T = m\vec{a}.$$

Расписав данные силы на проекции действия сил по основным осям координат, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} = ma_x \\ F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} = ma_y \\ F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z} = m(a_z + g) \end{cases}. \quad (1)$$

Представив данное уравнение в матричном виде и используя преобразование проекции сил, через координаты объекта и длины троса получена матрица прямой динамики системы:

$$\begin{aligned} A \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} &= m \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ g + a_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \\ &= A^{-1} \cdot m \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ g + a_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

$$A^{-1} = \frac{1}{(4 \cdot (l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + l_4^2))}.$$

$$\begin{bmatrix} -(l_1 \cdot (l_2^2 + l_4^2)) & -(l_1 \cdot (l_3^2 + l_4^2)) & \frac{(l_1 \cdot (l_2^2 x + l_4^2 x + l_3^2 y + l_4^2 y - 4l_2^2 - 4l_3^2 - 4l_4^2))}{z - 2} \\ -(l_2 \cdot (l_1^2 + l_3^2)) & (l_2 \cdot (l_3^2 + l_4^2)) & \frac{-(l_2 \cdot (l_3^2 y - l_3^2 x - l_1^2 x + l_4^2 y + 4l_1^2))}{z - 2} \\ (l_3 \cdot (l_2^2 + l_4^2)) & -(l_3 \cdot (l_1^2 + l_2^2)) & \frac{-(l_3 \cdot (l_2^2 x + l_4^2 x - l_1^2 y - l_2^2 y + 4l_1^2))}{z - 2} \\ (l_4 \cdot (l_1^2 + l_3^2)) & (l_4 \cdot (l_1^2 + l_2^2)) & \frac{-(l_4 \cdot (l_1^2 x + l_3^2 x + l_1^2 y + l_2^2 y - 4l_1^2))}{z - 2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x}{l_1} & \frac{x_2 - x}{l_2} & \frac{x_3 - x}{l_3} & \frac{x_4 - x}{l_4} \\ \frac{y_1 - y}{l_1} & \frac{y_2 - y}{l_2} & \frac{y_3 - y}{l_3} & \frac{y_4 - y}{l_4} \\ \frac{z_1 - z}{l_1} & \frac{z_2 - z}{l_2} & \frac{z_3 - z}{l_3} & \frac{z_4 - z}{l_4} \end{bmatrix}.$$

Определение матрицы обратной динамики возможно через вычисление обратной матрицы A . Однако поскольку система является избыточной по управлению, то необходимо произвести предварительное разложение и решение с меньшим количеством векторов.

Одним из способов решения задачи является использование псевдообратной матрицы A^+ по следующей формуле ввиду того, что строки матрицы A являются линейно независимыми:

$$A^{-1} = A^+ = A^T \cdot (A \cdot A^T)^{-1}.$$

Значения данной обратной матрицы в общем виде представить в статье не представляется возможным ввиду их громоздкости, поэтому в дальнейшем будет приведен только частный вариант, с заданными координатами лебедек. Это позволит показать решение на примере частного вида, когда лебедки находятся в вершинах параллелепипеда высотой 2 м, шириной и длиной 4 м. При таких условиях обратная матрица примет вид:

Еще одной необходимой задачей является определение координат ОЭ в пространстве по длинам тросов. Одним из вариантов ее решения является использование уравнений сфер с центрами в координатах лебедок и радиусами, равными длинам тросов, в таком случае точка пересечения сфер является точкой ОЭ. В итоге обратная кинематическая задача для частного случая примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} x &= \frac{l_2^2 - l_3^2}{8} + 2 \\ y &= \frac{-l_3^2 + l_4^2}{8} + 2 \\ z &= 2 - \frac{\sqrt{2l_2^2 l_3^2 - l_2^4 + 32l_2^2 - 2l_3^2 + 2l_4^2 l_3^2 - l_4^4 + 32l_4^2 - 512}}{8} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Момент электродвигателя, исходя из баланса мощностей, можно представить в следующем виде:

$$M_i = F_{iz} \cdot r + J \cdot \dot{\omega}_i + M_{nom}; \quad (4)$$

$$J = \frac{1}{2} Mr^2,$$

где r — радиус барабана лебедки, м;

M — масса барабана электролебедки, кг;

J — момент инерции, кг·м².

Созданием момента на тросах осуществляется двигателями постоянного тока, основные уравнения которых:

$$\left\{ \begin{aligned} U_j &= \omega_j \cdot \frac{Ce}{k_{red}} + i_j \cdot r + L \cdot \frac{di_j}{dt} \rightarrow \\ M_j &= i_j \cdot k \cdot k_{red} \end{aligned} \right. \rightarrow \left\{ \begin{aligned} \frac{di_j}{dt} &= \frac{U_j}{L} - \frac{\omega_j \cdot Ce}{L \cdot k_{red}} - i_j \cdot \frac{r}{L} \\ M_j &= i_j \cdot k \cdot k_{red} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где U_j — напряжение j -го двигателя, В;

ω_j — скорость вращения j -го двигателя, об/мин;

k_{red} — передаточное число редуктора;

k — конструктивный коэффициент двигателя, $\frac{H \cdot м}{А}$;

Ce — электрическая постоянная двигателя, $\frac{В}{об/мин}$;

i_j — ток j -го двигателя, А;

γ — сопротивление двигателя, Ом;

L — индуктивность обмотки двигателя, Гц;

R — радиус колеса мобильной платформы, м;

M_j — момент j -го двигателя, $H \cdot м$.

На основе уравнений (1)–(5) получаем систему уравнений, описывающую работу четырехтросовой системы обезвешивания.

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{m} \left(M_1 \cdot \frac{-x}{l_1} + M_2 \cdot \frac{-x}{l_2} + M_3 \cdot \frac{4-x}{l_3} + M_4 \cdot \frac{4-x}{l_4} \right) \\ \ddot{y} &= \frac{1}{m} \left(M_1 \cdot \frac{-y}{l_1} + M_2 \cdot \frac{4-y}{l_2} + M_3 \cdot \frac{-y}{l_3} + M_4 \cdot \frac{4-y}{l_4} \right) \\ \ddot{z} &= \frac{1}{m} \left(M_1 \cdot \frac{2-z}{l_1} + M_2 \cdot \frac{2-z}{l_2} + M_3 \cdot \frac{2-z}{l_3} + M_4 \cdot \frac{2-z}{l_4} \right) - g \\ \ddot{\phi}_i &= \left(\frac{M_i (l_i - (2-z) - 0.05l_i)}{J} \right) \\ \dot{l}_i &= \frac{2\pi r}{360} \cdot \dot{\phi}_i + \frac{M_i \cdot l_i}{r \cdot E \cdot S} \\ M_j &= i_j \cdot k \cdot k_{red} \\ \frac{di_j}{dt} &= \frac{U_j}{L} - \frac{\omega_j \cdot Ce}{L \cdot k_{red}} - i_j \cdot \frac{r}{L} \\ x &= \frac{l_2^2 - l_3^2}{8} + 2 \\ y &= \frac{-l_3^2 + l_4^2}{8} + 2 \\ z &= 2 - \frac{\sqrt{2l_2^2 l_3^2 - l_2^4 + 32l_2^2 - 2l_3^2 + 2l_4^2 l_3^2 - l_4^4 + 32l_4^2 - 512}}{8} \\ &\quad \frac{+ 2l_4^2 l_3^2 - l_4^4 + 32l_4^2 - 512}{8} \end{aligned} \right.$$

Данная система уравнений описывает основные блоки структурной схемы системы (рисунок 2), реализующей предложенный принцип управления.

Поскольку система является много-связной, её моделирование в общем виде не представляется возможным, поэтому моделирование системы проведено на численном примере на созданной имитационной модели в *MatLab Simulink*. Основными задачами в ходе моделирования являлись компенсация веса ОЭ и поддержание его на заданной высоте. Для этого в начальный момент времени ОЭ находится на высоте подвеса 1 м относительно уровня лебедок, а система четырехтросового обезвешивания должна скомпенсировать его вес и поднять ОЭ на

высоту 0,7 м. На 5-ой секунде на систему подается возмущающее воздействие. Основные параметры моделирования приведены в таблице 1.

По результатам моделирования было установлено, что время переходного процесса системы составляет порядка 2 с, а максимальная динамическая ошибка составляет порядка 5,5 %, максимальная статическая ошибка составляет 1,5 %, что является допустимым значением. Полученные прямые показатели качества работы автоматической системы позволяют говорить о работоспособности системы обезвешивания. Кроме того, показатели работы системы превышают [8] в динамике на 1,5 %.

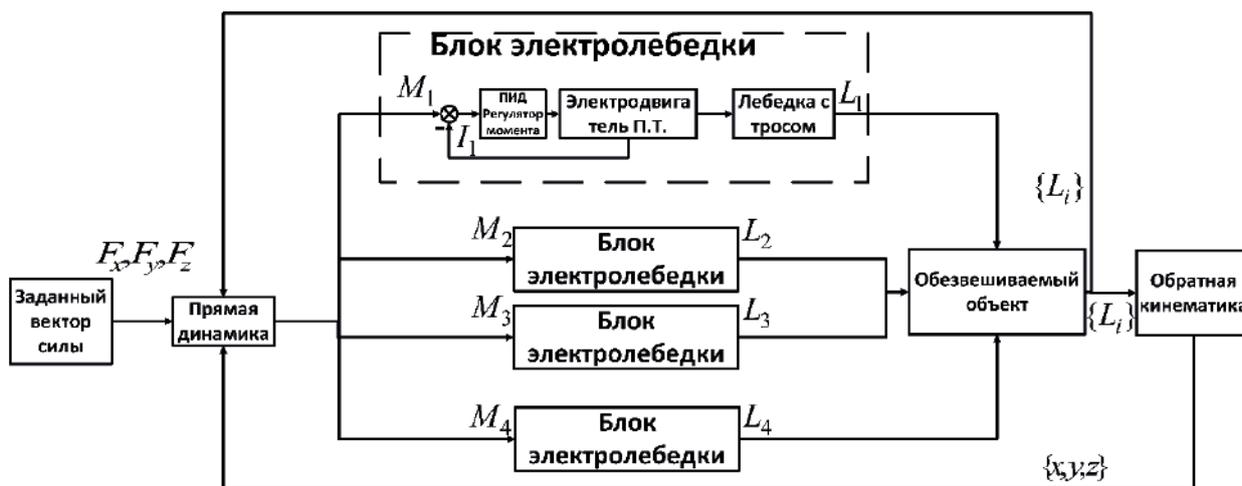


Рисунок 2. Структурная схема системы управления

Figure 2. Structural diagram of the control system

Таблица 1. Параметры моделирования

Table 1. Simulation options

Параметр	Величина	Параметр	Величина
m	5 кг	$r_{об}$	0,214 Ом
g	9,8 м/с ²	L	0,000015 Гн
k	$4,3 \frac{Н \cdot м}{А}$	k_{red}	64
M	1 кг	R	0,2 м
S	4 мм	Ce	$0,0075 \frac{В}{об/мин}$
E	200 ГПа	γ	0.2 м

Выводы

В работе представлена концепция управления четырехтросовой системой обезвешивания по заданному вектору силы, которая позволит осуществлять управление с высоким быстродействием с учетом требований по ускорению и рывку. Получена математическая модель системы на базе системы дифференциальных уравнений, с учетом математических моделей двигателей и кинематики системы, которая показывает многосвязность системы. Разработана имитационная модель в среде Matlab Simulink и синтезирована система управления по вектору силы с учетом основных нелинейно-

стей исполнительных элементов, дискретизации датчиков и зон нечувствительности. Промоделирована работа системы на примере задачи обезвешивания груза массой 5 кг. Точность обезвешивания на основе динамической ошибки составила 5,5 %, что является допустимым значением, при этом статическая ошибка составляет 1,5 %. В будущих работах будет поставлена задача уменьшения ошибки обезвешивания и позиционирования на основе синтеза системы управления, исходя из задачи обеспечения движения обезвешиваемого элемента в допустимом «слое».

Список литературы

1. Пат. 2273592С2 РФ, В 64 G 7/00, В 64 G 5/00. Устройство для обезвешивания вертикально перемещающейся мало жесткой механической системы космического аппарата / Н.Н. Иванов, Г.М. Касаткин, А.И. Кирилюк, В.Н. Подзоров, Ю.Н. Сеченов, Телегин В.И. 2004118183/11, Заявлено 10.04.2006. Бюл. 10.
2. Liang J., Hernandez A., Ma O., Qiao B., Paz R. Nonhuman Test of a New Active Body Support System for Improving Locomotion Training // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. (Singapore, July 14-17, 2009). Singapore, 2009.
3. Пат. 5273502А США, А 61 Н 1/022. Therapeutic Unloading Apparatus and Method / D. Kelsey, A. Walls. 71767691А, 28.12.1993.
4. Zhang X., Li W., Li J., Cai X. Research of the BWS System for Lower Extremity Rehabilitation Robot // International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). (QEII Centre, London, UK, July 17-20, 2017). London, 2017.
5. Колесников К.С., Козлов В.И. Динамика разделения ступеней летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1977. 224 с.
6. Пат. RU2376217С1 РФ, В 64 G 7/00, В 64 G 5/00. Устройство для обезвешивания горизонтально перемещающейся многозвенной механической системы космического аппарата / А.Н. Евтеев, Н.Н. Иванов, А.И. Кирилюк, В.Н. Подзоров, Ю.Н. Сеченов,

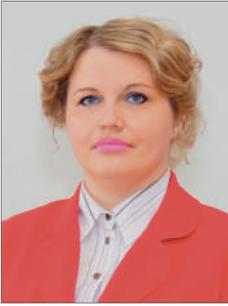
- В.И. Телегин. 2008121460/11, Заявлено 20.12.2009. Бюл. 35.
7. Hidler J., Nichols D., Black L., Brady K. ZeroG: Overground Gait and Balance Training System // The Journal of Rehabilitation Research and Development. 2011. Vol. 48. No.4. P. 287-298.
8. Vallery H., Rauter G., Zitzewitz J., Fritsch M. Multidirectional Transparent Support for Overground Gait Training // IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. (June 24-26, 2013 Seattle, Washington USA). Seattle, 2013.
9. Plooij M., Keller U., Sterke B., Komi S., Vallery H., Zitzewitz J. Design of RYZEN: An Intrinsically Safe and Low-Power Three-Dimensional Overground Body Weight Support // IEEE Robotics and Automation Letters. 2018. Vol. 3. No. 3.
10. Пат. US11246780B2 США. Method and Apparatus for Body Weight Support // J. Behnke, T. Cushman, E. Erturk, K. Glukhovskiy, K.J. Hasseler, K. McBride, M. Olim, P. Payne, K.A. Regas, W.H. Schwiebert, D.S. Weinstein. 9987188B1, 05.06.2018.
11. Surdilovic D., Bernhardt R. STRING-MAN: A New Wire Robot for Gait Rehabilitation // IEEE International Conference on Robotics & Automation. (New Orleans, LA, April, 2004). LA, 2004.
12. Пат. 20170027803А1 США, А61Н3/008. Human Movement Research, Therapeutic, and Diagnostic Devices, Methods,

and Systems / Sunil K. Agrawal, Vineet Vashista, Jiyeon Kang, Xin Jin. US201461982256P, 02.02.2017.

13. Карманова А.В., Филипас А.А. Исследование модели трехточечного крана гибкой подвески // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: матер. конф. в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, Северск, 21–25.05.2016. С. 68-68а.

References

1. Ivanov N.N., Kasatkin G.M., Kirilyuk A.I., Podzorov V.N., Sechenov Yu.N., Telegin V.I. *Ustroistvo dlya obezveshivaniya vertikal'no peremeshchayushcheysya malozhestkoi mekha-nicheskoi sistemy kosmicheskogo apparata* [A Device for Weighing down a Vertically Moving Low-Rigid Mechanical System of a Spacecraft]. Patent RF, No. 2273592S2, 2006. [in Russian].
2. Liang J., Hernandez A., Ma O., Qiao B., Paz R. Nonhuman Test of a New Active Body Support System for Improving Locomotion Training. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. (Singapore, July 14-17, 2009)*. Singapore, 2009.
3. Kelsey D., Walls A. *Therapeutic Unloading Apparatus and Method*. Patent USA, No. 5273502A USA, 993.
4. Zhang X., Li W., Li J., Cai X. Research of the BWS System for Lower Extremity Rehabilitation Robot. *International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). (QEII Centre, London, UK, July 17-20, 2017)*. London, 2017.
5. Kolesnikov K.S., Kozlov V.I. *Dinamika razdeleniya stupenei letatel'nykh apparatov* [Dynamics of Aircraft Stages Separation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 224 p. [in Russian].
6. Evteev A.N., Ivanov N.N., Kirilyuk A.I., Podzorov V.N., Sechenov Yu.N., Telegin V.I. *Ustroistvo dlya obezveshivaniya gorizontally peremeshchayushcheysya mnogozvennoi mekhanicheskoi sistemy kosmicheskogo apparata* [A Device for Weighing down a Horizontally Moving Multi-Link Mechanical System of a Spacecraft]. Patent RF, No. RU2376217C1, 2009. [in Russian].
7. Hidler J., Nichols D., Black L., Brady K. ZeroG: Overground Gait and Balance Training System. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2011, Vol. 48, No. 4, pp. 287-298.
8. Vallery H., Rauter G., Zitzewitz J., Fritschi M. Multidirectional Transparent Support for Overground Gait Training. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. (June 24-26, 2013 Seattle, Washington USA)*. Seattle, 2013.
9. Plooij M., Keller U., Sterke B., Komi S., Vallery H., Zitzewitz J. Design of RYZEN: An Intrinsically Safe and Low-Power Three-Dimensional Overground Body Weight Support. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, Vol. 3, No. 3.
10. Behnke J., Cushman T., Erturk E., Glukhovskiy K., Hasseler K.J., McBride K., Olim M., Payne P., Regas K.A., Schwiebert W.H., Weinstein D.S. *Method and Apparatus for Body Weight Support*. Patent USA, No. US11246780B2, 2018.
11. Surdilovic D., Bernhardt R. STRING-MAN: A New Wire Robot for Gait Rehabilitation. *IEEE International Conference on Robotics & Automation (New Orleans, LA, April, 2004)*. LA, 2004.
12. Sunil K. Agrawal, Vineet Vashista, Jiyeon Kang, Xin Jin. *Human Movement Research, Therapeutic, and Diagnostic Devices, Methods, and Systems*. Patent USA, 20170027 803A1, 2017.
13. Karmanova A.V., Filipas A.A. Исследование модели трехточечного крана гибкой подвески [Study of a Three-Point Flexible Suspension Crane Model]. *Materialy konferentsii «Aktual'nye problemy innovatsionnogo razvitiya yadernykh tekhnologii» v ramkakh Nauchnoi sessii NIYaU MIFI, Seversk, 21–25.05.2016* [Materials of the Conference «Actual Problems of Innovative Development of Nuclear Technologies» within the Framework of the Scientific Session of NRNU MEPhI, Seversk, 21–25.05.2016]. Seversk, 2016. pp. 68-68а. [in Russian].



Алина Александровна Зайцева
Alina A. Zaitseva

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



Николай Олегович Дудаев
Nikolai O. Dudayev

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



Евгений Артемович Зайцев
Evgeny A. Zaitsev

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



Дмитрий Константинович Кильмаков
Dmitry K. Kilmakov

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

УДК 629.3.07:629.1.05

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-107-120

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Актуальность

Актуальность данного исследовательского проекта заключается в разработке алгоритмического обеспечения маршрутов в транспортных системах, которое позволит эффективно, оперативно и рационально управлять транспортным комплексом.

Развитие современного автотранспорта уже немыслимо без применения интеллектуальных транспортных систем (ИТС).

ИТС – это интеллектуальные системы, использующие инновационные разработки в моделировании транспортных систем и регулировании транспортных потоков, предоставляющие конечным потребителям большую информативность и безопас-

ность, а также качественно повышающие уровень взаимодействия участников движения по сравнению с обычными транспортными системами.

ИТС, основанные на взаимодействии одного транспортного средства с другим и транспортного средства с дорожной инфраструктурой, должны обеспечить высокую эффективность и безопасность дорожного движения. ИТС реально увеличивают «временной горизонт», качество и достоверность информации о непосредственной обстановке на дороге, о местоположении других транспортных средств и участниках дорожного движения для обеспечения большей безопасности и мобильности.

Интеллектуальные системы предоставляют информацию о машинах и их расположении на дороге, информацию о дорожных условиях, позволяют оптимизировать и обезопасить движение в дорожной сети, а также ускорить реакцию на дорожные инциденты и аварии.

Цель исследования

Цель исследования заключается в анализе и изучении современных тенденций в развитии интеллектуальных транспортных систем, а также принципов и форм сбора и передачи информации с последующей её переработкой для использования конечным потребителем.

Задачи исследовательского проекта заключаются в следующем.

1. Анализ основных принципов построения высокопроизводительных вычислительных комплексов для интеллектуальной транспортной системы на базе вычислительных и телекоммуникационных компонентов массового применения.
2. Разработка архитектуры высокопроизводительного вычислительного комплекса для ИТС.
3. Разработка алгоритмического обеспечения маршрутов в транспортных системах.

Методы исследования

Метод исследования заключается в проведении анализа основных принципов построения высокопроизводительных вычислительных комплексов для интеллектуальной транспортной системы на базе вычислительных и телекоммуникационных компонентов массового применения.

Результаты

В ходе данного исследовательского проекта разработана системная модель информационно-вычислительного комплекса интеллектуальных транспортных систем, включающая в себя функциональную и информационную модели информационно-вычислительного комплекса интеллектуальной транспортной системы, а также разработано алгоритмическое обеспечение интеллектуальных транспортных систем, включающее в себя алгоритм поиска безопасных маршрутов в транспортных системах и алгоритм маршрутизации на основе оптимизации векторного критерия.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, алгоритмическое обеспечение маршрутов, транспортные средства, высокопроизводительный вычислительный комплекс

HIGH-PERFORMANCE COMPUTING COMPLEX FOR INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM

Relevance

The relevance of this research project lies in the development of algorithmic support for routes in transport systems, which will allow efficient, efficient and rational management of the transport complex.

The development of modern motor transport is already unthinkable without the use of intelligent transport systems (ITS). ITS is an intelligent system that uses innovative developments in the modeling of transport systems and regulation of traffic flows, providing end

users with greater information content and safety, as well as qualitatively increasing the level of interaction of traffic participants compared to conventional transport systems.

ITS, based on the interaction of one vehicle with another and the vehicle with the road infrastructure, should ensure high efficiency and safety of road traffic. ITS really increases the «time horizon», the quality and reliability of information about the immediate situation on the road, the location of other vehicles and road users, to ensure greater safety and mobility.

Intelligent systems provide information about cars and their location on the road, information about road conditions, allow you to optimize and secure traffic on the road network, as well as speed up response to traffic incidents and accidents.

Aim of research

The aim of the study is to analyze and study current trends in the development of intelligent transport systems, as well as to review and study the principles and forms of collecting and transmitting information with its subsequent processing for use by the end user.

The objectives of the research project are as follows.

1. Analysis of the basic principles of building high-performance computing systems for an intelligent transport system based on computing and telecommunication components for mass use;

2. Development of the architecture of a high-performance computing complex for ITS;

3. Development of algorithmic support for routes in transport systems.

Research methods

The research method is to analyze the basic principles of building high-performance computing systems for an intelligent transport system based on computing and telecommunication components for mass use.

Results

In the course of this research project, a system model of the information and computer complex of intelligent transport systems was developed, which includes functional and information models of the information and computer complex of the intelligent transport system, and algorithmic support for intelligent transport systems was developed, including: routes in transport systems, a routing algorithm based on vector criterion optimization.

Keywords: intelligent transport systems, algorithmic provision of routes, vehicles, high-performance computer system

Современные тенденции в области создания интеллектуальных транспортных систем

Анализ современного состояния транспортной системы позволяет выделить три базовые тенденции, определяющие перспективные направления ее развития как интеллектуальной системы [1–4]:

— интеллектуализация самого транспортного средства, преобразующая его в максимально автоматизированную и адаптивную автономную систему;

— введение функций информационного обмена — взаимодействия между отдельными транспортными средствами с целью координации и оптимизации их

группового поведения как отдельных взаимосвязанных подсистем сложной системы, наделяющее транспортную систему свойствами единой информационной среды.

— синергетический эффект самоорганизации и развития транспортной системы, возникающий в результате взаимодействия отдельных когнитивных (накапливающих знание) подсистем в единой системе и подчиненных единой стратегической цели и взаимодействующих по законам коалиционного поведения.

Каждая из сформулированных тенденций представляет собой важную научную

задачу, решение которой позволит получить большие преимущества в развитии и повышении эффективности, надежности и безопасности транспортной системы. Особый интерес среди перечисленных тенденций, согласно теории интеллектуального управления, представляет третья тенденция — самоорганизация и развитие системы, возникающие в результате создания новых моделей группового поведения и коалиционного взаимодействия между отдельными транспортными средствами в решении групповых логистических задач. Разрабатываемые в настоящее время в лабораториях ведущих научных центров модели группового взаимодействия командного поведения интеллектуальных роботов подтверждают уникальные возможности создания принципиально новых автоматизированных систем управления сложными распределенными транспортными потоками.

Разработка системной модели информационно-вычислительного комплекса интеллектуальной транспортной системы

Функциональная модель

Методология IDEF0 предписывает построение иерархической системы диаграмм — единичных описаний фрагментов системы. Сначала проводится описание системы в целом и ее взаимодействия с окружающим миром (контекстная диаграмма), после чего проводится функциональная декомпозиция: система разбивается на подсистемы, и каждая подсистема описывается отдельно (диаграммы декомпозиции). Затем каждая подсистема разбивается на более мелкие и так далее до достижения нужной степени подробности.

Каждая IDEF0-диаграмма содержит блоки и дуги. Блоки изображают функ-

ции моделируемой системы. Дуги связывают блоки вместе и отображают взаимодействия и взаимосвязи между ними.

Каждая сторона блока имеет особое, вполне определенное назначение. Левая сторона блока предназначена для входов, верхняя — для управления, правая — для выходов, нижняя — для механизмов. Такое обозначение отражает определенные системные принципы: входы преобразуются в выходы, управление ограничивает или предписывает условия выполнения преобразований, механизмы показывают, что и как выполняет функция.

Контекстная диаграмма интеллектуальной транспортной системы (рисунок 1) содержит один блок (Интеллектуальная транспортная система) имеющий входы, выходы, управления и механизмы.

К входным сигналам (объекты, используемые и преобразуемые работой для получения результата) относятся: «Информация, поступающая от оборудования, установленного на транспортном средстве», «Информация, поступающая от устройств дорожной инфраструктуры», «Информация, поступающая от служб дорожного движения, экстренных служб и т.д.», «Информация от GPS (средств космической навигации)». Данная информация позволяет интеллектуальной транспортной системе регулировать транспортные потоки с большой эффективностью, а также делает дорожно-транспортную инфраструктуру более безопасной.

К механизмам (ресурсы, выполняющие работу) относятся основные методы и виды регулирования, технические устройства и стандарты, которые позволяют интеллектуальной транспортной системе осуществлять контроль за дорожной обстановкой и регулировать транспортные потоки. К основным механизмам относятся: «Алгоритмическое и про-



Рисунок 1. Контекстная диаграмма «Интеллектуальная транспортная система (ИТС)»

Figure 1. Context diagram «Intelligent transport system (ITS)»

граммное обеспечение управления транспортной системой», «Объекты транспортной инфраструктуры, подлежащие оснащению средствами производства измерений, передачи, ретрансляции и приёма сигналов, и средства дистанционного мониторинга и производства измерений» и «Элементы информационно-телекоммуникационной инфраструктуры транспортного комплекса».

Управление (информация, управляющая действиями работы) содержит основные методики, эксплуатационную документацию, нормативные правовые акты, регулирующие функционирование ИТС, к ним относятся: «Техническое регулирование в сфере ИТС (международное, региональное, национальное)», «Нормативное правовое регулирование деятельности ИТС», «Научно-методическое обеспечение деятельности ИТС».

К выходам (объекты, в которые преобразуются входы) относятся основные функциональные задачи, которые решает

интеллектуальная транспортная система: «Управление движением транспортного средства (ТС)», «Управление перевозками», «Управление транспортной средой».

Одним из основных понятием стандартов IDEF0 является декомпозиция. Принцип декомпозиции применяется при разбиении сложного процесса на составляющие его функции.

Декомпозиция позволяет постепенно и структурированно представлять модель системы в виде иерархической структуры отдельных диаграмм, что делает ее менее перегруженной и легко усваиваемой.

В данной работе предлагается подход, позволяющий создать унифицированную многоуровневую архитектуру ИТС (рисунок 2).

Верхний уровень этой системы, представленной на рисунке 2, образует интегрированная информационная среда интеллектуального управления эксплуатацией транспорта.

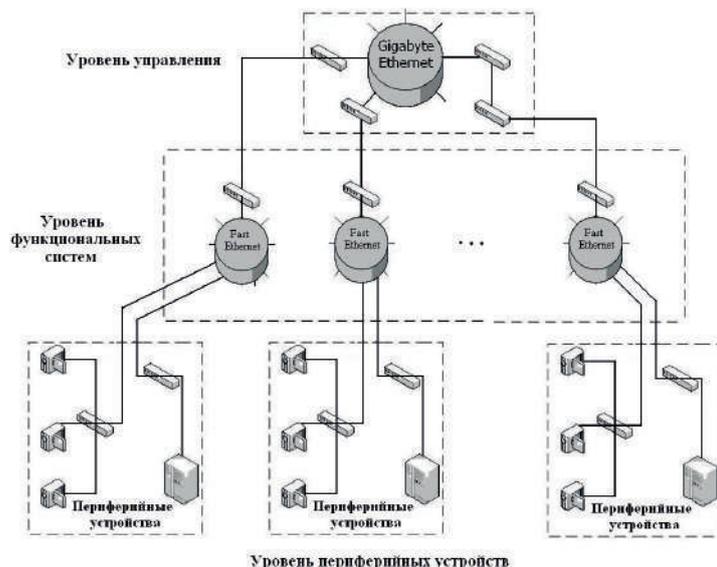


Рисунок 2. Архитектура информационно-вычислительного комплекса (ИВК) интеллектуальной транспортной системы

Figure 2. Architecture of the information and computing complex of the intelligent transport system

Построение верхнего уровня ИТС (рисунок 3) на базе оптоволоконной индустриальной Ethernet-сети позволяет получить высоко надежную структуру, не подверженную воздействию транспортных и электрических помех, а также влиянию внешней среды.

Второй уровень ИТС включает в свой состав вычислительные системы, предназначенные для решения основных функциональных задач. К их числу относятся [5–7]:

— системы управления движением транспортных средств на основе спутниковой навигации и радиолокационного зондирования;

— системы мониторинга подвижных объектов и эксплуатационного персонала с их автоматической идентификацией;

— центры ситуационного контроля и прогнозирования критических ситуаций;

— системы финансового мониторинга и оптимизации расходов.

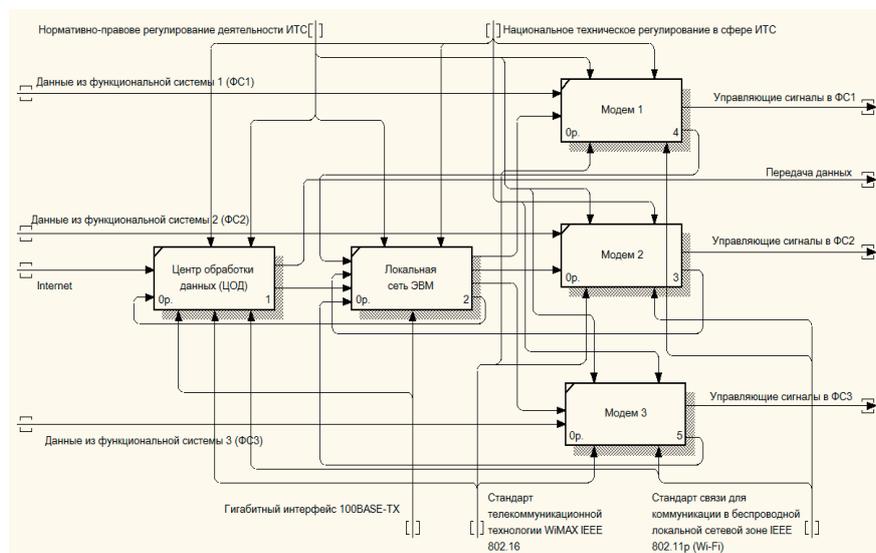


Рисунок 3. Верхний уровень архитектуры ИВК ИТС

Figure 3. The upper level of the architecture of the measuring and computing complex ITS

Системы второго уровня могут быть реализованы на базе Ethernet-колец на коммутаторах со скоростями 100 Мб/с с использованием систем цифровой радиосвязи со всеми объектами транспортной инфраструктуры и спутниковых систем мониторинга объектов радиолокационного зондирования.

Третий уровень ИТС составляют следующие пассивные и активные элементы:

- объекты транспортной инфраструктуры, подлежащие оснащению средствами производства измерений, передачи, ретрансляции и приема сигналов;

- средства дистанционного мониторинга и производства измерений;

- элементы информационно-телекоммуникационной инфраструктуры транспортного комплекса;

- транспортные средства и грузы, подлежащие оснащению средствами связи, дистанционного мониторинга и телеметрических измерений;

- дистанционно управляемые исполнительные и индикационные устройства: приборы, узлы и агрегаты.

Большая часть перечисленных выше систем и средств используется для создания информационной картины дорожной ситуации и оптимизация движения транспортных средств, в частности, за счет синхронизации работы светофоров в зависимости от интенсивности потока, а также для предотвращения дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с помощью своевременного выявления потенциально опасных ситуаций. С этой целью в рамках дорожной инфраструктуры формируются информационные узлы, которые собирают, хранят и обмениваются информацией с водителями о состоянии дорожной обстановки. Ядром каждого такого информационного узла служит дорожный контроллер, в функции которого входят обработка оперативной информации, поступающей от устройств

дистанционного мониторинга, а также регулирование дорожного движения за счет переключения светофоров по заданному алгоритму и передачи данных о наиболее оптимальных маршрутах объезда. Синхронизация работы всей совокупности информационных узлов осуществляется на верхних уровнях ИТС.

Таким образом, представленная в данной работе концепция интегральной телематической платформы ИТС позволяет унифицировать программно-аппаратную среду при реализации широкого класса проектов, имеющих региональную и ведомственную специфику. Использование стандартных открытых архитектур информационно-вычислительных систем создает широкие возможности для их расширяемости, мобильности и интероперабельности, что обеспечивает хорошие предпосылки для дальнейшего развития интеллектуальной системы [8–12].

Информационная модель

Модель представляет собой совокупность сущностей и ее атрибутов и является прообразом базы данных (БД) в третьей нормальной форме.

Нашей задачей является разработка информационной модели процессов сбора и обработки информации о состоянии транспортной среды от различных источников. Информационные модели являются прообразом баз данных (БД), которые будут заполняться и использоваться на всех уровнях иерархии интеллектуальной транспортной среды. Информационные модели необходимы для упорядочивания информационных потоков, определения логической структуры БД, определения и учета требуемого объема, хранимых данных, разграничения прав доступа к данным и удобства выборки и обработки данных.

База данных обработанной информации является «информационным ядром» всего процесса построения маршрута,

она содержит наиболее полную информацию как обо всем процессе регулирования транспортного потока, так и о самом объекте слежения.

Информационная модель процесса сбора и анализа данных ИТС представлена на рисунке 4. Данная модель содержит 6 сущностей:

- оповещатели;
- тип оповещателя;
- дорожная обстановка;
- ДТП;
- фактическое ДТП;
- главная.

В данной модели 5 сущностей-родителей: оповещатели, тип оповещателя, дорожная обстановка, ДТП, фактическое ДТП и 1 сущность потомка: главная. Сущность «обозначение» содержит информацию обо всех источниках информации, где каждому источнику присвоен свой идентификационный номер («ID_оповещателя»). Сущность «обозначение» является родителем сущности «главная», в которой содержится полный список всех имеющихся источников информации о дорожной обстановке.

Сущность «фактическое ДТП» также является родителем, поскольку связана с сущностью «главная» неидентифицирующей связью, следовательно, данные из сущности «фактическое ДТП» могут при-

сутствовать в «главная» неоднократно, что и характеризует периодичность и многократность запросов информации от источников и её анализа. Сущность «фактическое ДТП» является одной из важнейших частей работы всей ИТС и позволяет регулировать транспортную обстановку, исходя из полученных данных о дорожно-транспортных происшествиях и ремонтных работах на определённых участках дорог, что выражено в ее атрибутах: «ID_Событие ДТП», «Количество участников», «Номера машин», «ID_ДТП», «ID_Обстановка». Приведенные атрибуты позволяют точно идентифицировать аварийную ситуацию (по типу, по количеству участников).

Разработка алгоритмического обеспечения интеллектуальных транспортных систем

Алгоритм поиска безопасных маршрутов в транспортных системах

Одной из важнейших функций ИТС, определяющей ее прагматическую ценность, являются выбор оптимального маршрута, оперативное отображения текущего положения транспортного средства на географической карте и сопровождение последнего при следовании по

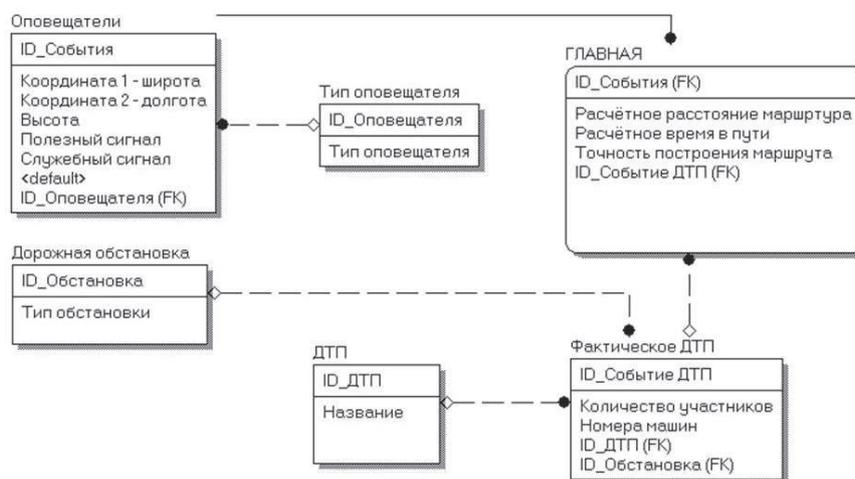


Рисунок 4. Информационная модель базы данных сбора и обработки информации

Figure 4. Information model of the database for collecting and processing information

маршруту. В существующих автомобильных навигационных системах при выборе маршрута движения используется единственный критерий — расстояние между начальной и конечной точками маршрута. При всей универсальности этого показателя он не учитывает всей совокупности условий, влияющих на эффективность выполнения транспортных операций. В связи с этим в данной работе предлагается дополнительно использовать комплекс показателей, учитывающих уровень безопасности движения по выбранному маршруту.

Принципы формирования векторного критерия оценки маршрутов

При формировании векторного критерия необходимо исходить из того, что оценочные функции должны иметь конкретную количественную шкалу, и должна существовать объективная исходная информация, на основе которой количественные оценки могут быть рассчитаны.

С учетом этого требования в число оценочных функций были включены следующие показатели:

- оценка качества состояния автомобильных дорог (ϵ_1);
- оценка аварийности на участках дорог (ϵ_2);
- оценка условий дорожного движения (ϵ_3).

Оценка качества состояния автомобильных дорог

В качестве основного критерия оценки качества состояния дорог принимается количество дефектов содержания. В «Руководстве по оценке уровня содержания автомобильных дорог», утвержденном распоряжением Государственной службы дорожного хозяйства, принято три нормативных уровня содержания дорог (таблица 1): допустимый, средний,

высокий, и один не нормативный уровень — недопустимый, при котором не выполняются требования, предъявляемые к обеспечению безопасности движения.

При оценке фактического уровня содержания дорог определяются уровень содержания каждого километра дороги, соотношения количества на дороге километров с недопустимым, допустимым, средним и высоким уровнем содержания и усредненный показатель уровня содержания дороги в целом и сети дорог. После обработки данных обследования по каждому километру путем группировки зафиксированных дефектов, подсчета в необходимых случаях объемов дефектов, их оценки устанавливается, какому уровню содержания соответствует факт наличия и величина обнаруженного дефекта.

При этом, как это показано в таблице 2, выявленным дефектам присваивается оценка в баллах:

- 2 (два) — недопустимый уровень содержания;
- 3 (три) — допустимый уровень содержания;
- 4 (четыре) — средний уровень содержания;
- 5 (пять) — высокий уровень содержания.

Чтобы получить оценку фактического уровня качества состояния дорог, рекомендуется поступать следующим образом:

формируются следующие данные:

- количество обследованных километров — N ;
- количество километров, на которых зафиксирован недопустимый уровень содержания, (оценка 2) — N_2 ;
- количество километров, на которых зафиксирован допустимый уровень содержания, (оценка 3) — N_3 ;
- количество километров, на которых зафиксирован средний уровень содержания, (оценка 4) — N_4 ;

Таблица 1. Уровни и характеристики содержания дорог**Table 1.** Levels and characteristics of road maintenance

Уровень	Характеристика уровня содержания дорог
Допустимый	Содержание дороги обеспечивает допустимый уровень безопасности движения в соответствии с ГОСТ Р 50597-93 «Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям безопасности дорожного движения». Допускаются факты временного ограничения движения автотранспортных средств на отдельных участках по условиям их содержания. ДТП с сопутствующими неудовлетворительными дорожными условиями, зависящими от дефектов содержания дорог, отсутствуют. Допускается наличие не более 15 % (по протяженности) участков с не допустимым уровнем содержания.
Средний	Содержание дороги обеспечивает поддержание потребительских свойств автомобильной дороги на среднем уровне. Состояние конструктивных элементов зависящие от содержания не вызывают необходимость временного ограничения движения автотранспортных средств. ДТП с сопутствующими неудовлетворительными дорожными условиями, зависящими от дефектов содержания дорог, отсутствуют. Допускается наличие не более 10 % (по протяженности) участков с не допустимым уровнем содержания.
Высокий	Содержание дороги обеспечивает поддержание потребительских свойств автомобильной дороги на максимально возможном уровне, для фактически сложившегося транспортно-эксплуатационного состояния дороги. Автомобильная дорога и каждый ее конструктивный элемент содержится в состоянии, обеспечивающем круглосуточное, бесперебойное и безопасное движение автотранспортных средств. ДТП с сопутствующими неудовлетворительными дорожными условиями, зависящими от дефектов содержания дорог, отсутствуют. Не допускается наличие участков с не допустимым уровнем содержания.

— количество километров, на которых зафиксирован высокий уровень содержания, (оценка 5) — N_5 ; при этом $N_5 = N_1 - N_2 - N_3 - N_4$;

определяется средняя оценка уровня качества состояния автомобильной дороги или участка дороги:

$$O_{cp} = \frac{N_2 \times 2 + N_3 \times 3 + N_4 \times 4 + N_5 \times 5}{N}$$

Оценка фактического уровня качества состояния сети дорог производится аналогичным образом.

Оценка аварийности на участках дорог может производиться на основе анализа данных о количестве дорожно-транспортных происшествий.

Оценка условий дорожного движения включает такие показатели, как интенсивность транспортного потока, наличие линий общественного транспорта (трамвай, троллейбус, автобус), особенности инфраструктуры дорожного движения.

На основе полученной совокупности оценочных функций можно сформировать комплексный показатель, определя-

ющий уровень безопасности движения по выбранному маршруту. Для этого необходимо осуществить аддитивную свертку предварительно нормированных оценочных функций:

$$\varepsilon_B = c_1 \cdot \varepsilon_1 + c_2 \cdot \varepsilon_2 + c_3 \cdot \varepsilon_3,$$

здесь весовые коэффициенты назначаются в результате экспертного ранжирования важности перечисленных отдельных составляющих с точки зрения безопасности дорожного движения.

Алгоритмы маршрутизации на основе оптимизации векторного критерия

Процедура поиска оптимального маршрута для заданного участка дорожной сети предусматривает построение ориентированного графа с весами двух видов: в виде расстояний и в виде оценок опасности. В качестве вершин этого графа принимаем всевозможные пересечения транспортных магистралей — дорог, улиц, по которым разрешено движение транспорта, а в качестве ветвей — соответствующие участки транспортных

Таблица 2. Оценка дефектов содержания дорог**Table 2.** Assessment of road maintenance defects

Элемент дороги	Перечень дефектов, допускаемых при выставлении оценок			
	(5)	(4)	(3)	(0)
1. Дорожная одежда с покрытием усовершенствованного типа	дефектов нет	шелушение, отдельные неровности покрытия, отдельные незаполненные мастикой швы и трещины	сдвиги, колейность, разрушение кромок проезжей части, граней плит и бордюров, трещины, мусор на проезжей части	выбоины, проломы; на проезжей части застои воды, грязь, создающие аварийную обстановку при отсутствии соответствующих дорожных знаков
2. Земляное полотно и водоотвод	дефектов нет	незначительные нарушения поперечных уклонов обочин; отдельные незаполненные мастикой трещины на обочинах с усовершенствованным покрытием	выбоины, колейность обочин; несоблюдение поперечных уклонов обочин; загрязнение полосы отвода	размывы обочин и откосов, заиливание и застои воды в водоотводных лотках; кустарник на обочинах; разрушение водоотводных лотков
3. Искусственные сооружения: мосты, путепроводы, трубы	содержание проезжей части мостов и путепроводов оценивается аналогично п. 1			
4. Обстановка дороги (организация и безопасность движения)	дефектов нет	незначительное загрязнение или повреждение дорожных знаков и разметок, затрудняющие их видимость	установка знаков и ограждений с нарушениями ГОСТ. Загрязнение и повреждение, затрудняющие видимость дорожных ограждений, знаков, направляющих устройств. Наличие неорганизованных съездов, недостаточная освещенность подземных пешеходных переходов	отсутствие в необходимых местах или значительное разрушение дорожных ограждений при отсутствии соответствующих знаков. Отсутствие (согласно дислокации), загрязнение или повреждение дорожных знаков, исключающее их видимость
5. Благоустройство и озеленение	дефектов нет	незначительная загрязненность элементов благоустройства	мелкие повреждения и отсутствие скамеек, урн в необходимых местах	антисанитарное состояние, разрушения элементов благоустройства

магистралей. На рисунке 5 показан пример участка дорожной сети с нанесенным на него ориентированным графом, при этом улицы с двусторонним движением обозначены как неориентированные ветви.

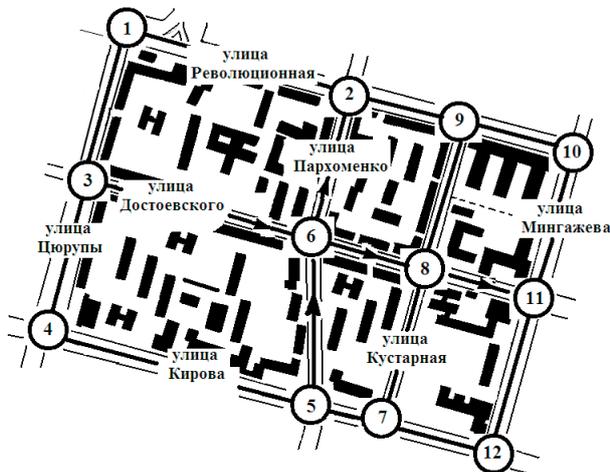


Рисунок 5. Граф дорожной сети

Figure 5. Graph of the road network

Обозначим $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ множество вершин графа, а $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$ — множество ветвей. При этом каждая ветвь задается парой вершин графа, которые она соединяет $y_r(x_i; x_j)$. На графе введено отображение $\omega: Y \rightarrow E$, которое каждой ветви $y_r(x_i; x_j)$ ставит в соответствие значение векторного критерия $\{\epsilon_r^A(x_i; x_j), \epsilon_r^B(x_i; x_j)\}$.

Путем или маршрутом из вершины x_a в вершину x_b назовем простую ориентированную цепь, соединяющую последовательность вершин $P = \{x_a, x_q, x_{q+1}, \dots, x_{q+g}, x_b\}$. Отклонением P_i от пути P в точке x_i назовем путь, совпадающий с P от вершины x_a до вершины x_i , а затем идущий к вершине, отличной от вершины x_{i+1} прежнего пути P . Часть пути P , проходящая через $(i+1)$ его первых вершин $\{x_a, x_1, x_2, \dots, x_i\}$, называется i -м корнем этого пути — R_i , а путь из вершины x_{i+1} в вершину x_b , не совпадающий с соответствующей частью $\{x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_b\}$ пути P , называется его i -м ответвлением — S_i .

Длиной пути P назовем величину:

$$L_P = \sum_{(x_i; x_j) \in P} \epsilon_r^A(x_i; x_j).$$

Аналогично безопасностью пути P назовем величину:

$$V_P = \sum_{(x_i; x_j) \in P} \epsilon_r^B(x_i; x_j).$$

Кратчайшим путем или путем минимальной длины назовем путь $P(x_a; x_b)$ из вершины x_a в вершину x_b , длина которого удовлетворяет условию:

$$L_P = \min_{P(x_a; x_b)} L_P(x_a; x_b).$$

В свою очередь, кратчайшим путем с δ -уступкой назовем путь $P(x_a; x_b)$, длина которого удовлетворяет условию:

$$L_P \leq \min_{P(x_a; x_b)} L_P(x_a; x_b) + \delta.$$

Алгоритм поиска маршрута базируется на методе последовательных уступок, алгоритмах Дейкстры и Йена поиска кратчайших путей в графе. Суть метода последовательных уступок заключается в том, что вначале находится маршрут, оптимальный с точки зрения дальности ϵ_A . Затем назначается допустимое увеличение (уступка) по дальности и находятся все маршруты, дальность которых не превышает дальности кратчайшего маршрута более, чем на величину принятой уступки. Оптимальным по векторному критерию признается тот из найденных маршрутов, которому соответствует максимальная величина критерия безопасности ϵ_B .

При описании алгоритма мы будем использовать следующую совокупность массивов:

L_δ — массив кратчайших путей с δ -уступкой;

L_T — временной массив кратчайших путей;

$M_T = [m(x_i)]_{1 \times N}$ — массив текущих меток вершин графа;

$F = [f(x_i)]_{1 \times N}$ — массив флагов для вершин графа;

$\Gamma(x_i)$ — массив вершин графа, смежных с x_i ;

$\Pi(x_i)$ — массив посещенных вершин графа.

Шаг 1. Присвоение начальных значений $k = 1, \delta, S$ (здесь S — большое число, удовлетворяющее условию

$$S \geq \sum_{r=1}^M \epsilon_r^A(x_i; x_j).$$

Шаг 2. Найти кратчайший путь $P^k(x_a; x_b)$.

Шаг 2.1. Присвоить $m(x_a) = 0; f(x_a) = 1; m(x_i) = S; f(x_i) = 0$ для всех $x_i \neq x_a$; добавить x_a в массив $\Pi(x_i)$.

Шаг 2.2. Присвоить $x_p = x_a$.

Шаг 2.3. Для всех $x_i \in \Gamma(x_p)$, для которых $f(x_i) = 0$, присвоить

$$m(x_i) = \min[m(x_i), m(x_p) + \epsilon_r^A(x_p; x_i)]$$

Шаг 2.4. Среди всех вершин, для которых $f(x_i) = 0$, найти вершину с минимальной меткой $x_i^* = \arg[\min(m(x_i))]$.

Шаг 2.5. Присвоить $x_p = x_i^*; f(x_i^*) = 1$. Добавить x_i^* в массив $\Pi(x_i)$.

Шаг 2.6. Если $x_p \neq x_b$, то идти к шагу 2.3, иначе массив $\Pi(x_i)$ содержит вершины кратчайшего пути $P^k(x_a; x_b)$, длина которого равна $l^* = m(x_b)$, идти к шагу 3.

Шаг 3. Включить кратчайший путь $P^k(x_a; x_b)$ в массив L_δ .

Шаг 4. Присвоить $k = k + 1$.

Шаг 5. Найти все отклонения P_i^k $(k-1)$ -го кратчайшего пути P^{k-1} для всех $i = 1, 2, \dots, g_{k-1}$, выполняя для каждого i шаги с 6-го по 9-й.

Шаг 6. Проверить, совпадает ли i -й корень R_i^{k-1} пути P^{k-1} с аналогичными i -ми корнями R_i^j любого из P^j путей ($j = 1, 2, \dots, k-1$). Если да, то присвоить $\epsilon_r^A(x_i^{k-1}; x_{i+1}^j) = S$; иначе ничего не изменять.

Шаг 7. Найти кратчайшие ответвления S_i^k от вершины x_i^{k-1} к x_b , исключая из рассмотрения вершины $x_a, x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, \dots, x_i^{k-1}$.

Шаг 7.1. Присвоить $m(x_i^{k-1}) = 0; f(x_i^{k-1}) = 1; m(x_i) = S; f(x_i) = 0$, для всех $x_i \neq x_i^{k-1}$; добавить x_i^{k-1} в массив $\Pi(x_i)$.

Шаг 7.2. Присвоить $x_p = x_i^{k-1}$.

Шаг 7.3. Для всех $x_i \in \Gamma(x_p)$, не принадлежащих к множеству $x_a, x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, \dots, x_i^{k-1}$, для которых $f(x_i) = 0$, присвоить $m(x_i) = \min[m(x_i), m(x_p) + \epsilon_r^A(x_p; x_i)]$

Шаг 7.4. Среди всех вершин, для которых $f(x_i) = 0$, найти вершину с минимальной меткой $x_i^* = \arg[\min(m(x_i))]$.

Шаг 7.5. Присвоить $x_p = x_i^*; f(x_i^*) = 1$. Добавить x_i^* в массив $\Pi(x_i)$.

Шаг 7.6. Если $x_p \neq x_b$, то идти к шагу 7.3, иначе массив $\Pi(x_i)$ содержит вершины кратчайшего ответвления S_i^k , длина которого равна $m(x_b)$.

Шаг 7.7. Если массив $\Pi(x_i)$ не пустой, то идти к шагу 8, иначе шаг 12.

Шаг 8. Построить отклонение P_i^k , соединяя i -й корень R_i^k с кратчайшим ответвлением S_i^k и поместить P_i^k в массив M_T .

Шаг 9. Восстановить прежние значения $\epsilon_r^A(x_i^{k-1}; x_{i+1}^j)$, идти к шагу 6.

Шаг 10. Найти кратчайший путь в массиве M_T . Если длина этого пути удовлетворяет условию $l_p \leq l^* + \delta$, то обозначить этот путь P^k и поместить его в массив L_δ .

Шаг 11. Идти к шагу 4.

Шаг 12. Для всех $P^k \in L_\delta$ рассчитать показатель безопасности пути:

$$V_{P^k} = \sum_{(x_i; x_j) \in P^k} \epsilon_r^A(x_i; x_j).$$

Шаг 13. Найти путь с максимальным уровнем безопасности

$$(P^k)_{opt} = \arg \left[\max_{P^k \in L_\delta} V_{P^k} \right].$$

Шаг 14. Путь $(P^k)_{opt}$ является искомым маршрутом, оптимальным по введенному векторному критерию.

Выводы

В ходе данного исследовательского проекта разработана системная модель информационно-вычислительного комплекса интеллектуальных транспортных систем, включающая в себя функциональную и информационную модели информационно-вычислительного ком-

плекса интеллектуальной транспортной системы, а также разработано алгоритмическое обеспечение интеллектуальных транспортных систем, включающее в

себя алгоритм поиска безопасных маршрутов в транспортных системах и алгоритм маршрутизации на основе оптимизации векторного критерия.

Список источников

1. Bossom R. D31 European ITS Communication Architecture — Overall Framework, COM-eSafety System Architecture. 2012. 257 p.
2. Ramirez-Iniguez R. National ITS Architecture Version 6.1. Iteris Inc., 2012. 180 p.
3. Интеллектуальная транспортная система [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Интеллектуальная_транспортная_система (дата обращения: 05.08.2021).
4. Назначение и структура современных ИТС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.techportal.ru/review/security-on-transport/its/#naznachenie-i-struktura-sovremennykh-its-kakie-informatsionnye-i-kommunikatsionnye-tekhnologii-i-resh> (дата обращения: 20.04.2022).
5. Задера В.И. Современные датчики на дорогах // Автомобильные дороги. 2013. № 4. С. 56-59.
6. Соловьёв Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз. 2011. 270 с.
7. Бек Ю.М. Современные автомобильные навигационные приборы и системы. М.: Мир, 2011. 464 с.
8. Brodji A. The TerraMax Autonomous Vehicle // Journal of Field Robotics. 2012. No. 7. P. 62.
9. Сергеев С.Л. Архитектуры вычислительных систем. М.-СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 240 с.
10. Смирнова Е.В. Технологии современных сетей Ethernet. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 272 с.
11. Байцер Б. Архитектура вычислительных комплексов. М.: Мир, 2011. 500 с.
12. Богданов А.В. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. М.: Энергоатомиздат, 2010. 288 с.

References

1. Bossom R. D31 European ITS Communication Architecture — Overall Framework, COM-eSafety System Architecture. 2012. 257 p.

2. Ramirez-Iniguez R. *National ITS Architecture Version 6.1*. Iteris Inc., 2012. 180 p.
3. *Интеллектуальная транспортная система* [Intellectual transport system]. [Electronic Resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Интеллектуальная_транспортная_система (accessed 05.08.2021). [in Russian].
4. *Naznachenie i struktura sovremennykh ITS* [The Purpose and Structure of Modern ITS]. [Electronic Resource]. URL: <http://www.techportal.ru/review/security-on-transport/its/#naznachenie-i-struktura-sovremennykh-its-kakie-informatsionnye-i-kommunikatsionnye-tekhnologii-i-resh> (accessed 20.04.2022). [in Russian].
5. Zadera V.I. *Sovremennye datchiki na dorogakh* [Modern Sensors on the Roads]. *Avtomobil'nye dorogi — Automobile Roads*, 2013, No. 4, pp. 56-59. [in Russian].
6. Solov'ev Yu.A. *Sistemy sputnikovoi navigatsii* [Satellite Navigation Systems]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2011. 270 p. [in Russian].
7. Bek Yu.M. *Sovremennye avtomobil'nye navigatsionnye pribory i sistemy* [Modern Automotive Navigation Devices and Systems]. Moscow, Mir Publ., 2011. 464 p. [in Russian].
8. Brodji A. The TerraMax Autonomous Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2012, No. 7, pp. 62.
9. Sergeev S.L. *Arkhitektury vychislitel'nykh system* [Architectures of Computing Systems]. Moscow-Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011. 240 p. [in Russian].
10. Smirnova E.V. *Tekhnologii sovremennykh setei Ethernet* [Technologies of Modern Ethernet Networks]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2012. 272 p. [in Russian].
11. Baitser B. *Arkhitektura vychislitel'nykh kompleksov* [Architecture of Computer Systems]. Moscow, Mir Publ., 2011. 500 p. [in Russian].
12. Bogdanov A.V. *Arkhitektury i topologii mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh system* [Architectures and Topologies of Multiprocessor Computing Systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2010. 288 p. [in Russian].



Андрей Игоревич Зиненко
Andrey I. Zinenko

магистрант, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», Королев, Россия



Наиль Анварович Каримов
Nail A. Karimov

магистрант, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», Королев, Россия

УДК 004.733

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-121-127

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Актуальность

В статье авторы проводят анализ способов проектирования структурированных кабельных систем (СКС), раскрывая как само понятие структурированных кабельных систем, так и способы их проектирования. Данный труд строится, прежде всего, на анализе способов проектирования, обобщая применимые в современности способы, авторы выделили три способа: «Ажио», «Умеренной скаредности» и «Calcolo esatto».

При анализе способов проектирования структурированных кабельных систем стояла задача формализации существующих методов проектирования СКС, их принципов и возможности применения в разных условиях.

Цель исследования

Провести сравнительный анализ существующих способов проектирования СКС при общих заданных условиях, выбрать оптимальный для конкретного случая способ.

Методы исследования

Для решения поставленной задачи авторы провели сравнительный анализ популярных, ныне существующих способов проектирования структурированных кабельных систем, сравнивая их применимость со спецификацией среды передачи данных.

Результаты

В ходе исследования были проанализированы текущие способы проектирования структурированных кабельных систем, проведён сравнительный анализ, изучена специфика передачи данных по имеющимся стандартам, сделаны выводы о применимости каждого из способов.

Ключевые слова: структурированная кабельная система, топология, методы, анализ, исходные данные, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, масштабируемость, пропускная способность, технологии

ANALYSIS OF METHODS FOR DESIGNING STRUCTURED CABLE SYSTEMS

Relevance

In the article, the authors analyze the ways of designing structured cable systems, revealing both the very concept of structured cable systems and the methods of their design. This work is based primarily on the analysis of design methods, generalizing the methods applicable in modern times, the authors identified three methods: «Agio», «Moderate stinginess» and «Calcolo esatto».

When analyzing methods for designing structured cable systems, the task was to formalize the existing methods for designing SCN, their principles and the possibility of application in different conditions.

Aim of research

Carry out a comparative analysis of existing methods for designing SCN, under general given conditions, to choose the best method for a particular case.

Research methods

To solve the problem, the authors conducted a comparative analysis of the popular, currently existing methods for designing structured cable systems, comparing their applicability with the specification of the data transmission medium.

Results

In the course of the study, the current methods of designing structured cable systems were analyzed, a comparative analysis was carried out, the specifics of data transmission according to existing standards were studied, and conclusions were drawn about the applicability of each of the methods.

Keywords: structured cable system, topology, methods, analysis, initial data, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, scalability, throughput, technologies

Структурированные кабельные системы (СКС) в настоящий момент времени являются неотъемлемой частью любой сети, вне зависимости проводная или беспроводная связь необходима. СКС представляют собой коммуникационную систему, объединяющую компьютеры и периферийное оборудование на ограниченной территории. Прежде всего, СКС необходимы для физического соединения компонентов сети, соединения могут быть представлены несколькими видами, а сама сеть многоуровневая, но задача всегда одна — обеспечение работы сети и всех подключенных устройств.

При проектировании СКС огромное, если не решающее значение имеет выбор технологии, по которой будет построена СКС. На данный момент существует две, достаточно распространённые технологии — это Fast Ethernet и Gigabit Ethernet. При проектировании сети стоит уделить

огромное значение определению её максимальных возможностей. Но вместе с этим также важно соблюсти баланс, при котором сеть будет удовлетворять следующим условиям:

- удовлетворять потребностям пользователей сети;
- иметь запас по пропускной способности;
- быть способной к масштабированию.

Исходя из принципов построения сети, стоит сделать вывод о том, что сеть должна совмещать в себе эти условия.

Анализируя способы проектирования СКС, можно выделить следующие из них:

- способ «Ажио» считается наиболее распространённым;
- способ «Умеренной скарденности» обычно применяется в проектах с ограниченными временными и другими ресурсами;

— последний способ «Calcolo esatto» (итал.) совмещает предыдущие способы, однако не превосходит их [1].

Основываясь на сущности перечисленных способов построения сети, стоит начать с последнего. Calcolo esatto был разработан итальянскими специалистами в области проектирования и наладки проводных сетей. Данный метод хорошо зарекомендовал себя в статичных условиях, когда количество пользователей сети постоянно, исходя из условий Технического Задания, и не предполагает изменений. Сеть проектируется под эти нужды и не имеет возможности к расширению.

Вторым способом «Умеренная скарденность» часто пренебрегают крупные компании, так как сети, проектируемые по такому способу, на точках соединения устройств имеют избыточность по пропускной способности, однако окупают её при изменении количества пользователей, например при расширении сети за счёт беспроводных точек доступа.

Последним же способом из рассматриваемых и наиболее оптимальным, по мнению автора, является «Ажио» — сети, построенные по этому способу, изначально проектируются под требуемые задачи, готовы к увеличению нагрузки [1].

Возвращаясь к выбору технологии передачи данных, стоит принимать во внимание не только технологию как таковую, но и способ передачи данных. Чтобы выбрать способ передачи данных, нужно обратиться к исходным данным, так как, не принимая во внимание особенности «ландшафта», можно сделать неверное предположение о использовании той или иной технологии. Применительно к текущим условиям проектирования стоит провести анализ доступности различных способов передачи данных. При выборе из числа проводящих элементов, которые способны работать с вышеописанными технологиями, необходимо, чтобы они

также удовлетворяли требованиям обеспечения потребностей пользователей, запаса пропускной способности, а также возможности масштабирования сети.

Немаловажным также считается удобство обслуживания сети. Хотя будет рассматриваться исключительно удобство с механической точки зрения, но не стоит также забывать и о удобстве наладки в плане настройки программными методами, хотя в большинстве случаев они схожи.

На данный момент наиболее массовыми способами передачи информации считаются два способа:

- проводной;
- беспроводной.

Для демонстрации эффективности выбранного метода следует протестировать её теоретически, в условиях, приближенных к реальным [2].

Предлагаемое для испытаний условие — это замкнутое помещение с большим количеством участников сети, что требует больше информации для определения наиболее оптимального способа соединения, но есть одно условие — все участники сети стационарны. При большом количестве беспроводных точек доступа существенно понижается безопасность сети. В концепции текущих рассматриваемых условий беспроводная связь не будет использоваться, однако запас по устройствам предусмотрен. Применительно к исследуемому объекту обязателен высокий уровень безопасности, ввиду чего рассмотрение беспроводной сети недопустимо, и, как уже было сказано, устройства в сети статичны и, как следствие, выбор однозначно в пользу проводного решения.

Несколько иная ситуация происходит при использовании технологии Gigabit Ethernet. Первое применение данной технологии состоялось в 1999 г. для построения проводных локальных сетей, в связи с чем был ознаменован плавный конец

Fast Ethernet. Переход на новый стандарт позволил не только увеличить скорость передачи в десять раз, но и использовать предыдущее оборудование, правда только в совместимом режиме с ограничением скорости до максимальной по стандарту Fast Ethernet.

Если рассматривать стандарт Gigabit Ethernet за пределами контекстной задачи, то можно подчеркнуть, что максимальную дальность передачи данных на предельной скорости удалось поднять с 10 до 70 км. Естественно, подобные скорости на таких расстояниях станут доступны лишь при использовании многожильной оптоволоконной линии, которая в данном проекте не будет использоваться по причине нецелесообразности и дороговизны. Возвращаясь к текущим условиям построения СКС, следует указать максимальные характеристики, которые может обеспечить технология Gigabit Ethernet применительно к использованию многожильного медного кабеля — 1000 Мбит/с или 125 Мбайт/с, на расстоянии до 100 м [3].

Наглядно рассмотреть зависимость скорости передачи данных на примере 100-Base-TX можно на рисунке 1. Этот рисунок позволяет определить, что фактор расстояния в современных реалиях большинства проектов наименее значим в виду большого количества дублирующих сигналов устройств, и, соответственно, внимание стоит уделить скорости обмена данными в сети.

Отдельно следует сказать о том, на каких стандартах достигаются такие возможности. Стандартов, удовлетворяющих поставленному заданию, существуют два: IEEE 802.3ab и TIA 854:

IEEE 802.3ab разработан в 1999 г., более известен как 1000BASE-T, максимальная дальность передачи 100 м, максимальная скорость передачи на предельное расстояние — 1000 Мбит/с, необходимый тип кабеля UTP/STP, категории витой пары cat5, 5e, 6 и 7.

TIA 854 разработан в 2001 г., более известный как 1000BASE-TX, протяженность соединения, обеспечивающая

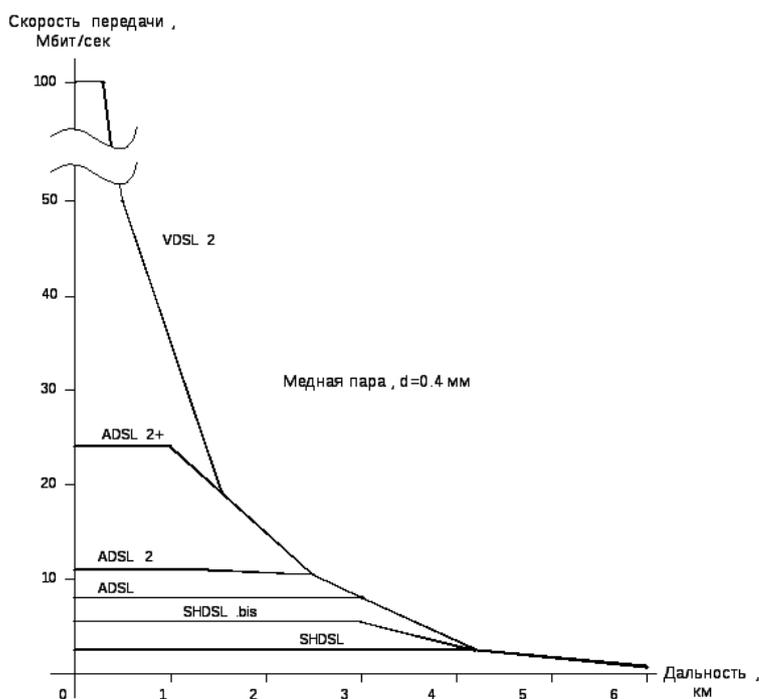


Рисунок 1. График зависимости скорости передачи данных от технологии передачи при фиксированном параметре

Figure 1. Graph of the dependence of the data transfer rate on the transfer technology with a fixed parameter

регламентируемую скорость 1000 Мбит/с на протяжении 100 м, требования к витой паре выше, UTP/STP cat 6, 7 [4].

Так как СКС разрабатывается с нуля, то не возникает ситуация, при которой в существующей и подключенной сети имеется ограничение на выбор стандарта передачи данных, исходя из уже проложенных соединений. Более предметно можно ознакомиться с обозреваемыми технологиями по таблице 1.

Прежде чем определиться со стандартом передачи данных, следует рассмотреть доступные для использования кабели связи, а именно витая пара. Как уже было сказано ранее, от оптоволокна было решено отказаться ввиду сложности монтажа, избыточных скоростных характеристик, стоимости, и, как следствие, необоснованности использования в актуальном проекте. Возвращаясь к выбору кабелей, предпочтение стоит отдавать проводникам, которые имеют наилучшее соотношение цена / качество, удобство монтажа, а лучше всего — совокупность этих факторов. В настоящее время к категории устаревших относятся категории кабелей: 1, 2, 3, 4, 5, а также 5е, которые

обеспечивают скорость передачи до 100 Мбит/с, а также категорий: 7а, 8/8.1 и 8.2 ввиду их цены, а также ориентирования на совершенно другие скорости (40 Гбит/с и выше), остаётся выбор между 6, 6а и 7 категориями витых пар, каждая из которых, описана ниже.

Cat. 6 — применима для сетей, построенных на базе технологий Fast Ethernet и Gigabit Ethernet, согласно стандартам способна выдать скорость передачи данных до 1000 Мбит/с на протяженности до 55 м. Соответствует стандартам 10GBASE-T(1000BASE-T) Ethernet.

Cat. 6а — нашла своё применение в сетях основанных на Gigabit Ethernet, 4 пары проводников. Предельно допустимая скорость передачи в 10 Гбит/с ограничена дальностью в 200 м. Особо стоит отметить, что кабели этой категории обычно соответствуют классификации F/UTP либо U/FTP.

Cat. 7 — кабели данной категории сертифицированы только международным стандартом ISO 11801, и их внутреннее устройство соответствует классификации F/FTP или S/FTP [4].

Таблица 1. Стандарты передачи данных

Table 1. Communication standards

Сетевые приложения:	10Base-T	100Base-TX	1000BASE-T	10GBase-T
- скорость передачи данных, Мбит/с;	10	100	1 000	10 000
- принятие стандарта приложения	1991 г.	1996 г.	2000 г.	2006 г.
Категория СКС:	Кат. 3	Кат. 5	Кат. 5е	Кат. 6а
- макс. частота, МГц;	16	100	100	500
- принятие стандарта СКС;	1985 г.	1992 г.	1999 г.	2007 г.
- рекомендована стандартами как минимально допустимая	1990 г.	1995 г.	1999–2002 гг.	2010–2014 гг.
Срок службы СКС:	Кат. 3	Кат. 5	Кат. 5е	Кат. 6а
- завершение выпуска;	1997 г.	2000 г.	–	–
- время производства;	12 лет	8 лет	по наст. время	по наст. время
- находится в эксплуатации	–	–	15 лет	7 лет

Проведя сравнительный анализ представленных проводников, можно сразу исключить два из них: кабели 6а и 7 категорий. Причина в их избыточности для данного проекта.

Таким образом, остаются два стандарта кабелей: 5е и 6. По совокупности таких качеств, как удобство монтажа, общий уровень внутренних помех в здании, а также соотношение цены к требуемым параметрам. Исходя из этого, наиболее оптимальным решением для использования в здании администрации города можно считать витую пару 5е категории.

Исходя из описанных выше способов проектирования СКС, наиболее эффективным можно считать способ «Ажио»,

Список источников

1. Васильков А.В., Васильков А.А., Васильков И.А. Информационные системы и их безопасность: учеб. пособие. М.: Форум, 2017. 528 с.
2. Горбенко А.О. Информационные системы в экономике. М.: БИНОМ ЛЗ, 2016. 292 с.
3. Гришин А.В. Промышленные информационные системы и сети: практ. руководство. М.: Радио и связь, 2016. 176 с.
4. Золотова Е.В. Основы кадастра: Территориальные информационные системы: учеб. для вузов. М.: Фонд «Мир», Акад. Проект, 2016. 416 с.
5. Исаев Г.Н. Информационные системы в экономике. М.: Омега-Л, 2017. 462 с.
6. The Cabletron Systems Guide to Local Area Networking. Cabletron Systems Ltd, 2016. 600 p.
7. Информационные технологии и вычислительные системы: Высокопроизводительные вычислительные системы. Математическое моделирование. Методы обработки информации / Под ред. С.В. Емельянова. М.: Ленанд, 2018. 100 с.
8. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Л.: Луч, 2015. 220 с.
9. Курочкин М.В. Основы проектирования СКС. М.: Красный свет, 2016. 95 с.

так как он не избыточен как «Calcolo esatto» и не столь требователен как способ «Умеренной скаредности».

Выводы

Исходя из описанных выше способов проектирования структурированных кабельных систем, наиболее эффективным можно считать способ «Ажиро», так как он не избыточен как «Calcolo esatto» и не столь требователен как способ «Умеренной скаредности».

Результаты, полученные в ходе работы над статьёй, позволяют на основе изученных способов определить оптимальный подход для организации сети в реалиях индивидуальной задачи.

10. Семёнов А.Б. Структурированные кабельные системы. Л.: Лунный свет, 2017. 112 с.
11. Бурдашев М.И. Прокладка кабелей как искусство. Л.: Лунный свет, 2015. 75 с.
12. Дудкин Г.И. Как не запутаться в стандартах IEEE. М.: Красный свет, 2016. 121 с.
13. Сапожков М.Д. Тонкости выбора витой пары. Новосибирск: Пилигрим, 2012. 215 с.
14. Семёнов А.Б. Проектирование и расчет структурированных кабельных систем и их компонентов. Киров: Первый свет, 2017. 150 с.
15. Косарев В.П. Компьютерные системы и сети: учеб.е пособие. М.: Финансы и статистика, 2018. 462 с.
16. Кравчук Г.К. Аппаратные средства локальных сетей: энциклопедия. Петрозаводск: Юрайт, 2017. 210 с.
17. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. М.: Аспект-Пресс, 2019. 632 с.

References

1. Vasil'kov A.V., Vasil'kov A.A., Vasil'kov I.A. *Informatsionnye sistemy i ikh bezopasnost': uchebnoe posobie* [Information Systems and Their Security: Study Guide.] Moscow, Forum Publ., 2017. 528 p. [in Russian].

2. Gorbenko A.O. *Informatsionnye sistemy v ekonomike* [Information Systems in the Economics] Moscow, BINOM LZ Publ., 2016. 292 p. [in Russian].
3. Grishin A.V. *Promyshlennye informatsionnye sistemy i seti: prakticheskoe rukovodstvo* [Industrial Information Systems and Networks: a Practical Guide]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2016. 176 p. [in Russian].
4. Zolotova E.V. *Osnovy kadastra: Territorial'nye informatsionnye sistemy: uchebnik dlya vuzov* [Fundamentals of the Cadastre: Territorial Information Systems: Textbook for Universities]. Moscow, Fond «Mir», Akad. Proekt, 2016. 416 p. [in Russian].
5. Isaev G.N. *Informatsionnye sistemy v ekonomike: uchebnik dlya studentov vuzov* [Information Systems in the Economics]. Moscow, Omega-L Publ., 2017. 462 p. [in Russian].
6. *The Cabletron Systems Guide to Local Area Networking*. Cabletron Systems Ltd, 2016. 600 p.
7. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy: Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy. Matematicheskoe modelirovanie. Metody obrabotki informatsii* [Information Technology and Computing Systems: High Performance Computing Systems. Mathematical Modeling. Methods of Information Processing]. Ed. by S.V. Emel'yanov. Moscow, Lenand Publ., 2018. 100 p. [in Russian].
8. Olifer V.G. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols]. Leningrad, Luch Publ., 2015. 220 p. [in Russian].
9. Kurochkin M.V. *Osnovy proektirovaniya SKS* [Fundamentals of SCS Design]. Moscow, Krasnyi svet Publ., 2016. 95 p. [in Russian].
10. Semenov A.B. *Strukturirovannyye kabel'nye sistemy* [Structured Cabling Systems]. Leningrad, Lunnyi svet Publ., 2017. 112 p. [in Russian].
11. Burdashev M.I. *Prokladka kabelei kak iskusstvo* [Cable Laying as an Art]. Leningrad, Lunnyi svet Publ., 2015. 75 p. [in Russian].
12. Dudkin G.I. *Kak ne zaputat'sya v standartakh IEEE* [How Not to Get Confused in the IEEE Standards]. Moscow, Krasnyi svet Publ., 2016. 121 p. [in Russian].
13. Sapozhkov M.D. *Tonkosti vybora vitoi pary* [The Subtleties of Choosing a Twisted Pair]. Novosibirsk, Piligrim Publ., 2012. 215 p. [in Russian].
14. Semenov A.B. *Proektirovanie i raschet strukturirovannykh kabel'nykh sistem i ikh komponentov* [Design and Calculation of Structured Cabling Systems and Their Components]. Kirov, Pervyi svet Publ., 2017. 150 p. [in Russian].
15. Kosarev V.P. *Komp'yuternye sistemy i seti: uchebnoe posobie* [Computer Systems and Networks: Textbook]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2018. 462 p. [in Russian].
16. Kravchuk G.K. *Apparatnye sredstva lokal'nykh setei: entsiklopediya* [Local Area Network Hardware: An Encyclopedia]. Petrozavodsk, Yurait Publ., 2017. 210 p. [in Russian].
17. Semenov A.B. *Volokonno-opticheskie podsistemy sovremennykh SKS* [Fiber-Optic Subsystems of Modern SCS.] Moscow, Aspekt-Press Publ., 2019. 632 p. [in Russian].



Виктор Григорьевич Крымский
Victor G. Krymsky

*доктор технических наук, профессор,
профессор Института экономики и сервиса,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*



Фарит Маратович Ахмеджанов
Farit M. Akhmedzanov

*кандидат технических наук, доцент,
доцент Института экономики и сервиса,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*

УДК 519.873:007.5

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-128-138

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА SLIM

Актуальность

Модель и соответствующий ей метод «Success Likelihood Index Method» (SLIM), то есть «Метод индекса правдоподобия успеха», относятся к первому поколению моделей и методов, созданных для анализа надежности человека-оператора в сложных технологических системах. В течение почти сорока лет своего существования они применялись для оценки вклада человеческого фактора в надежность разнообразных систем и объектов. Результаты этого применения подтвердили их эффективность.

Тем не менее, подход, лежащий в основе SLIM, обладает рядом недостатков. Главным из них является необходимость задания экспертами фиксированных («точечных») значений показателей, характеризующих факторы, которые влияют на вероятности ошибок человека-оператора. Кроме того, требуется располагать хотя бы двумя фиксированными значениями такой вероятности. В то же время получение указанных априорных значений вероятности на основе опытных данных в реальных ситуациях затруднительно.

Цель исследования

В данной работе ставится задача усовершенствовать традиционную версию метода SLIM, устранив отмеченные недостатки. Главная цель – предоставить эксперту возможность называть не точечные значения рассматриваемых показателей, а интервалы этих значений. Таким образом, осуществляется переход к интервальным моделям неопределенностей, что делает выводы более адекватными реальным условиям.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели привлекаются описания переменных и функций, используемых в рамках интервального анализа. На практике это означает возможность поиска таких решений, которые верны не только для фиксированных значений исходных данных, но и для ограниченных множеств этих значений.

Результаты

Разработаны модифицированная версия модели и соответствующего ей метода SLIM, которые позволяют оперировать информацией о границах интервалов величин, участвующих в расчетах вероятностей успешного выполнения задания. Итоговая вероятность также определяется с точностью до границ интервала принимаемых ею значений. Приведен численный пример, демонстрирующий основные этапы вычислений с помощью новой модели.

Ключевые слова: надежность человека-оператора, модель и метод SLIM, интервальные модели неопределенностей

APPLICATION OF INTERVAL MODELS OF UNCERTAINTIES TO ASSESSING HUMAN OPERATOR RELIABILITY BY SLIM METHOD

Relevance

The model «Success Likelihood Index Method» (SLIM) and its corresponding method belong to the first generation of models and methods designed to analyze the reliability of a human operator in complex technological systems. For almost forty years of their existence, they have been used to assess the contribution of the human factor to the reliability of various systems and objects. The results of this application confirmed their effectiveness.

However, the approach underlying SLIM has a number of disadvantages. The main one is the need for experts to set fixed («point») values of indices characterizing the factors that affect the probabilities of errors of a human operator. In addition, it is required to have at least two fixed values of such a probability. At the same time, obtaining these a priori probability values based on experimental data in real situations is difficult.

Aim of research

In this work, the task is to improve the traditional version of the SLIM method by eliminating the noted shortcomings. The main goal is to provide the expert with the opportunity to give not the point values of the indices under consideration, but the intervals of these values. Thus, the transition to interval models of uncertainties is carried out, which makes the conclusions more adequate to real conditions.

Research methods

To achieve this goal, descriptions of variables and functions used in the framework of interval analysis are used. In practice, this means the possibility of finding solutions that are true not only for fixed values of the initial data, but also for limited sets of these values.

Results

A modified version of the model and the corresponding SLIM method have been developed, which allow one to operate with information about the bounds of the intervals of values involved in calculating the probabilities of successful task completion. The final probability is also determined up to the bounds of the range of its values. A numerical example is presented that demonstrates the main stages of calculations using the new model.

Keywords: human reliability, SLIM model and method, interval uncertainty model

Введение

Влияние человеческого фактора на возможность возникновения техногенных аварий и катастроф остается чрезвычайно высоким [1–5]. По указанной причине разработка и алгоритмизация методов анализа человеческой надежности (в зарубежной литературе, а также в между-

народных стандартах – «Human Reliability Analysis» или сокращенно HRA) уже несколько десятилетий привлекают к себе внимание исследователей и практиков. В настоящее время говорят о трех поколениях моделей HRA, появившихся в разные годы и обладающих различными свойствами и особенностями [4]. Многие

из этих моделей включены в стандарт ГОСТ Р МЭК 62508-2014 «Менеджмент риска. Анализ влияния на надежность человеческого фактора». В их числе – модель и основанный на ней метод «Success Likelihood Index Method» (SLIM), то есть «Метод индекса правдоподобия успеха», которые относятся еще к первому поколению моделей и методов HRA, но, тем не менее, продолжают активно использоваться для анализа реальных ситуаций. Метод SLIM впервые предложили Д. Эмбрей и др. в 1984 г. [6]. SLIM представляет собой аналитический подход к выполнению HRA. Он предполагает первоначальное оценивание факторов, влияющих на способности и поведение человека-оператора (так называемых «Performance Shaping Factors» или PSF) с последующим вычислением показателя SLI («Success Likelihood Index», то есть «индекс правдоподобия успеха») и переходом к получению вероятности человеческой ошибки HEP («Human Error Probability») с учетом имеющихся реальных данных.

Метод состоит из двух модулей [6, 7]:

а) MAUD («Multi-Attribute Utility Decomposition» или «многоатрибутная декомпозиция полезности») осуществляет вычисление индекса правдоподобия успеха (отсутствия ошибки) при выполнении рассматриваемых задач, принимая во внимание значения PSF;

б) SARAH («Systematic Approach to the Reliability Assessment of Humans», или «систематический подход к оценке надежности людей») привлекает данные о найденных на практике значениях HEP, чтобы окончательно оценить вероятность ошибки.

Применение метода обычно включает 10 последовательных шагов или этапов [5, 6], кратко описанных ниже. При этом шаги 1–7 относятся к модулю SLIM — MAUD, а шаги 8–10 — к модулю SLIM — SARAH.

Определение ситуаций, по отношению к которым осуществляется экспертное оценивание PSF

На данном этапе фиксируется множество задач, решаемых оператором или коллективом операторов, а также рассматриваются обстоятельства (факторы), влияющие на успех решения этих задач применительно к различным ситуациям. Параллельно формируется группа экспертов, способных систематизировать названные факторы и далее выполнить их количественную оценку. Результаты систематизации целесообразно обсудить с экспертами до начала процедуры оценивания. Это позволяет проклассифицировать ситуации с точки зрения влияния однородных факторов, что создает предпосылки для разбиения всего множества ситуаций на подмножества.

Выявление и составление перечня PSF

Каждому эксперту предлагается на рассмотрение случайный набор из описаний трех процессов выполнения задач в той или иной ситуации. При этом требуется сопоставить один из этих процессов с двумя другими и найти тот признак, который обуславливает отличие и который в конечном счете влияет на успешность решения задачи. Например, таким признаком (влияющим фактором) может быть «стресс ввиду дефицита располагаемого времени». Данный фактор выбирается в качестве PSF. Другими примерами PSF могут быть «сложность работы в неблагоприятной обстановке» или «несогласованность командной работы». При этом необходимо выделить и перечислить именно те факторы, которые в наибольшей степени влияют на возможность успешного / неуспешного решения задач, а не все существующие.

Количество выбранных факторов обозначим M .

Присваивание количественных значений выявленным влияющим факторам (PSF) для рассматриваемых процессов выполнения задач

Для измерения каждого такого фактора вводится линейная шкала от 1 до 9, и эксперт, анализируя конкретный процесс выполнения задачи, присваивает соответствующему PSF значение из этого интервала. В данном случае 1 характеризует ситуацию с наименьшим проявлением данного фактора, а 9 — с наибольшим. Желательно так организовать процесс экспертного оценивания, чтобы количественные меры каждого фактора задавались независимо от мер, присвоенных другим факторам.

Выявление опорных значений PSF и нормировка

Данный этап реализуется в том случае, если эксперты могут назвать некоторое «опорное» значение каждого PSF, которое характеризует номинальное влияние этого фактора на выполнение задачи. Под номинальным влиянием понимается создание таких условий, когда как уменьшение, так и увеличение PSF по отношению к соответствующему значению фактора может приводить к ухудшению ситуации. Например, вероятность ошибки оператора может возрастать не только тогда, когда у него мало времени на принятие решения, но и тогда, когда этот резерв времени слишком велик. Если опорные значения названы, то осуществляется перемасштабирование всех значений PSF, расположенных на рассматриваемой шкале, в зависимости от расстояний от опорных точек. Такой процесс нормирования продолжается до тех пор, пока не будут рассмотрены все факторы, и эксперты не придут к согласию, что значения этих факторов (i — номер фактора, а j — номер задачи, решаемой человеком-

оператором) расположены правильно на выбранной шкале.

Проверки независимости

На этом этапе необходимо убедиться, что в формируемой вычислительной схеме учитываются именно разные PSF, принимающие свои, независимые от других значения применительно к своим шкалам. Для этого, в частности, могут оцениваться корреляции полученных значений, измеренных по соответствующим шкалам. В случае высоких корреляций целесообразно проконсультироваться с экспертами и, может быть, заменить два фактора с двумя шкалами одним фактором с одной общей шкалой. Если корреляции невысоки, можно считать соответствующие факторы и их шкалы независимыми.

Взвешивание факторов

Всем рассматриваемым PSF присваиваются веса W_i , $i = 1, 2, \dots, M$, которые показывают, насколько значимый вклад в вероятность успешного или неуспешного выполнения человеком поставленных задач вносит тот или иной фактор. В сложившейся практике обычно поступают таким образом: совместно с экспертами анализируют факторы попарно и делают вывод, какой из факторов влияет на результат в большей степени. Процедура часто носит итеративный характер. Для выбранных весов должно выполняться равенство

$$\sum_{i=1}^M W_i = 1. \quad (1)$$

Расчет индексов правдоподобия успеха

Указанные индексы SLI_j для каждой j -ой задачи ($j = 1, 2, \dots, N$) вычисляются согласно соотношению:

$$SLI_j = \sum_{i=1}^M W_i R_{ij}. \quad (2)$$

Именно SLI_j служат основой для дальнейшего оценивания вероятностей ошибок или успешных действий человека.

Преобразование найденных значений индексов в вероятности успеха

В рамках данного метода предполагается, что между логарифмом вероятности успеха P_j при выполнении j -ой задачи и величиной SLI_j существует линейная зависимость

$$\log P_j = a_j SLI_j + b_j. \quad (3)$$

Здесь a_j, b_j — коэффициенты, которые вычисляются исходя из равенства (3) с использованием значений вероятности и индексов правдоподобия успеха для двух ситуаций, по которым имеется реальная накопленная статистика.

Анализ границ («размаха») неопределенности

Это исследование во многом аналогично определению доверительных интервалов при оценивании статистических характеристик. В то же время ввиду отсутствия реальной статистики для его реализации обычно привлекают экспертов, чьи суждения далее обрабатываются по существующим методикам (в числе наиболее известных можно назвать методику «Absolute Probability Judgment» или «Суждение об абсолютной вероятности» [8]).

Анализ соотношения «затраты-достигаемый эффект» с использованием SLIM-SARAH

В связи с тем, что конечной целью исследования является не просто оценивание вероятностей ошибок человека, а поиск путей уменьшения этих вероятностей, встает вопрос: в какой степени надо стараться изменить PSF, чтобы добиться серьезных улучшений в желаемом смысле? Иными словами, следует проверить чувствительность вероятности ошибки к изменениям PSF. Таковую проверку можно осуществить с использованием сформированной модели SLIM-

SARAH. Ее результаты покажут, насколько большие затраты потребуются для достижения эффекта и будут ли эти затраты оправданными.

В течение почти сорока лет своего существования модель и метод SLIM (иногда в сочетании с более современными подходами, в частности, основанными на байесовских сетях [9]) применялись для оценки вклада человеческого фактора в надежность разнообразных систем и объектов. Результаты этого применения подтвердили их эффективность [10–12].

Тем не менее, подход, лежащий в основе SLIM, обладает рядом недостатков. Главным из них является необходимость задания экспертами фиксированных («точечных») значений показателей, характеризующих PSF, а также весовых коэффициентов для этих показателей. На практике эксперту намного проще задать не фиксированные значения, а интервалы возможных значений указанных показателей и весов, причем такие результаты экспертного оценивания, учитывающие неопределенность, оказываются значительно более адекватными реальному положению дел. Кроме того, в рамках традиционного варианта SLIM для расчета вероятности успеха либо ошибки человека-оператора в соответствии с соотношением (3) требуется располагать хотя бы двумя фиксированными значениями такой вероятности, полученными заранее на базе накопленной статистики. Очень часто подобная статистика отсутствует. В этих условиях было бы целесообразным заменить два «точечных» значения вероятности P_j которые предполагаются известными, двумя экспертными оценками этой величины, полученными для двух наиболее знакомых экспертам сочетаний PSF и весовых коэффициентов. По отмеченным выше причинам такие оценки также удобнее задавать в

виде интервалов возможных величин вероятностей.

Основываясь на сказанном, рассмотрим возможность перехода к интервальным моделям неопределенностей при реализации метода SLIM. Фактически, это означает формирование новой модификации данного метода.

Модификация метода SLIM, основанная на использовании интервальных моделей неопределенностей

В дальнейшем будем предполагать, что вместо фиксированных значений показателей R_{ij} , характеризующих PSF, а также весовых коэффициентов W_i экспертами названы нижние $\underline{R}_{ij}, \underline{W}_i$ и верхние $\overline{R}_{ij}, \overline{W}_i$ границы интервалов, которым могут принадлежать эти значения. Иными словами,

$$R_{ij} \in [\underline{R}_{ij}, \overline{R}_{ij}], \quad W_i \in [\underline{W}_i, \overline{W}_i],$$

$$i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае вычисление с помощью равенства (2) следует производить, используя правила так называемой «стандартной» интервальной арифметики [13–16]. Их можно записать применительно к действиям над двумя интервальными величинами A и B , где

$$A = [\underline{a}, \overline{a}], \quad B = [\underline{b}, \overline{b}] : \quad (5)$$

$$A + B = [\underline{a} + \underline{b}, \overline{a} + \overline{b}], \quad (6)$$

$$A - B = [\underline{a} - \overline{b}, \overline{a} - \underline{b}], \quad (7)$$

$$A \cdot B = [\min\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\overline{b}, \overline{a}\underline{b}, \overline{a}\overline{b}\}, \max\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\overline{b}, \overline{a}\underline{b}, \overline{a}\overline{b}\}], \quad (8)$$

для $A/B = A \cdot [1/\overline{b}, 1/\underline{b}]$ для $B \neq 0$. (9)

Тогда, учитывая (2), (6) и (8), а также тот факт, что

$$0 \leq \underline{R}_{ij} < \overline{R}_{ij}, \quad 0 \leq \underline{W}_i < \overline{W}_i,$$

$$i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

находим

$$\underline{SLI}_j = \sum_{i=1}^M \underline{W}_i \underline{R}_{ij}, \quad \overline{SLI}_j = \sum_{i=1}^M \overline{W}_i \overline{R}_{ij}. \quad (11)$$

Здесь $\underline{SLI}_j, \overline{SLI}_j$ — нижняя и верхняя границы интервала значений индекса правдоподобия успеха SLI_j , то есть

$$SLI_j \in [\underline{SLI}_j, \overline{SLI}_j], \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (12)$$

Как отмечалось выше, переход от SLI_j к вероятностям успешного выполнения задачи осуществляется с помощью формулы (3). В традиционной версии метода SLIM предполагается, что существуют такие два значения $SLI_j = SLI_j^*, SLI_j = SLI_j^{**}$, для которых известны соответствующие величины вероятности $P_j = P_j^*, P_j = P_j^{**}$, найденные по результатам обработки реальных статистических данных.

Тогда на основе (3) получаем выражение для коэффициента :

$$a_j = (\log P_j^* - \log P_j^{**}) / (SLI_j^* - SLI_j^{**}) =$$

$$= \frac{\log(P_j^*/P_j^{**})}{(SLI_j^* - SLI_j^{**})}, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

В то же время достаточный объем статистических данных, позволяющих достоверно определить соответствующие вероятности успешного выполнения задачи для двух заданных значений SLI_j обычно отсутствует. В этих условиях представляется единственно возможным получить такую информацию от экспертов. Здесь следует иметь в виду, что назвать две фиксированные величины вероятности применительно к двум заданным значениям SLI_j экспертам крайне затруднительно. Существенно проще для них указать интервалы, которым принадлежат эти величины вероятностей. Таким образом, приходим к ситуации, когда P_j^*, P_j^{**} известны с точностью до нижних $\underline{P}_j^*, \underline{P}_j^{**}$ и верхних $\overline{P}_j^*, \overline{P}_j^{**}$ границ интервалов принимаемых ими значений:

$$P_j^* \in [\underline{P}_j^*, \overline{P}_j^*], \quad P_j^{**} \in [\underline{P}_j^{**}, \overline{P}_j^{**}],$$

$$j = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

Условимся далее рассматривать формулировки PSF в такой форме, при которой увеличение характеризующих их показателей приводит к уменьшению вероятности выполнения задачи. Например, возрастание показателей таких факторов, как «стресс ввиду дефицита времени», «недостаточная степень

обучения персонала» или «несогласованность командной работы» неизбежно приведет к снижению P_j . По указанной причине соотношение $SLI_j^* > SLI_j^{**}$ соответствует неравенству $P_j^* < P_j^{**}$. В ситуации, когда указанные вероятности по результатам экспертного рассмотрения оценены в виде интервалов, будем считать, что

$$0 < \underline{P}_j^* < \overline{P}_j^* \leq \underline{P}_j^{**} < \overline{P}_j^{**}, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

Поэтому коэффициент тоже оказывается интервальной величиной

$$a_j \in [\underline{a}_j, \overline{a}_j], \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (16)$$

и

$$\begin{aligned} \underline{a}_j &= \log(\underline{P}_j^* / \overline{P}_j^{**}) / (SLI_j^* - SLI_j^{**}), \\ \overline{a}_j &= \log(\overline{P}_j^* / \underline{P}_j^{**}) / (SLI_j^* - SLI_j^{**}), \\ j &= 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (17)$$

Для нахождения коэффициента b_j можно также воспользоваться уравнением (3) применительно к одному из известных сочетаний SLI_j и P_j :

$$b_j = \log P_j^* - SLI_j^* / (SLI_j^* - SLI_j^{**}) \log(P_j^* / P_j^{**}), \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (18)$$

Обозначим $SLI_j^* / (SLI_j^* - SLI_j^{**}) = S_j$.

Тогда

$$b_j = \log P_j^* - \log(P_j^* / P_j^{**})^{S_j} = \log \left((P_j^{**})^{S_j} / (P_j^*)^{(S_j-1)} \right), \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (19)$$

Если рассматривать P_j^* и P_j^{**} как интервальные величины согласно описанному выше подходу, то b_j также становится интервальной величиной:

$$b_j \in [\underline{b}_j, \overline{b}_j], \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (20)$$

При этом

$$\begin{aligned} \underline{b}_j &= \log \left((\underline{P}_j^{**})^{S_j} / (\overline{P}_j^*)^{(S_j-1)} \right), \\ \overline{b}_j &= \log \left((\overline{P}_j^{**})^{S_j} / (\underline{P}_j^*)^{(S_j-1)} \right), \quad j = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (21)$$

Окончательно, основываясь на выражениях (3), (17) и (21), запишем равенства, характеризующие нижнюю \underline{P}_j и верхнюю \overline{P}_j границы интервала значений P_j для произвольных границ интервала индекса правдоподобия успеха SLI_j :

$$\underline{P}_j = \exp(\underline{a}_j \overline{SLI}_j + \underline{b}_j),$$

$$\overline{P}_j = \exp(\overline{a}_j \underline{SLI}_j + \overline{b}_j), \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (22)$$

При составлении равенств (22) принято во внимание, что $a_j < 0$, $b_j > 0$.

Между тем, аппроксимация (3) зависимости $\log P_j$ от SLI_j , предложенная авторами метода SLIM в работах [6, 7], не учитывает того факта, что должно выполняться $P_j \leq 1$. Поэтому если какая-либо из границ интервала значений искомой вероятности, найденных с помощью равенств (22), окажется больше 1, необходимо зафиксировать эту границу, приравняв ее к 1.

Проиллюстрируем применение новой (интервальной) модификации метода SLIM численным примером.

Проанализируем надежность человека-оператора, осуществляющего производственную деятельность, в ходе которой ему необходимо последовательно выполнить две задачи (то есть $N = 2$).

С участием экспертов был составлен перечень из трех PSF, наиболее значимых для выполнения каждой из задач ($M = 3$). После этого экспертами были оценены нижние и верхние границы интервалов для значений показателей, характеризующих выбранные факторы. Также экспертами были оценены интервалы значений весовых коэффициентов. Результаты такого анализа приведены в таблице 1.

С помощью формул (11) применительно к приведенным данным получаем: $\underline{SLI}_1 = 1.4$, $\overline{SLI}_1 = 4.8$, $\underline{SLI}_2 = 5.2$, $\overline{SLI}_2 = 8.4$.

Далее экспертами были выбраны значения индекса правдоподобия успеха при выполнении первой и второй задачи $SLI_1^* = 5.8$, $SLI_1^{**} = 3.5$, $SLI_2^* = 2.0$, $SLI_2^{**} = 1.5$, для которых они смогли дать оценки вероятности выполнения каждой из этих задач:

$$\begin{aligned} \underline{P}_1^* &= 0.45, \quad \overline{P}_1^* = 0.55, \quad \underline{P}_1^{**} = 0.67, \quad \overline{P}_1^{**} = 0.73, \\ \underline{P}_2^* &= 0.38, \quad \overline{P}_2^* = 0.42, \quad \underline{P}_2^{**} = 0.51, \quad \overline{P}_2^{**} = 0.58. \end{aligned}$$

Таблица 1. Результаты экспертного оценивания влияния PSF**Table 1.** Results of expert judgement on the impact of PSF

Номер задачи, j	Номер фактора (PSF), i	Формулировка PSF	R _{ij}	W _{ij}
1	1	Стресс ввиду дефицита времени	[4, 5]	[0.1, 0.3]
	2	Несогласованность работы в команде	[1, 3]	[0.5, 0.7]
	3	Отсутствие необходимых навыков из-за недостаточного обучения	[5, 6]	[0.1, 0.2]
2	1	Стресс ввиду дефицита времени	[2, 3]	[0.5, 0.6]
	2	Несогласованность работы в команде	[5, 7]	[0.2, 0.3]
	3	Отсутствие необходимых навыков из-за недостаточного обучения	[8, 9]	[0.4, 0.5]

На основе равенств (17) и (21) можно найти интервальные оценки коэффициентов аппроксимации зависимости $\log P_j$ от SLI_j :

$$\underline{a}_1 = -0.210, \bar{a}_1 = -0.086, \underline{a}_2 = -0.846, \bar{a}_2 = -0.388, \\ \underline{b}_1 = -0.100, \bar{b}_1 = 0.421, \underline{b}_2 = -0.091, \bar{b}_2 = 0.723.$$

Окончательно с использованием соотношений (22) вычисляем

$$\underline{P}_1 = 0.330, \bar{P}_1 = 1, \underline{P}_2 = 0.001, \bar{P}_2 = 0.274.$$

Заметим, что из выражений (23) при оценке верхней границы вероятности в первой задаче получалось значение 1.351, и эта граница была зафиксирована на уровне $\bar{P}_1 = 1$.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Вероятность выполнения оператором первой задачи может быть достаточно высокой (вплоть до 1), но нижняя граница интервала значений этой вероятности составляет лишь 0.330; это заставляет задуматься над принятием мер, чтобы в условиях неопределенности влияние неблагоприятных факторов не оказалось решающим.

В то же время особое внимание должно быть обращено на вторую задачу, где даже самый благоприятный прогноз вероятности успеха дает величину только 0.274. В особенности необходимо повысить степень обучения персонала, стара-

ясь снизить неблагоприятный эффект от влияния соответствующего PSF.

Также важно понимать, что ширина каждого из полученных интервалов вероятности отражает имеющуюся неопределенность. С этой точки зрения, найденные интервальные оценки более адекватны фактическим условиям, чем фиксированные (точечные) значения, для определения которых приходится вводить дополнительные допущения.

Выводы

Использование интервальных моделей неопределенностей создает новые перспективы для развития методов оценивания надежности человека-оператора в составе сложных технологических систем. Такой подход, как уже показано авторами в предыдущих публикациях по данному направлению [17–19], позволяет находить оценки вероятностей выполнения или невыполнения оператором поставленных задач, отказавшись от ряда не вполне обоснованных допущений.

В данной статье рассмотрена возможность усовершенствования известного метода SLIM, по отношению к которому предложено перейти от фиксированных (точечных) значений вероятностей, а также других величин, участвующих в расчетах, к интервалам принимаемых ими значений. Получаемые в результате

оценки надежности человека-оператора более адекватны имеющейся неопределенности. Особое внимание следует обратить на нижние границы интервалов вероятностей успешного выполнения поставленных задач: они указывают на то, какой надежности оператора можно ожидать в наихудшем случае.

В рамках дальнейшей работы авторы планируют так модифицировать полученный алгоритм, чтобы учесть зависимость параметров модели и вычисляемых веро-

ятностей от времени. В связи с тем, что законы распределения величин, зависящих от времени, чаще всего оказываются неизвестными, предполагается ориентироваться на применение аппарата интервальнозначных вероятностей [20–24]. Это должно создать благоприятные предпосылки к нахождению информативных решений при анализе человеческой надежности в условиях высокого уровня неопределенности.

Список источников

1. Хамитов Р.З., Крымский В.Г., Павлов С.В. Построение системы стратегического управления безопасностью населения субъекта Российской Федерации (опыт Республики Башкортостан). Уфа: Экология, 1999. 109 с.
2. Di Pasquale V., Iannone R., Miranda S., Riemma S. An Overview of Human Reliability Analysis Techniques in Manufacturing Operations // *Operations Management* (V.V. Shiraldi, ed., Chapter 9). Rijeka, Croatia: InTech Publ., 2013. P. 221-240.
3. Calixto E. Gas and Oil Reliability Engineering: Modeling and Analysis. Waltham, the USA: Gulf Professional Publishing, 2013. 545 p.
4. Norazahar N.B. Human Factors Risk Assessment // *Methods in Chemical Process Safety*. 2020. Vol. 4. P. 289-302.
5. Zarei E., Khan F., Abbassi R. Importance of Human Reliability in Process Operation: A Critical Analysis // *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, Vol. 211, Publ. 107607. 10 p.
6. Embrey D.E., Humpfreys P., Rosa E.A., Kirwan B., Rea K. SLIM-MAUD: An Approach to Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgment // NUREG. CR-3518. 1984. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1984. Vol. II: Detailed Analysis of the Technical Issues.
7. Rosa E.A., Humpfreys P., Spettell C.M., Embrey D.E. Application of SLIM-MAUD: A Test of Interactive Computer-Based Method for Organizing Expert Assessment of Human Performance and Reliability // NUREG. CR-4016. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1985. Vol. I: Main Report.
8. Stojiljković E., Bijelić B., Cvetković M. Using Absolute Probability Judgment Method for Human Reliability Assessment – A Case Study // *Safety Engineering*, 2017. Vol. 7. No. 2. P. 79-84.
9. Abrishami S., Khakzad M., Hosseini S.M., van Gelder P. BN-SLIM: Bayesian Network Methodology for Human Reliability Assessment Based on Success Likelihood Index Method (SLIM) // *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, Vol. 193, Publ. 106647. 10 p.
10. Calixto E., Lima G.B.A., Firmino P.R.A. Comparing SLIM, SPAR-H and Bayesian Network Methodologies // *Open Journal of Safety Science and Technology*. 2013. Vol. 3. P. 31-41.
11. Santiasih I., Ratriwardhani R.A. Human Error Probability Analysis Using Success Likelihood Index Method (SLIM) Approach in Grinding Activities // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Publ. 012027. 10 p.
12. Fedosov A.V., Khamitova A.N., Abdrahmanova K.N., Abdrakhmanov N.Kh. Assessment of the Human Factor Influence on the Accident Initiation in the Oil and Gas Industry // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2018. № 1-2. С. 62-80.
13. Moore R.E. Interval Analysis. Englewood Cliff, NJ, the USA: Prentice-Hall, 1966. 159 p.
14. Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986. 222 с.
15. Shary S.P. Solvability of Interval Linear Equations and Data Analysis under Uncertainty

// Automation and Remote Control. 2012. Vol. 73. No. 2. P. 310-322.

16. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: XYZ, 2021. 653 с.

17. 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. 81-91.

18. 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.

19. Ахмеджанов Ф.М., Крымский В.Г., Кузеев И.Р. Интервальнозначные вероятности и усовершенствование методов анализа надежности человеческого фактора: новые модели и новые перспективы // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Международная научная конференция. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 58-63.

20. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели. М.: Советское радио, 1991. 352 с.

21. Walley P. Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities. London: Chapman and Hall, 1991. 719 p.

22. Kozine I.O., Filimonov Y.V. Imprecise Reliabilities: Experiences and Advances // Reliability Engineering and System Safety. 2000. Vol. 67. P. 75-83.

23. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Characteristics Under Expert-Provided Bounds on Probability Density Functions // Lecture Notes in Computer Science. 2006. Vol. 3732. P. 151-160.

24. Kozine I., Krymsky V. Computing Interval-Valued Reliability Measures: Application of Optimal Control Methods // International Journal of General Systems. 2017. Vol. 46. No. 2. P. 144-157.

References

1. Khamitov R.Z., Krymskii V.G., Pavlov S.V. *Postroenie sistemy strategicheskogo upravleniya bezopasnost'yu naseleniya sub'ekta Rossiiskoi Federatsii (opyt Respubliki*

Bashkortostan) [Creation of a System of Strategic Management of the Safety of Population of a Constituent Entity of the Russian Federation (the Experience of the Republic of Bashkortostan)]. Ufa, Ekologiya Publ., 1999. 109 p. [in Russian].

2. Di Pasquale V., Iannone R., Miranda S., Riemma S. *An Overview of Human Reliability Analysis Techniques in Manufacturing Operations. Operations Management* (V.V. Shiraldi, ed., Chapter 9). Rijeka, Croatia, InTech Publ., 2013, pp. 221-240.

3. Calixto E. *Gas and Oil Reliability Engineering: Modeling and Analysis*. Waltham, the USA, Gulf Professional Publishing, 2013. 545 p.

4. Norazahar N.B. Human Factors Risk Assessment. *Methods in Chemical Process Safety*, 2020, Vol. 4, pp. 289-302.

5. Zarei E., Khan F., Abbassi R. Importance of Human Reliability in Process Operation: A Critical Analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, Vol. 211, Publ. 107607. 10 p.

6. Embrey D.E., Humpfreys P., Rosa E.A., Kirwan B., Rea K. SLIM-MAUD: An Approach to Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgment. *NUREG. CR-3518*, 1984. Washington, DC, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1984. Vol. II: *Detailed Analysis of the Technical Issues*.

7. Rosa E.A., Humpfreys P., Spettell C.M., Embrey D.E. Application of SLIM-MAUD: A Test of Interactive Computer-Based Method for Organizing Expert Assessment of Human Performance and Reliability. *NUREG. CR-4016*. Washington, DC, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1985. Vol. I: *Main Report*.

8. Stojiljković E., Bijelić B., Cvetković M. Using Absolute Probability Judgment Method for Human Reliability Assessment – A Case Study. *Safety Engineering*, 2017, Vol. 7, No. 2, pp. 79-84.

9. Abrishami S., Khakzad M., Hosseini S.M., van Gelder P. BN-SLIM: Bayesian Network Methodology for Human Reliability Assessment Based on Success Likelihood Index Method (SLIM). *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, Vol. 193, Publ. 106647. 10 p.

10. Calixto E., Lima G.B.A., Firmino P.R.A. Comparing SLIM, SPAR-H and Bayesian

Network Methodologies. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 2013, Vol. 3, pp. 31-41.

11. Santiasih I., Ratriwardhani R.A. Human Error Probability Analysis Using Success Likelihood Index Method (SLIM) Approach in Grinding Activities. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, Publ. 012027.10 p.

12. Fedosov A.V., Khamitova A.N., Abdrakhmanova K.N., Abdrakhmanov N.Kh. Assessment of the Human Factor Influence on the Accident Initiation in the Oil and Gas Industry. *Territoriya «NEFTEGAZ» – Oil and Gas Territory*, 2018, No. 1-2, pp. 62-80.

13. Moore R.E. *Interval Analysis*. Englewood Cliff, NJ, the USA, Prentice-Hall, 1966. 159 p.

14. Kalmykov S.A., Shokin Yu.I., Yuldashev Z.Kh. *Metody interval'nogo analiza* [Methods of Interval Analysis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 222 p. [in Russian].

15. Shary S.P. Solvability of Interval Linear Equations and Data Analysis under Uncertainty. *Automation and Remote Control*, 2012, Vol. 73, No. 2, pp. 310-322.

16. Shary S.P. *Konechnomernyi interval'nyi analiz* [Finite Dimensional Interval Analysis]. Novosibirsk, XYZ Publ., 2021. 653 p.

17. 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 komplekxy i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 4, pp. 81-91. [in Russian].

18. 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 komplekxy i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2019, Vol. 15, No. 1, pp. 60-69. [in Russian].

19. Akhmedzhanov F.M., Krymskii V.G., Kuzeev I.R. Interval'noznachnye veroyatnosti i usovershenstvovanie metodov analiza nadezhnosti chelovecheskogo faktora: novye modeli i novye perspektivy [Interval-Valued Probabilities and Enhancement of the Methods for Analysis of Human Factor Reliability: New Models and New Perspectives]. «*Modelirovanie i analiz bezopasnosti i riska v slozhnykh sistemakh*» *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya*. [«Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems» International Scientific Conference]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2019, pp. 58-63. [in Russian].

20. Kuznetsov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli* [Interval Statistical Models]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1991. 352 p. [in Russian].

21. Walley P. *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities*. London, Chapman and Hall, 1991. 719 p.

22. Kozine I.O., Filimonov Y.V. Imprecise Reliabilities: Experiences and Advances. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000, Vol. 67, pp.75-83.

23. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Characteristics under Expert-Provided Bounds on Probability Density Functions. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, Vol. 3732, pp. 151-160.

24. Kozine I., Krymsky V. Computing Interval-Valued Reliability Measures: Application of Optimal Control Methods. *International Journal of General Systems*, 2017, Vol. 46, No. 2, pp. 144-157.



Радмир Раилевич Сибэгатуллин
Radmir R. Sibagatullin

*кандидат технических наук,
доцент кафедры вычислительной техники и защиты
информации, Уфимский государственный авиационный
технический университет, Уфа, Россия*

681.518.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-139-147

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННОЙ СРЕДЫ КОМПАНИИ

Актуальность

Эффективность технологии и организация производства в Компании достигается с помощью инвестиций, вложенных в инвестиционные проекты. Развитие инновационной среды, которое менее затратно, – это использование инноваций, поступающих непосредственно от работников Компании. Развитие механизмов сбора и рассмотрения инноваций является актуальным вопросом на сегодняшний момент.

Цель исследования

Основной задачей работы является создание единой информационной системы, которая позволит не только автоматизировать процессы сбора и обработки инициатив и рационализаторских предложений, но и позволит повысить информированность работников.

Методы исследования

Правильная постановка задачи перед инноватором – одна из составляющих успеха, другая — развитие универсальной инновационной среды для инноватора.

Результаты

Развитие и внедрение данной информационной системы позволит увеличить и обеспечить механизмы оперативного общения с инноваторами, а использование обратной связи на всех этапах рассмотрения заявок позволит контролировать и управлять инициированными идеями и предложениями на каждом этапе жизненного цикла. Данная система успешно используется в рамках работы с малыми инновационными предприятиями.

Ключевые слова: информационная среда, инноватор, идея, инициатива, рационализаторское предложение, информационная система, адаптация, инновационная среда, жизненный цикл

INFORMATION SYSTEM FOR THE DEVELOPMENT OF THE INNOVATIVE ENVIRONMENT OF THE COMPANY

Relevance

The efficiency of technology and the organization of production in the company is achieved with the help of investments made in investment projects. The development of an innovative environment that is less costly is the use of innovations coming directly from the Company's employees. The development of mechanisms for collecting and reviewing innovation is relevant today.

Aim of research

The main task of the work is to create a unified information system that will not only automate the processes of collecting and processing initiatives and rationalization proposals, but will also increase the awareness of employees.

Research methods

The correct setting of the task for the innovator is one of the components of success, the other is the development of a universal innovative environment for the innovator.

Results

The development and implementation of this information system will increase and provide mechanisms for operational communication with innovators, and the use of feedback at all stages of consideration of applications will allow to control and manage the initiated ideas and proposals at each stage of the life cycle. This system is successfully used in the framework of work with small innovative enterprises.

Keywords: information environment, innovator, idea, initiative, innovation proposal, information system, adaptation, innovation environment, life cycle

Введение

В представленной работе акцент сделан на универсальную инновационную среду, пути развития и механизмы ее формирования [1–3], о чем я подробно расскажу по ходу статьи.

Ключевые направления стратегии развития отрасли нефтепереработки представлены в Долгосрочной стратегии развития отрасли (данные на основе источника VYGON Consulting, рисунок 1).

Остановимся на трех ключевых направлениях, которые являются наиболее важными для нас:

- модернизация и инвестиции;
- развитие технологий;
- рост модернизации.

Инновации за счет развития инновационной активности, инновационной среды:

- эффективность технологии и организация производства в Компании достигается с помощью инвестиций, вложенных в инвестиционные проекты.

Недостатком является длительный период утверждения самого проекта и бюджета для его реализации (рисунок 2);

- развитие инновационной среды, которое является менее затратным, – это



Рисунок 1. Ключевые направления стратегии развития отрасли

Figure 1. Key directions of the industry development strategy

использование инноваций, поступающих непосредственно от работников Компании. Данное направление имеет сравнительно больше плюсов по сравнению с первым (рисунок 2).



Рисунок 2. Варианты развития технологии и организации производства

Figure 2. Options for the development of technology and organization of production

Достоинства:

- возможность решения проблемы без инвестиций;
- своевременная информация о проблеме на стадии ее возникновения;
- урегулирование конфликтов;

- вовлечение сотрудников и их стимулирование на новаторскую активность;
- единая корпоративная площадка для генерации инновационных идей (рацпредложений), инструмент для подачи предложений;

— обмен знаниями, производство новых знаний без привлечения инвестиций, самообразование и самореализация в процессе работы над проектами.

Методы

Какие вопросы следует, прежде всего, ставить перед инноваторами?

Инновационная активность увеличивает число инноваторов, но инновации должны быть затребованы, и, как следствие, иметь необходимое и достаточное условия успешности, которая характеризуется ключевыми признаками на примере подхода Фалькова и Островского (рисунок 3) [4–6].

Их ромб позволяет оценить проект при экспертном анализе идеи, которую предлагает инноватор Компании:

1. Оценка исследовательского потенциала. На каком уровне исследования?
2. Оценка инновационного потенциала. Какой эффект? Какие изменения повлечет? В чем инновация, новшество?



Рисунок 3. Ромб анализа инновационной активности

Figure 3. Rhombus of innovation activity analysis

3. Оценка технологического потенциала. Какое новое направление? Какая новая эффективная технология?

4. Оценка потенциала рынка. Для каких рынков?

В идеальном случае, если ромб идеи имеет развитие во всех 4-х направлениях, идея считается применимой в Компании.

Рассмотрим другой пример: идея является инновационной, проведены успешные исследования, но нет технологий для ее реализации либо результат идеи (некий продукт) не нужен рынку, тогда идея направляется на дальнейшую доработку или модификацию. Таким образом, данный ромб показывает, что развитие идеи должно проходить параллельно во всех 4-х направлениях.

Правильная постановка задачи перед инноватором – одна из составляющих успеха, следующая – развитие универсальной инновационной среды для инноватора.

Под инновационной средой понимается совокупность систем: предпринима-

тельство, система образования, наука, технико-технологические разработки.

На практике в Компании существует следующая инновационная среда, которая включает в себя (рисунок 4):

- Вовлечение персонала в поиск Идей;
- Система непрерывных улучшений;
- Единое окно: прием инновационных предложений от внешних пользователей;
- Выявление существующих проблем и поиск их решения;
- Поддерживающие проекты, направленные на операционные улучшения;
- Поиск и адаптация имеющихся на рынке технологий.

Возможность инициирования идей и предложений, контроля и управления ими на каждом этапе жизненного цикла представлены на рисунке 5.

Ожидаемыми результатами являются создание единой инновационной среды и появление возможности инициирования, контроля и управления инновационными



Рисунок 4. Пример создание единой универсальной инновационной среды

Figure 4. An example of creating a single universal innovation environment



Рисунок 5. Этапы жизненного цикла идей и предложений в информационной системе

Figure 5. Stages of the life cycle of ideas and proposals in the information system

идеями и предложениями в составе информационной системы [7, 8].

Текущая ситуация в Компании по работе с инициативами. Представляю Вашему вниманию сравнение инновационной активности Компании с другими российскими организациями (рисунок 6), успешно построившими процесс управления инициативами сотрудников. Например, в Компании «Сбербанк», которая насчитывает 267 тыс. сотрудников, суммарное количество поданных идей составляет 70 тыс. Отношение количества сотрудников к количеству идей показывает индекс инновационной активности в Компании.

Среди факторов повышения эффективности работы с рационализаторскими

предложениями и инициативами лидирующее место занимает, конечно же, автоматизация. Это наиболее важный инструмент, упрощающий механизмы подачи и рассмотрения идей. Среди факторов, препятствующих сбору рационализаторских предложений и инициатив, первое место занимает отсутствие либо недостаточный функционал ИТ-системы и большой объем бумажной работы.

Этапы жизненного цикла идеи в составе информационной системы

В качестве примера на рисунке 7 представлены этапы жизненного цикла идеи в рамках работы с малыми инновационными предприятиями.

	СИБУР	Северсталь	РОСАТОМ	СБЕРБАНК <i>Всегда рядом</i>	РЖД	РОСНЕФТЬ
 Количество сотрудников	27 000	50 000	256 000	267 000	790 000	136 000
 Количество инициатив	80 547	48 700	70 000	70 000	35 136	5 569
Индекс инновационной Активности	2,99	0,97	0,27	0,26	0,04	0,04

Рисунок 6. Сравнение инновационной активности Компании

Figure 6. Comparison of the Company’s innovative activity



Рисунок 7. Этапы жизненного цикла идеи

Figure 7. Stages of the life cycle of an idea

Воронка показывает типовой путь прохождения идеи от момента ее сбора до внедрения и реализации. Как видно, в начале количество идей составляло 52. На последующих этапах указан процент отсева идей от числа идей на предыдущем этапе рассмотрения. До внедрения и реализации после прохождения экспертизы с использованием ромба (В.М. Фалькова и Б.М. Островского) дошло, как видите из примера, 4 идеи.

Если мы хотим на выходе получать большее количество идей, дошедших до реализации, необходимо увеличить число поданных идей на этапе сбора, в самом начале.

Наличие единой информационной системы позволит не только автоматизировать процессы сбора и обработки инициатив и рационализаторских предложе-

ний, но и позволит повысить информированность работников ОГ о реализации и тиражировании собственных идей, позволит создать прозрачный путь движения инициативных и рационализаторских предложений от этапа к этапу вне зависимости от текущего статуса (принято / не принято) и обеспечит наличие общей базы предложений по Компании с доступом у всех ОГ.

Как я уже сказал выше, существуют факторы, препятствующих сбору рационализаторских предложений и инициатив.

Рассмотрим данную информационную систему идей и предложений (рисунок 8).

Данная информационная система представляет собой Единое окно для подачи и Единый банк для хранения идей (более детальный принцип работы указан на



Рисунок 8. Информационная система сбора идей и предложений (общий вид)

Figure 8. Information system for collecting ideas and suggestions (general view)

рисунке 9), обладая при этом следующими плюсами:

- доступ через корпоративные устройства;
- информирование и обратная связь;
- прозрачность рассмотрения идей;
- интерактивность;
- оперативность;
- коммуникация со всеми элементами системы в одном месте;
- современная площадка;
- соревновательная атмосфера;
- дружественный интерфейс;
- единая отчетность и аналитика.

Общий портал – внешняя инновационная среда. Она представляет собой макросреду и микросреду (иными словами, дальнее и ближнее окружение), которые составляют внешнюю среду любого участвующего в инновационном процессе. Они оказывают или прямое (микросреда), или косвенное (макрос-

реда) воздействия на факторы инновационной деятельности и, соответственно, на конечный результат. Знание внешней среды в области инноваций предполагает правильную оценку инновационного климата в Компании.

Специальный портал – внутренняя инновационная среда. В данном случае речь идет о внутрифирменных отношениях, связях, образуемых состоянием определенных звеньев системы Компании, которые оказывают влияние на ее деятельность в области инноваций. Стоит дополнить, что осведомленность касательно внутренней инновационной среды предполагает грамотную оценку инновационного потенциала фирмы.

Возможность инициирования идей и рационализаторских предложений, контроля и управления ими на каждом этапе жизненного цикла данной информационной системы представлена на рисунке 10.



Рисунок 9. Информационная система сбора идей и предложений (детальный вид)

Figure 9. Information system for collecting ideas and suggestions (detailed view)



Рисунок 10. Блок-схема работы информационной системы

Figure 10. Block diagram of the information system

Выводы

Развитие и внедрение данной информационной системы позволит увеличить и обеспечить механизмы оперативного общения с инноваторами, а использова-

ние обратной связи на всех этапах рассмотрения заявок позволит контролировать и управлять иницированными идеями и предложениями на каждом этапе жизненного цикла.

Список источников

1. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Стратегический менеджмент в инновационных организациях : системный анализ и принятие решений. М.: ИНФРА-М, 2013. 394 с.
2. Бухарова М. Управление трансфером технологических инноваций: отраслевая цепочка ценностей // Проблемы теории и практики управления. 2013. № 1. С. 111-119.
3. Долженко Р.А. Инновации в управлении персоналом в коммерческом банке. Барнаул: Азбука, 2012. 177 с.
4. Иванус А.И. Гармоничный инновационный менеджмент. М.: URSS: ЛИБРОКОМ, 2011. 247 с.
5. Баев Л.А., Литке М.Г. К вопросу о категорийной системе оценки и управления инновационным развитием // Менеджмент в России и за рубежом. 2013. № 3. С. 20-27.
6. Долженко Р.А. Инновации в системе управления персоналом организации // АГАУ. Вестник Алтайского аграрного университета. 2013. № 1. С. 149-153.

7. Ермакова Е., Кузнецова М. Роль корпоративного предпринимательства в инновационной активности компании // Проблемы теории и практики управления. 2013. № 9. С. 194-101.

8. Маннапов А. Система управления инновационной деятельностью в организации // Проблемы теории и практики управления. 2013. № 6. С. 98-104.

References

1. Andreichikov A.V., Andreichikova O.N. *Strategicheskii menedzhment v innovatsionnykh organizatsiyakh : sistemnyi analiz i prinyatie reshenii* [Strategic Management in Innovative Organizations: System Analysis and Decision-Making]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013. 394 p. [in Russian].
2. Bukharova M. Upravlenie transferom tekhnologicheskikh innovatsii: otraslevaya tsepochka tsennostei [Management of the Transfer of Technological Innovations: an Industry Value Chain]. *Problemy teorii i praktiki upravleniya – Problems of Theory and Practice*

of Management, 2013, No. 1, pp. 111-119. [in Russian].

3. Dolzhenko R.A. *Innovatsii v upravlenii personalom v kommercheskom banke* [Innovations in Personnel Management in a Commercial Bank]. Barnaul, Azbuka Publ., 2012. 177 p. [in Russian].

4. Ivanus A.I. *Garmonichnyi innovatsionnyi menedzhment* [Harmonious Innovation Management]. Moscow, URSS: LIBROKOM Publ., 2011. 247 p. [in Russian].

5. Baev L.A., Litke M.G. K voprosu o kategoriinoi sisteme otsenki i upravleniya innovatsionnym razvitiem [On the Question of the Categorical System of Evaluation and Management of Innovative DEvelopment]. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom – Management in Russia and Abroad*, 2013, No. 3, pp. 20-27. [in Russian].

6. Dolzhenko R.A. *Innovatsii v sisteme upravleniya personalom organizatsii* [Innova-

tions in the Personnel Management System of the Organization]. *Agau. Vestnik Altaiskogo agrarnogo universiteta – Asau. Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2013, No. 1, pp. 149-153. [in Russian].

7. Ermakova E., Kuznetsova M. Rol' korporativnogo predprinimatel'stva v innovatsionnoi aktivnosti kompanii [The Role of Corporate Entrepreneurship in the Innovative Activity of the Company]. *Problemy teorii i praktiki upravleniya – Problems of Theory and Practice of Management*, 2013, No. 9, pp. 194-101. [in Russian].

8. Mannapov A. Sistema upravleniya innovatsionnoi deyatelnost'yu v organizatsii [Management System of Innovative Activity in the Organization]. *Problemy teorii i praktiki upravleniya – Problems of Theory and Practice of Management*, 2013, No. 6, pp. 98-104. [in Russian].

ОБ АВТОРАХ

Андреев Антон Андреевич

аспирант, Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

Архипова Ольга Владимировна

старший преподаватель Института нефти и газа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

Афлятунов Радмир Рифович

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Ахмеджанов Фарит Маратович

кандидат технических наук, доцент, доцент Института экономики и сервиса, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Балыклов Егор Станиславович

аспирант Института нефти и газа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

Басырова Айгуль Анваровна

студент Института цифровых систем, автоматизации и энергетики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия.

Баширова Эльмира Муссаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салават), Салават, Россия

Беляев Александр Сергеевич

аспирант Отделения автоматизации и робототехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Бодылев Андрей Сергеевич

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Буй Чунг Кьен

кандидат технических наук, кафедра «Электротехники», Куангниньский промышленный университет, Куангнинь, Вьетнам

Васильев Петр Игоревич

аспирант, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Глазырин Александр Савельевич

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

Данг Нгок Хюу

кандидат технических наук, кафедра «Автоматизации», Куангниньский промышленный университет, Куангнинь, Вьетнам

До Чи Тхань

кандидат технических наук, кафедра «Автоматизации», Куангниньский промышленный университет, Куангнинь, Вьетнам

Дудаев Николай Олегович

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

Жаринов Юрий Александрович

кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Информационных технологий», Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салават), Салават, Россия

Зайцев Евгений Артемович

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

Зайцева Алина Александровна

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

Зиненко Андрей Игоревич

магистрант, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», Королев, Россия

Каекбирдина Ильгиза Далховна

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Кантюков Никита Русланович

студент Института цифровых систем, автоматизации и энергетики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Каримов Наиль Анварович

магистрант, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», Королев, Россия

Кильмаков Дмитрий Константинович

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

Кириллов Роман Вячеславович

доцент базовой кафедры «Электроэнергетика и электротехнологии» в составе «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Ковалев Владимир Захарович

доктор технических наук, профессор Института нефти и газа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

Крымский Виктор Григорьевич

доктор технических наук, профессор, профессор Института экономики и сервиса, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Курганов Василий Васильевич

кандидат технических наук, доцент Отделения автоматизации и робототехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Ле Ван Тунг

кандидат технических наук, кафедра «Автоматизации», Куангниньский промышленный университет, Куангнинь, Вьетнам

Поберезкин Никита Иванович

магистрант Отделения автоматизации и робототехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Сибатуллин Радмир Раилевич

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и защиты информации, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

Сираев Фанис Фанилович

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Сорокин Александр Владимирович

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Терентьев Артем Алексеевич

магистрант кафедры «Информационных технологий», Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салават), Салават, Россия

Филипас Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий Отделением автоматизации и робототехники, Томский политехнический университет, Томск, Россия

Хазиева Регина Тагировна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Хакимьянов Марат Ильгизович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Хамитов Рустам Нуриманович

доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники, Омский государственный технический университет, Омск, Россия; профессор кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Хусаинов Эмиль Ильшатович

аспирант Института нефти и газа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

Шабанов Виталий Алексеевич

кандидат технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Яшин Антон Николаевич

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Aflyatunov Radmir R.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Akhmedzanov Farit M.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor, Institute of Economics and Service, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Andreev Anton A.

Postgraduate student, Togliatti State University, Togliatti, Russia

Arhipova Olga V.

Senior Lecturer of Oil and Gas Institute, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Balyklov Egor S.

Postgraduate Student of Oil and Gas Institute, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Bashirova Elmira M.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University, Branch in Salavat, Russia

Basyrova Aigul A.

Student of Institute of Digital Systems, Automation and Power Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Belyaev Aleksandr S.

Postgraduate Student of Automation and Robotics Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Bodylev Andrey S.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Bui Trung Kien

Doctor of Philosophy, Department of Electrical Engineering, Quang Ninh University of Industry, Quang Ninh, Vietnam

Dang Ngoc Huy

Doctor of Philosophy, Department of Automation, Quang Ninh University of Industry, Quang Ninh, Vietnam

Do Chi Thanh

Doctor of Philosophy, Department of Automation, Quang Ninh University of Industry, Quang Ninh, Vietnam

Dudayev Nikolai O.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa State Aviation Technical University, Branch, Kumertau, Russia

Filipas Aleksandr A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Head of Automation and Robotics Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Glazyrin Alexander S.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Electric Power Engineering Department of the Energy Engineering School, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Husainov Emil I.

Postgraduate Student of Oil and Gas Institute, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Kaekbirdina Ilgiza D.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kantyukov Nikita R.

Student of Institute of Digital Systems, Automation and Power Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Karimov Nail A.

Undergraduate Student of Information Technology and System Management Department, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «University of Technology» named after twice Hero of the Soviet Union, Pilot-Cosmonaut A.A. Leonov, Korolev, Russia

Khakimyanov Marat I.

Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor, Head of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Khamitov Rustam N.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Omsk State Technical University, Omsk; Professor of Electric Power Engineering Department, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Khazieva Regina T.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kilmakov Dmitry K.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa State Aviation Technical University, Branch, Kumertau, Russia

Kirillov Roman V.

Assistant Professor of Base Department «Electric Power Engineering and Electrotechnology» as a part of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kovalev Vladimir Z.

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Oil and Gas Institute, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Krymsky Victor G.

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Institute of Economics and Service, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Kurganov Vasiliy V.

Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Automation and Robotics Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Le Van Tung

Doctor of Philosophy, Department of Automation, Quang Ninh University of Industry, Quang Ninh, Vietnam

Poberezkin Nikita I.

Undergraduate Student of Automation and Robotics Department, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Shabanov Vitaly A.

Candidate of Engineering Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Sibagatullin Radmir R.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Computer Science and Information Protection Department, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Siraev Fanis F.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Sorokin Alexander V.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Terentyev Artem A.

Undergraduate Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University, Branch in Salavat, Russia

Vasilyev Petr I.

Postgraduate Student, Assistant of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Yashin Anton N.

Postgraduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Zaitsev Evgeny A.

Student of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa State Aviation Technical University, Branch, Kumertau, Russia

Zaitseva Alina A.

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Electronic Engineering Department, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Ufa State Aviation Technical University, Branch, Kumertau, Russia

Zharinov Yuri A.

Candidate of Pedagogical Sciences, Assistant Professor of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University, Branch in Salavat, Russia

Zinenko Andrey I.

Undergraduate Student of Information Technology and System Management Department, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «University of Technology» named after twice Hero of the Soviet Union, Pilot-Cosmonaut A.A. Leonov, Korolev, Russia

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 работы, 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.