

ISSN 1999-5458

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3, т. 14, 2018



Electrical and data processing facilities and systems

№ 3, т. 14, 2018





На 87-м году ушел из жизни главный редактор научного журнала «Электротехнические и информационные комплексы и системы» Семён Вольфович Шапиро, доктор технических наук, профессор, почётный профессор УГАЭС, Соросовский профессор, отличник высшего образования Башкортостана, почётный работник высшего образования Российской Федерации, действительный член Международной организации по озону.

Когда в Уфимской государственной академии экономики и сервиса встал вопрос о кандидатуре главного редактора научного журнала «Электротехнические и информационные комплексы и системы», у всех, как подтвердилось позже, промелькнула одна фамилия – Шапиро.

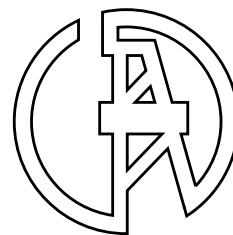
Действительно, такой ответственный пост мог занять только человек, в котором прекрасное сочетание маститого ученого и успешного управленца. Он всегда отличался активной жизненной позицией, подлинной интеллигентностью, высоким профессионализмом, жизнелюбием и оптимизмом.

Очень скоро появились первые результаты: журнал был 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». Авторитет профессора Шапиро помог сформировать квалифицированную и авторитетную редакционную коллегию, а также расширить географию авторов и привлечь ученых не только российских, но и из Италии, Латвии, Казахстана, Украины, Белоруссии. Это позволило резко поднять рейтинг издания, вошедшего в тройку лучших научных журналов по тематикам «Электротехника» и «Электроника. Радиотехника», входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии РФ. Казалось бы, совсем недавно вышел первый номер журнала в стенах нашего университета, но сегодня, благодаря слаженной работе редакционной коллегии под руководством Семена Вольфовича, он уже находится в лидерах.

Нам посчастливилось дружить и работать с Семеном Вольфовичем, поэтому мы особенно остро переживаем невосполнимую утрату и глубоко скорбим вместе с его родными, близкими и коллегами.

Редакция научного журнала «Электротехнические и информационные комплексы и системы»

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 3, т. 14, 2018

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

Учредитель

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

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

Международный стандартный серийный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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

Зам. главного редактора:

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

Члены редакционной коллегии:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



Ответственный секретарь: А. А. Мухамадиев

Технический редактор: С. В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте www.ugnet.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, 2018.

Адрес редакции и издательства: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Тел.: (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Цена свободная. **12+**

Подписано в печать 27.09.2018 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10.93.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 226.

Адрес типографии: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

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

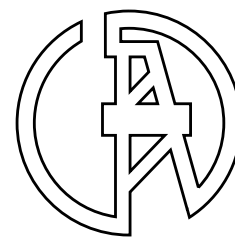
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 3, v. 14, 2018

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:

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

Deputy editor-in-chief:

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

Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



Assistant editor: A. A. Mukhamadiev

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2018.

Address of Editors office and Founder: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Price is free. 12+

Publishing authorized on 27.09.2018. Paper format 60×84/8. Offset printing. 10.93 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 226.

Address of Publishing Office: 450062, 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>Шилин А.Н., Дементьев С.С.</i> Моделирование сопротивления воздушных линий электропередачи	5
<i>Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Шило Д.В., Породинский И.А., Таназлы И.Н.</i> Некоторые вопросы структурного и параметрического синтеза системы «индуктор — нагреваемое тело» для технологии силицирования графитовых изделий	12
<i>Дунаев Д.И.</i> Исследование пусковых режимов асинхронного дебалансного вибродвигателя при влиянии статического момента	22
<i>Шапиро С.В., Гумерова М.Б., Бабинова Н.Л., Гареев Р.И., Юшкова О.А.</i> Каскадный асинхронно-синхронный бесконтактный двигатель	28
<i>Возмилов А.Г., Мельников А.В., Астафьев Д.В., Звездакова О.В., Пархомчук Г.Е.</i> Разработка схем замещения однозонного и двухзонного электрофильтров	37
<i>Линенко А.В., Камалов Т.И., Халилов Б.Р.</i> Математическая модель виброцентробежного сепаратора с линейным электроприводом	47
<i>Бухаров Д.С.</i> О методах обработки массивов значений тока в задаче настройки устройства автоматической ликвидации асинхронного режима	54
<i>Мукаева В.Р., Горбатков М.В., Фаррахов Р.Г., Парфенов Е.В.</i> Исследование акустических характеристик процесса плазменно-электролитического оксидирования алюминия	60

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Султанов А.Х., Мешков И.К., Иимияров А.А.</i> Метод снижения пик-фактора в системах OFDM, основанный на предкодировании поднесущих	66
<i>Киреева Н.А., Родионов А.С., Фархутдинов Р.И., Хусаинов И.Р.</i> Разработка чат-бота по истории для применения в техническом вузе	73
<i>Абдрахманов В.Х., Важдаев К.В., Салихов Р.Б.</i> Разработка системы детектирования информационных сигналов звукового диапазона с использованием микроконтроллеров STM32 для мониторинга состояния биологических объектов	80

МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Ефанов В.Н., Саяпова Л.Р.</i> Исследование метрологических характеристик информационно-измерительной системы позиционирования транспортных средств	88
<i>Зикий А.Н., Зламан П.Н.</i> Варакторный умножитель частоты 400 МГц	98
<i>Крымский В.Г., Сафиуллина Р.Р.</i> Поддержка принятия решений при мониторинге воздушной среды с помощью высокочувствительных MEMS-сенсоров	103
<i>Цыбов Н.Н.</i> Проектирование анализаторов реактивных компонентов в электронных системах контроля и управления	110
Об авторах	116

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Shilin A.N., Dementyev S.S.</i> Simulation of resistance of air transmission lines	5
<i>Roginskaya L.E., Gorbunov A.S., Shilo D.V., Porodzinsky I.A., Tanazly I.N.</i> Some questions of the structural and parametric synthesis of the system «Inductor — Heated Part» for the technology of siliconizing of graphite products	12
<i>Dunaev D.I.</i> Investigation of starting regimes of the asynchronous unbalanced vibration engine the influence of the static moment	22
<i>Shapiro S.V., Gumerova M.B., Babikova N.L., Gareev R.I., Yushkova O.A.</i> Cascading asynchronous-synchronous non-contact motors	28
<i>Vozmilov A.G., Melnikov A.V., Astafev D.V., Zvezdakova O.V., Parkhomchuk G.E.</i> Substitution schemes development for single-stage and two-stage electric precipitators	37
<i>Linenko A.V., Kamalov T.I., Khalilov B.R.</i> A mathematical model of a vibrocentrifugal grain separator with a linear electric drive	47
<i>Bukharov D.S.</i> On methods of current values sets processing for adjustment of automatics for elimination of asynchronous operation	54
<i>Mukaeva V.R., Gorbatkov M.V., Farrakhov R.G., Parfenov E.V.</i> A study of the acoustic characteristics of plasma electrolytic oxidation of aluminum	60

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Ishmiyarov A.A.</i> OFDM system peak-factor decrease method based on precoding subcarriers	66
<i>Kireeva N.A., Rodionov A.S., Farkhutdinov R.I., Khusainov I.R.</i> Development of a chatbot on history for use in a technical university	73
<i>Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B.</i> The development of a system for the detection of sound range information signals using the STM32 microcontroller to monitor biological objects state	80

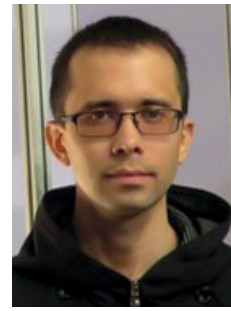
METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Efanov V.N., Sayapova L.R.</i> Information and measuring system metrological characteristics research for vehicles positioning	88
<i>Zikiy A.N., Zlaman P.N.</i> Varactor frequency multiplier 400 MHz	98
<i>Krymsky V.G., Safiullina R.R.</i> Decision support within air monitoring using high sensitive MEMS-sensors	103
<i>Tsybov N.N.</i> Designing analyzers reactive components in electronics systems of control and management	110
About the authors	116



Шилин А. Н.
Shilin A. N.

*доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электротехники,
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный
технический университет»,
г. Волгоград, Российская Федерация*



Дементьев С. С.
Dementyev S. S.

*аспирант кафедры электротехники,
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный
технический университет»,
г. Волгоград, Российская Федерация*

УДК 621.315.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Алгоритм работы различных систем диагностики и противоаварийной автоматики воздушных линий электропередачи (ЛЭП) основан на математической модели длинной линии. Применяемая модель длинной линии справедлива лишь для однородной линии, и поэтому использует ее усреднённые параметры. Это является причиной погрешностей контроля и достоверности диагностики и срабатывания систем противоаварийной защиты. Однако реальная линия электропередачи не является однородной из-за неравномерного воздействия геоклиматических условий по её длине. Таким образом, для повышения точности и достоверности диагностики и срабатывания систем релейной защиты необходимо при моделировании учитывать неоднородность её параметров по длине. Изменение сопротивления по длине линии может быть обусловлено сложной формой рельефа местности и неравномерным распределением атмосферных осадков. Сложная форма рельефа местности совместно с провисанием проводов, утяжелённых гололёдными отложениями, приводит к непрерывному изменению расстояния между проводом и землёй. Известно, что эти факторы приводят к погрешности в определении реактивных параметров линии. В статье приведены результаты моделирования с учетом влияния на сопротивление линии различных факторов и более точные выражения, необходимые для расчёта параметров. Кроме того, проанализировано влияние наличия различных сочетаний диэлектрических слоёв на поверхности токоведущей части провода. Рассмотрены сочетания «провод — гололёд», «провод — изоляция — гололёд», «провод — изоляция — водяная плёнка». Наличие данных оболочек вокруг провода соответствует образованию многослойного цилиндрического конденсатора. Образование вокруг провода водяной плёнки приводит к значительному изменению его активной проводимости. Полученные результаты свидетельствуют о возможности значительного отклонения активной проводимости линии вдоль её длины при неравномерном выпадении осадков вдоль трассы линии. Таким образом, в составе информационно-измерительной системы (ИИС) диагностики линии необходимы датчики гололёдных отложений и дождевых осадков. Полученные математические модели могут использоваться при проектировании «интеллектуальных» ИИС, а также систем релейной защиты и автоматики, адаптивных к изменяющимся геоклиматическим условиям. Внедрение подобных систем способствует предотвращению аварийных режимов и уменьшению времени восстановления линии и, соответственно, увеличению надёжности электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: моделирование ЛЭП, неоднородная линия, гололёдообразование, аварийные режимы ЛЭП, рефлектометры, системы диагностики ЛЭП, релейная защита ЛЭП, самонесущий изолированный провод, «интеллектуальные» сети, надёжность электроснабжения.

SIMULATION OF RESISTANCE OF AIR TRANSMISSION LINES

The algorithm of operation of various diagnostic systems and emergency control systems for air transmission lines (ATL) is based on the mathematical model of a long line. The applied model of a long line is valid only for a homogeneous line and therefore uses its averaged parameters. This is the reason for the errors in the control and the reliability of the diagnostics and operation of the emergency protection systems. However, the actual power transmission line is not homogeneous due to uneven exposure of geoclimatic conditions along its length. Thus, in order to increase the accuracy and reliability of the diagnostics and operation of relay protection systems, it is necessary to take into account the heterogeneity of its parameters over the length in modeling. The change in resistance along the length of the line may be due to the complex shape of the terrain and the uneven distribution of atmospheric precipitation. The complex shape of the terrain, together with the sagging of wires, weighted by ice deposits, leads to a continuous change in the distance between the wire and the ground. It is known that these factors lead to an error in determining the reactive parameters of the line. The article presents the simulation results taking into account the influence of various factors on the line resistance and the more precise expressions necessary for calculating the parameters. In addition, the effect of the presence of various combinations of dielectric layers on the surface of the current-carrying part of the wire is analyzed. The combinations «wire–ice», «wire–insulation–ice», «wire–insulation–water film» are considered. The presence of these shells around the wire corresponds to the formation of a multilayer cylindrical capacitor. The formation around the wire of the water film leads to a significant change in its active conductivity. The obtained results indicate the possibility of a significant deviation of the active conductivity of the line along its length with uneven precipitation along the line route. Thus, in the information-measuring system (IMS) of line diagnostics sensors of ice deposits and rainfall are necessary. The obtained mathematical models can be used in the design of «intelligent» IMS, as well as relay protection and automation systems, adaptive to changing geoclimatic conditions. The introduction of such systems contributes to preventing emergency regimes and reducing the time of line restoration and, accordingly, increasing the reliability of electricity supply to consumers.

Key words: air transmission line simulation, non-homogeneous line, ice formation, emergency modes of transmission lines, reflectometers, transmission line diagnostic systems, power line relay protection, self-supporting insulated wire, smart grids, reliability of power supply.

В настоящее время многие используемые в электроэнергетике технические средства, например рефлектометры, устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) и т.д., реализуют вычислительные методы, основанные на математической модели длинной линии. Однако данная модель использует усреднённые параметры, что приводит к значительным погрешностям при определении мест повреждений (ОМП) на линиях электропередачи (ЛЭП) с применением рефлектометров и снижению достоверности срабатывания РЗА. Это обусловлено тем, что линия электропередачи подвержена воздействию климатических факторов, которые оказывают влияние на её параметры и тем самым характеристики измерительных систем.

Таким образом, для повышения достоверности и точности срабатывания устройств необходим учёт внешних факторов и введе-

ние соответствующих корректирующих поправок. Этот принцип может быть реализован в рефлектометрах повышенной точности [1], а также системах адаптивной РЗА. Однако коррекция влияния отдельных климатических условий (например температуры провода, проводимости земли) является недостаточной мерой ввиду того, что применяемая модель справедлива лишь для однородной линии. Так, коэффициент распространения электромагнитной волны по линии описывается выражением [2]

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)}, \quad (1)$$

из которого следует, что коэффициент фазы [2]

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}}, \quad (2)$$

при этом фазовая скорость сигнала [2]

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta}, \quad (3)$$

где ω — циклическая частота сигнала, рад/с.

Из анализа уравнений (1)–(3) следует, что используется т.н. «погонные» параметры, т.е. отнесённые к 1 км линии значения активного сопротивления R_0 , индуктивности L_0 , активной проводимости G_0 и ёмкости C_0 [3]. В связи с этим не учитывается неоднородность параметров ЛЭП, что имеет место ввиду непостоянных по длине линий геоклиматических условий.

В данной статье рассмотрим моделирование ЛЭП с учётом неоднородности её параметров, вызванных различной формой рельефа местности и неравномерным распределением атмосферных осадков по линии, а также дадим оценку влияния указанных факторов.

Внешние факторы и параметры линии

Проанализируем наличие различных сочетаний диэлектрических слоёв на поверхности токоведущей части провода.

Провод — гололёд. Как отмечается в [4], физически оледенение провода ЛЭП означает наличие ёмкости цилиндрического конденсатора — ледяной оболочки и ёмкости

между гололёдной муфтой и землёй, в результате чего суммарная удельная ёмкость линии может быть вычислена по формуле:

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_{\text{л}}}{\epsilon_{\text{л}} \cdot \ln\left(\frac{h \cdot 10^3}{R + b} - 1\right) + \epsilon \cdot \ln\left(1 + \frac{b}{R}\right)}, \quad (4)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, численно равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $\epsilon = 1$); $\epsilon_{\text{л}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость льда ($\epsilon_{\text{л}} = 3,17$); h — высота подвеса провода, м; R — радиус провода, свободного от гололёда, мм; b — толщина гололёдной муфты, мм.

Из вида уравнения (4) сразу следует, что провод считается прямолинейным, а проводящая поверхность — ровной, в результате чего расстояние h между проводом и землёй принимается постоянным, что свидетельствует о приближённом характере формулы (4).

Рассмотрим вывод более точного выражения, учитывающего провисание утяжелённого гололёдными отложениями провода и произвольную форму рельефа местности (рисунок 1).

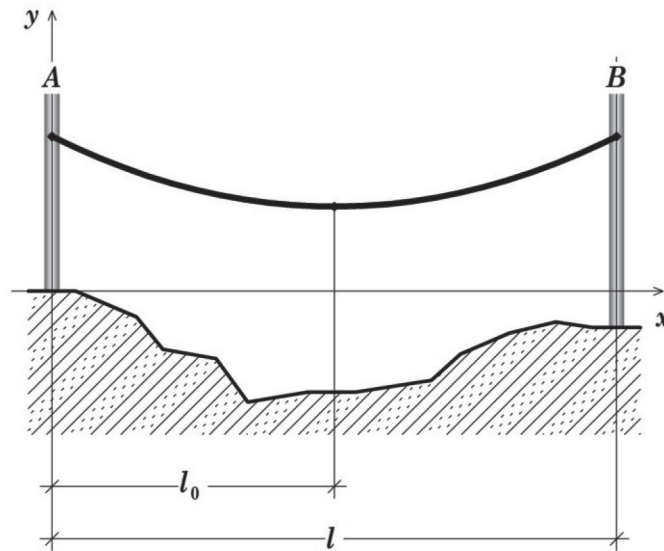


Рисунок 1. Продольный профиль по пролёту ЛЭП

Окружим анализируемый пролёт заземлённой оболочкой, образованной вращением плоской кривой, повторяющей форму рельефа поверхности, вокруг оси y , параллельной оси абсцисс и удалённой от неё на расстояние Δh (рисунок 2, а).

Выполним разбиение данной воображаемой оболочки на n участков с шагом $\Delta l = l/n$ (где l — длина пролёта), при этом провисающий провод заменим совокупностью из n цилиндров длиной Δl и радиусом R или $R + b$ в случае оледенения (рисунок 2, б).

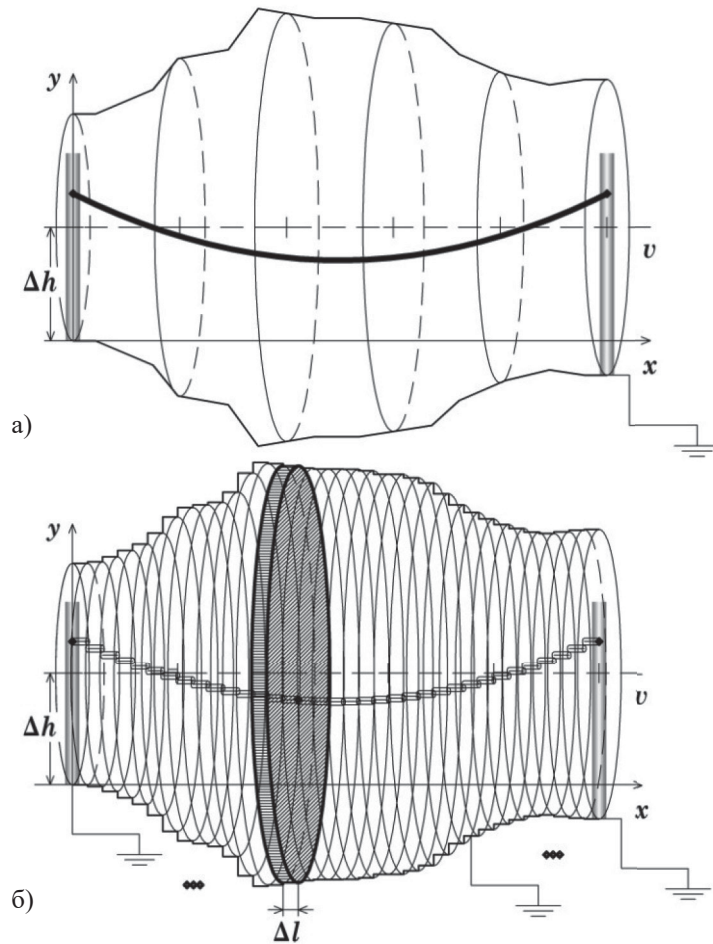


Рисунок 2. Пролёт ЛЭП, заключённый в оболочку вращения (а), дискретная модель провисающего провода и окружающей оболочки вращения

Ёмкость между двумя i -ми цилиндрами ($i = 1, n$) — цилиндром, образующем внешнюю оболочку, и конечным элементом провода — вычисляется по формуле, аналогичной приводимому в [5] выражению, а именно

$$C_i = 2\pi\epsilon_0\epsilon\Delta l \left[\operatorname{arch} \left(-\frac{D_i^2 - R_i'^2 - R^2}{2R_i'R} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

где R_i' — радиус i -го цилиндра оболочки, а величина D_i (рисунок 3) определяется как

$$D_i = |R_i' - h_i|,$$

где h_i — высота расположения i -го элемента провода над землёй, полагая, что $h_i - R \approx h_i$ в силу малости R (т.к. $h_i \gg R$).

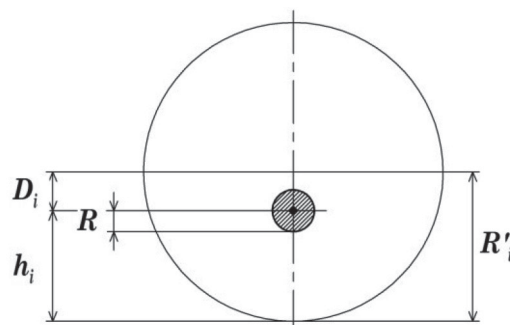


Рисунок 3. К оценке ёмкости между элементарными цилиндрами

Устремим величину Δh (см. рисунок 2, б) и вместе с тем радиус R_i' каждого элементарного цилиндра оболочки к бесконечности.

Также примем во внимание параллельное соединение ёмкостей между конечными элементами, в результате чего получим с учётом

(5) выражение для расчёта ёмкости между провисающим проводом и проводящей поверхностью любой формы:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon\Delta l \sum_{i=1}^n \left(\operatorname{arch} \frac{h_i}{R} \right)^{-1}. \quad (6)$$

В случае нарастания ледяной массы вокруг провода, что соответствует образованию цилиндрического «гололёдного» конденсатора, для отдельного пролёта линии формула (6) примет следующий вид:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon\epsilon_n \int_0^l \left[\epsilon_n \cdot \operatorname{arch} \frac{h(x)}{R+b} + \epsilon \cdot \ln \left(1 + \frac{b}{R} \right) \right]^{-1} dx, \quad (7)$$

где высота провода над поверхностью земли $h(x) = y(x) - g(x)$, при этом $y(x)$ — уравнение кривой провисания провода; $g(x)$ — уравнение, характеризующее форму продольного профиля рельефа местности на данном пролёте.

Тогда полная ёмкость линии составит

$$C_{\text{ЛЭП}} = \sum_{k=1}^N C_k, \quad (8)$$

где N — количество пролётов ЛЭП.

Сравним полученные выражения с уравнениями (1), (4) с целью получения количественной оценки влияния рельефа местности и формы провисающего провода, удовлетворяющей уравнению цепной линии:

$$y(x) = h_0 + a \left(\operatorname{ch} \frac{x-l_0}{a} - 1 \right), \quad (9)$$

где a — параметр, определяющий форму кривой; h_0, l_0 — координаты низшей точки провисания провода, при этом для выражения (4) $h_0 = h$.

Пусть из данных трассировочных работ следует, что форма рельефа поверхности (рисунок 4) на территории рассматриваемого пролёта с достаточной степенью точности задаётся рядом Фурье вида

$$g(x) = 7695,525 \cos(0,0393x) - 12587,996 \sin(0,0393x) - 4855,330 \cos(0,0131x) + 23463,621 \sin(0,0131x) - 3206,094 \cos(0,0654x) + 3246,261 \sin(0,0654x) - 36,304 \cos(0,1047x) - 53,301 \sin(0,1047x) + \dots, \quad (10)$$

при этом, согласно рисунку 1, опора B выполнена на повышающей подставке ($l_0 = 0,5l$). Тогда, если каждый из пролётов ЛЭП характеризуется идентичными уравнениями (9), (10) и толщина гололёдной муфты постоянна на всём протяжении линии ($b(s) = 50$ мм), применение упрощённых выражений (1), (4) приведёт к погрешности δC , равной 24,37 %.

Используя предлагаемую методику, но считая провод повсюду не провисающим и прямолинейным ($y(x) = \text{const}$) и учитывая лишь форму рельефа местности, задаваемой на всей линии уравнением $g(x) \cdot 10^{-3}$ ($x = \overline{0, s}$, км), можно прийти к выводу, что значение ёмкости линии будет отличаться более чем на 13 % по отношению к значению, вычисленному для идеально ровной поверхности.

Отметим, что в рассматриваемых случаях уравнением $g(x)$ с точки зрения геоморфологии задавался равнинный тип рельефа

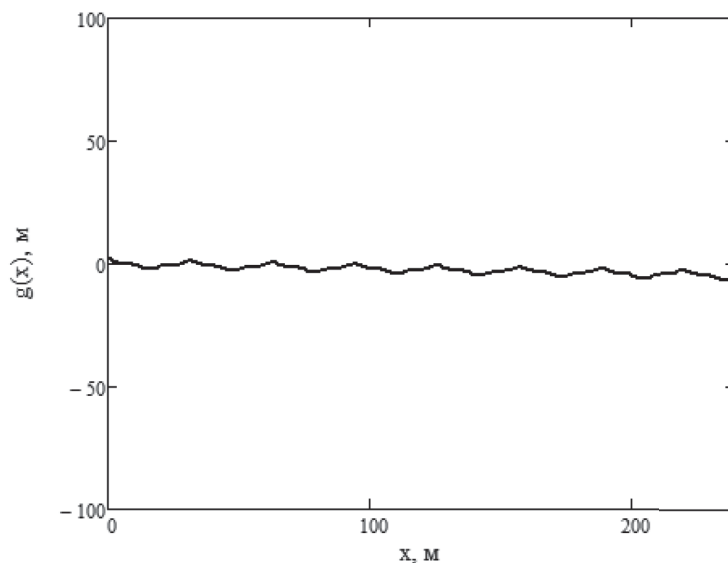


Рисунок 4. Продольный профиль по участку пролёта

с небольшими колебаниями высот. Очевидно, что наличие сильно пересечённого рельефа местности приведёт к ещё большим погрешностям уравнений (1), (4).

Провод — изоляция — гололёд. Вычисление ёмкости на участке линии с защищённым проводом — ЛЭП(з) — длиной l при оледенении может проводиться по формуле, аналогичной (7), но полученной исходя из выражения для ёмкости двухслойного цилиндрического конденсатора:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \int_0^l \left(\epsilon_n^{-1} \ln \left(1 + \frac{\Delta}{R} \right) + \epsilon_n^{-1} \ln \left(1 + \frac{b}{R + \Delta} \right) + \epsilon_n^{-1} \operatorname{arch} \frac{h(x)}{R + b + \Delta} \right)^{-1},$$

где ϵ_n , Δ — диэлектрическая проницаемость и толщина изоляции провода (мм) соответственно.

При этом активная проводимость провода в изоляции, покрытого равномерным слоем отложений, рассчитывается по формуле

$$G_{и-г} = \omega \cdot C_{и-г} \cdot \operatorname{tg} \delta_{э\text{кв}}, \quad (11)$$

где $C_{и-г}$ — ёмкость двухслойного конденсатора *изоляция — гололёд*:

$$C_{и-г} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\frac{1}{\epsilon_n} \ln \left(1 + \frac{\Delta}{R} \right) + \frac{1}{\epsilon_n} \ln \left(1 + \frac{b}{R + \Delta} \right)}, \quad (12)$$

а $\operatorname{tg} \delta_{э\text{кв}}$ — тангенс угла диэлектрических потерь сложной (комбинированной) оболочки, образованной слоем изоляции и гололёдной муфтой:

$$\operatorname{tg} \delta_{э\text{кв}} = \frac{\epsilon_n \cdot S_r \cdot \operatorname{tg} \delta_n + \epsilon_n \cdot S_i \cdot \operatorname{tg} \delta_i}{\epsilon_n \cdot S_r + \epsilon_n \cdot S_i}, \quad (13)$$

где S_r , S_i — площадь сечения гололёдной муфты и слоя изоляции соответственно, мм².

Провод — изоляция — водяная плёнка. Выпадение дождевых осадков приводит к образованию на поверхности провода тонкой водяной плёнки и, соответственно, изменению его активной проводимости.

Опираясь на статистические данные, приводимые в ГОСТ Р 53613-2009 «Воздействие природных внешних условий на технические изделия», можно полагать, что зависимость типичного диаметра капель дождя от его интенсивности описывается уравнением полиномиальной регрессии вида

$$d(\lambda) = 1,476\lambda^4 - 3,896\lambda^3 + 0,284\lambda^2 + 6,149\lambda + 0,112,$$

где d — диаметр капли дождя, мм; λ — интенсивность выпадения осадков, мм/мин.

Используя описываемую в [6] методику расчёта, можем определить, что при выпадении капель диаметром $d = 4,13$ мм, что соответствует дождю интенсивностью $\lambda = 1$ мм/мин, на самонесущем изолированном проводе (СИП) диаметром 31,2 мм (включая слой изоляции толщиной $\Delta u = 8$ мм) образуется водяная плёнка толщиной $\Delta v = 8,516$ нм.

В данном случае расчёт активной проводимости провода выполняется по формулам, идентичным (11)–(13), с заменой ϵ_n , $\operatorname{tg} \delta_n$, b и S_r на аналогичные показатели ϵ_v , $\operatorname{tg} \delta_v$, Δv и S_v . Проведённые вычисления показали, что на частоте 1 кГц появление водяной плёнки увеличивает проводимость линии в 1,53 раза, а на частоте 1 МГц — более чем в 88 раз (!). Следует заметить, что эти результаты получены также с учётом изменения диэлектрических характеристик воды и материала изоляции проводов СИП — сшитого полиэтилена — при увеличении частоты сигнала (на основе данных, приводимых в [7, 8]). Полученные результаты свидетельствуют о возможности значительных колебаний активной проводимости линии вдоль её длины при неравномерном выпадении осадков вдоль трассы линии.

Таким образом, применение погонных характеристик линии является допущением, пригодным для осуществления большинства задач инженерного анализа. Однако данное упрощение при реализации алгоритмов информационно-измерительных систем (ИИС) способствует накоплению погрешностей.

Как показывает данное исследование, в составе ИИС помимо прочих измерительных преобразователей (датчиков температуры провода, проводимости грунта и др.) необходимы датчики гололёдных отложений и дождевых осадков.

В отношении алгоритма обработки данных ИИС желательным является возможность учёта провисания проводов ЛЭП и необходимым учёт формы рельефа местности. Обновление функций $u(x)$ провисания линии может осуществляться на основе показаний распределённых по трассе линии датчиков гололёда и температуры. Эти пара-

метры непосредственным образом определяют механическое напряжение и удельные нагрузки на провод, которые, в свою очередь, определяют его форму:

$$y(x) = H - \frac{\sigma}{\gamma} \left[\operatorname{ch} \frac{\gamma \cdot l_0}{\sigma} - \operatorname{ch} \frac{\gamma(x-l_0)}{\sigma} \right],$$

где H — высота подвеса провода, м; σ — механическое напряжение в материале провода, Н/мм²; γ — удельная нагрузка на провод, Н/(м·мм²); l_0 — абсцисса нижней точки провиса, м.

Загружаемые в память блока обработки информации ИИС функции $g(x)$ рельефа местности задаются на основе данных транс-

сировочных работ, выполняемых на этапе подготовки к строительству линии.

Выводы

Полученные модели могут быть использованы при проектировании адаптивных к условиям внешней среды («интеллектуальных») информационно-измерительных систем и средств релейной защиты ЛЭП. В конечном счёте, это позволит сократить время поиска мест повреждений на линии и тем самым улучшить показатель безотказной работы, а также уменьшить число ошибочных срабатываний противоаварийной автоматики.

Список литературы

1. Шилин А.Н., Шилин А.А., Артюшенко Н.С., Авдеюк Д.Н. Рефлектометр для линий электропередачи с автоматической коррекцией методической погрешности // Контроль. Диагностика. 2018. С. 52–57.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 11-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2013. 701 с.
3. Марголин Н.Ф. Сопротивления воздушных линий передачи. М.: Объединённое научно-техническое издательство, 1937. 62 с.
4. Хакимзянов Э.Ф., Минуллин Р.Г., Мустафин Р.Г. Математическая модель задержки и затухания высокочастотных сигналов в линиях электропередачи с гололёдными образованиями // Энергетика Татарстана. 2011. № 2. С. 24–28.
5. Смайт В. Электростатика и электродинамика: пер. с англ. М.: Изд-во иностранной литературы, 1954. 604 с.
6. Jafar F., Thorpe G., Turan O.F. Liquid Film Falling on Horizontal Circular Cylinders // 16th Australasian Fluid Mechanics Conference (2–7 December 2007), The University of Queensland. Brisbane, Australia, 2007. P. 1193–1200.
7. Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. Киев: Наукова думка, 1987. 830 с.
8. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пос. / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паняматченко, Ю.В. Крыжановская. СПб.: Профессия, 2003. 240 с.

References

1. Shilin A.N., Shilin A.A., Artyushenko N.S., Avdeyuk D.N. Reflexometer for Power Lines with Automatic Correction of Methodological Error. *Control. Diagnostics*, 2018, pp. 52–57. [in Russian].
2. Bessonov L.A. *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits*. Moscow, Yurayt Publ., 2013. 701 p. [in Russian].
3. Margolin N.F. *Resistance of Overhead Transmission Lines*. Moscow, United Scientific and Technical Publishing House, 1937. 62 p. [in Russian].
4. Khakimzyanov E.F., Minullin R.G., Mustafin R.G. Mathematical Model of Delay and Attenuation of High-Frequency Signals in Power Transmission Lines with Ice Formations. *Energy of Tatarstan*, 2011, No. 2, pp. 24–28. [in Russian].
5. Smith V. *Electrostatics and Electrodynamics: Transl. from English*. Moscow, Publishing House of Foreign Literature, 1954. 604 p.
6. Jafar F., Thorpe G., Turan O.F. Liquid Film Falling on Horizontal Circular Cylinders. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference (2–7 December 2007), The University of Queensland*. Brisbane, Australia, 2007. p. 1193–1200.
7. Goronovskiy I.T., Nazarenko Yu.P., Nekryach E.F. *Brief Reference Book in Chemistry*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987. 830 p. [in Russian].
8. Kryzhanovsky V.C., Burlov V.V., Paniamatchenko A.D., Kryzhanovskaya Yu.V. *Technical Properties of Polymeric Materials: Proc. Pos.* Saint-Petersburg, Profession Publ., 2003. 240 p. [in Russian].



Рогинская Л. Э.
Roginskaya L. E.

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



Горбунов А. С.
Gorbunov A. S.

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Шило Д. В.
Shilo D. V.

кандидат технических наук, заместитель генерального директора по технологическому развитию, ООО «ГрафитЭл — Московский электродный завод», г. Москва, Российская Федерация



Породзинский И. А.
Porodzinsky I. A.

кандидат технических наук, начальник технологического отдела, ООО «ГрафитЭл — Московский электродный завод», г. Москва, Российская Федерация



Таназлы И. Н.
Tanazly I. N.

заместитель генерального директора, ЗАО НПО «Параллель», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.365.5

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СТРУКТУРНОГО И ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМЫ «ИНДУКТОР — НАГРЕВАЕМОЕ ТЕЛО» ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ СИЛИЦИРОВАНИЯ ГРАФИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье рассмотрены вопросы разработки и исследования вакуумных индукционных печей для силицирования деталей. Приведена типовая структура индукционной установки для применения в составе вакуумной печи. Дано описание конструкции печи для проведения силицирования деталей. Приведены особенности применяемой тепловой изоляции. Рассмотрены требования к системе управления работой печи, обеспечивающей автоматическую работу комплекса и поддержание его заданных параметров, а также защиту от аварийных режимов. Определены значения основных физических и электромагнитных параметров материала применяемого тигля, выполненного из графита. Рассматриваемый тигель имеет форму стакана с участком в виде полого цилиндра с заданной толщиной стенки, а также с участком дна тигля. В связи с тем, что характер изменения параметров электротепловых

полей в данных участках различается, были осуществлены расчеты с учетом особенностей этих зон. Произведен расчет основных электромагнитных и тепловых параметров исследуемой системы, в том числе определено время нагрева. Вычислены значения оптимальных частот питающего напряжения индуктора. На основе решения уравнения Бесселя от комплексного аргумента и с учетом конкретных граничных условий были получены распределения параметров электромагнитного поля и плотности тока по объему графитового тигля. Значения этих параметров были получены как для участка полого цилиндра тигля, так и в области дна тигля. На основе вычисленных величин были определены параметры схемы замещения исследуемой установки, а также основные интегральные и другие параметры, включая ток индуктора, напряжение на индукторе, число витков, полезная мощность, тепловые потери, КПД, коэффициент мощности и др. Произведен тепловой расчет для заданного режима работы печи на основе уравнения баланса мощностей, получено значение времени нагрева, обеспечивающее достижение требуемых температур нагреваемых изделий. Приведен тип используемого источника питания — полупроводникового преобразователя частоты, обеспечивающего необходимую величину подводимой мощности и требуемую рабочую частоту. Кроме непосредственного аналитического расчета, параметры индуктора были вычислены с использованием программного обеспечения, разработанного авторами.

Ключевые слова: индукционный нагрев, вакуумная индукционная печь, графитовый тигель, индуктор, преобразователь частоты, электромагнитное поле, плотность тока, схема замещения, время нагрева, система управления, индукционная установка.

SOME QUESTIONS OF THE STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE SYSTEM «INDUCTOR — HEATED PART» FOR THE TECHNOLOGY OF SILICONIZING OF GRAPHITE PRODUCTS

In the article the questions of development and research of vacuum induction furnaces for silicization of details are considered. A typical structure of an induction system for use in a vacuum furnace is given. A description of the furnace construction for the silicization of the details is given. The features of the applied thermal insulation are given. The requirements to the furnace operation control system providing automatic operation of the complex and maintaining its specified parameters, as well as protection from emergency regimes, are considered. The values of the basic physical and electromagnetic parameters of the material of the used crucible, made of graphite, are determined. Considered crucible has the shape of a glass with a section in the form of a hollow cylinder with a given wall thickness, and also with a section of the bottom of the crucible. Because the nature of the change in the parameters of the electrothermal fields in these sections is different, calculations were carried out taking into account the peculiarities of these zones. The calculation of the main electromagnetic and thermal parameters of the system under investigation, including the heating time, is determined. The values of the optimum frequencies of the supply voltage of the inductor are calculated. On the basis of the solution of the Bessel equation from the complex argument and taking into account specific boundary conditions, the distributions of the parameters of the electromagnetic field and the current density over the volume of the graphite crucible were obtained. The values of these parameters were obtained both for the section of the hollow cylinder of the crucible and for the bottom of the crucible. Based on the calculated values, the parameters of the equivalent circuit of the induction system under investigation were determined, as well as the main integral and other parameters, including inductor current, inductor voltage, number of turns, useful power, thermal losses, efficiency, power factor, etc. We made the thermal calculation for the given mode operation of the furnace on the basis of the power balance equation, a heating time value is obtained ensuring that the required temperatures of the heated details are reached. We gave the type of used power source — a semiconductor frequency converter that provides the required power input and the required operating frequency. In addition to direct analytical calculation, the parameters of the inductor were calculated using software developed by the authors.

Key words: induction heating, vacuum induction furnace, graphite crucible, inductor, frequency converter, electromagnetic field, current density, equivalent circuit, heating time, control system, induction system.

Технологические процессы производства и обработки различных материалов во многих случаях включают в себя операцию термической обработки методом индукционного нагрева. Значительная часть подобных технологических операций требует отсутствия контакта с окислительной средой. Во многих случаях для решения таких задач используется индукционная тигельная печь с нейтральной средой, обработка в которой исключает процессы излишнего деформирования и коробления нагреваемых изделий.

Одной из разновидностей индукционных печей является индукционная вакуумная печь с проводящим тиглем. В индуктор таких печей устанавливается графитовый тигель с загружаемым внутрь нагреваемым изделием. В зависимости от частоты и, соответственно, глубины проникновения индуцированного тока в материал тигля, принято считать, что в случае, если толщина стенки более чем в два раза превышает глубину проникновения материала тигля, то ток сосредоточен в стенке тигля, а загрузка прогревается только за счет теплопередачи. Если же толщина стенки меньше глубины проникновения, то электромагнитное поле проникает и в загрузку. Примером может служить операции спекания и силицирования графитовых изделий [1–3]. Важнейшим требованием этой технологии является задача по обеспечению повторяемости технологического режима, который может быть реализован как оптимальной конструкцией индуктора, так и правильно спроектированной системой управления нагревом.

В общем случае в состав вакуумной индукционной установки входят следующие составные устройства:

1. Источник питания, например полупроводниковый преобразователь частоты;
2. Вакуумная индукционная печь;
3. Блок компенсирующих конденсаторов;
4. Шкаф управления нагревом.

В настоящей работе рассматриваются вопросы структурного и параметрического синтеза системы «индуктор–нагреваемое тело» и системы управления нагревом для вакуумной индукционной печи для технологии силицирования графитовых изделий.

Конструкция печи представляет собой водоохлаждаемый герметичный цилиндрический кожух, присоединенный к системе откачки воздуха. Внутренняя часть кожуха образует загрузочную камеру. Загрузка размещается вертикально, в верхней части системы. Нагреваемыми телами являются графитовый тигель с установленными на дне изделиями, которые подвергаются силицированию. На изделия устанавливается пористая графитовая чаша с кремнием. При нагреве кремний расплавляется и пропитывает изделия, расположенные под чашей.

Теплоизоляция боковой поверхности печи может быть выполнена на основе углеродного войлока, так и представлять собой слой засыпки из порошка двуокиси циркония марки ЦРО-1, ограниченный с горячей стороны слоем секторного кирпича из плавленной двуокиси циркония, а со стороны индуктора — двумя слоями прокладного слюдопласта с общей толщиной 5 мм. Теплоизоляция нижнего основания (пода) состоит из 1 слоя слюдопласта толщиной 5 мм, двух слоев высокоглиноземистого легковесного кирпича и засыпки из порошка двуокиси циркония марки ЦРО-1. На засыпке сверху расположена графитовая подставка в виде чаши, в которой установлено графитовое кольцо с пазами, на это кольцо опирается графитовый тигель. Замер температур при нагреве производится пирометром.

Графитовый тигель служит для сбора жидкого кремния, вытекающего из чаши во время нагрева. Это позволяет обеспечить направленное движение кремния и не дает ему уходить в теплоизоляцию, защищая ее от повреждений.

Тигель сверху закрыт графитовой крышкой с отверстием и графитовой трубкой для выхода и откачки летучих газов. Сверху на крышке имеется слой теплоизоляции в виде порошка двуокиси циркония марки ЦРО-1.

После каждого цикла нагрева камеру печи разгерметизируют и вынимают из неё силицированные изделия. Далее камера подвергается очистке, затем снова помещается кремний в чашу, загружаются в тигель новые изделия, после чего камеру закрывают, отка-

чивают из неё воздух и производят новый цикл нагрева.

Для управления процессом нагрева были сформулированы следующие требования к системе управления нагревом.

Автоматическая система управления режимами нагрева должна обеспечивать повторяемость процесса термообработки с архивированием данных в виде электронного протокола событий. Алгоритм работы системы управления должен обеспечивать технологический температурно-временной режим путем реализации заданной диаграммы нагрева посредством набора температуры с заданной скоростью, выдержки достигнутой температуры в течение необходимого времени, охлаждения рабочей камеры печи с заданной скоростью. Реализация алгоритма обеспечивается путем программирования в соответствии с требованиями технологического режима с последующим созданием библиотеки программ. Каждая программа обеспечивает автоматическое возобновление прерванного по разным причинам процесса нагрева на любом участке заданной исходной диаграммы.

Система автоматизации предусматривает 2 основных режима работы: ручной и автоматический. Точность стабилизации температуры обеспечивается в пределах ± 5 °С, точность выдерживания режима по времени обеспечивается согласно требованиям технологического процесса. В случае наличия нескольких печей система автоматизации имеет возможность выполнять контроль температуры одновременно во всех печах с приоритетом контроля на работающей печи и контроля охлаждения на второй печи. Система автоматизации обеспечивает передачу данных о технологическом режиме с приборов контроля на ПК через порты RS-232/RS-485/USB.

Система управления обеспечивает защиту установки при возникновении аварийных режимов с соответствующей звуковой и световой сигнализацией: защита по току, защита по напряжению, нарушение подачи охлаждающей воды на каждую из составных частей установки, возникновение ошибки (сбоя) блока управления.

Нагрев изделия происходит, как правило, при изменяющихся температуре поверхности и тепловом потоке. Так как удельное сопротивление графита и температурный коэффициент сопротивления изменяются в относительно небольших пределах, то режим нагрева можно рассматривать как нагрев при постоянном токе индуктора. В силу того, что теплоизоляция нагреваемого изделия близка к идеальной, т.е. считается, что теплоотдача с ее поверхности в окружающее пространство отсутствует, процесс нагрева графитового тигля с загрузкой рассматривается как адиабатический процесс. С учетом вышесказанного, был выполнен расчет индуктора для рассматриваемой индукционной вакуумной печи. Проектирование выполнялось как с помощью аналитического метода, разработанного профессором А. Е. Слухоцким, так и с помощью специализированной программы инженерного расчета электромагнитных параметров. Из всех значений подробно были рассмотрены выбор частоты и зависимость температуры нагрева от времени. Все приведенные в расчете обозначения соответствуют обозначениям, приведенным в [4].

Исходными данными для расчета послужили следующие величины. Нагреваемое тело — графитовый тигель. При расчете принимались следующие размеры: диаметр наружный $D_n = 700$ мм, диаметр внутренний $D_{вн} = 600$ мм, высота тигля — 900 мм, общая масса с загрузкой — 200 кг, мощность источника питания — 320 кВт, частота тока — 1000 Гц, напряжение индуктора — 800 В, не более.

При расчете рассматривались различные параметры графита. Удельное сопротивление графита различных марок изменяется в диапазоне $\rho = (700 - 1400) \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Для выбранной марки графита удельное электрическое сопротивление составляет $800 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Температурный коэффициент сопротивления рассматриваемой марки графита при температуре до 800 °С меньше нуля, минимальное значение удельного сопротивления для одного из сортов графита составляет приблизительно $1,2 \cdot 10^{-5}$ Ом·м. При температуре 1000 °С этот коэффициент равен

$1,4-1,7 \cdot 10^{-5}$ Ом·м. Коэффициент теплопроводности выбранной марки графита $\lambda=160$ Вт/м·°К. Удельная теплоемкость $c=650-850$ Дж/(кг·°К). Так как ряд коэффициентов меняются в широких пределах, при расчете были приняты их некоторые средние значения.

1. Выбор частоты. Частота источника питания 1000 Гц была обусловлена предыдущими расчетами и геометрическими размерами тигля. Примем отношение внутреннего диаметра индуктора к его длине $D_1/a \approx 1$.

Тогда оптимальная частота [5]

$$f_{\text{опт}} = \frac{8,65 \cdot 10^5 \cdot \rho_2}{D_{2\text{ср}} \cdot d_2 \cdot k_2} = 280 \text{ Гц}, \quad (1)$$

где $D_{2\text{ср}}=(D_{22}+D_{21})/2=(0,7+0,6)/2=0,65$ м — средний диаметр цилиндра (тигля), $d_2=0,05$ м — толщина стенки цилиндра; $k_2=0,75$ — коэффициент.

Если принять $d_2=20$ мм, то оптимальная частота составит 700 Гц. Если принять $\rho_2=1700 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, то $f_{\text{опт}}=1410$ Гц, таким образом выбранная частота в 1000 Гц входит в интервал наилучших частот.

2. Расчет температур. Считаем нагрев полого цилиндра как нагрев широкой пластины:

$$T = \frac{p_0 \cdot D}{\lambda} \cdot [\tau + S(\alpha, \beta, \tau)], \quad (2)$$

где $p_0=320 \cdot 10^3/(\pi \cdot 0,70 \cdot 0,85)=17 \cdot 10^4$ Вт/м² — удельная мощность; $\lambda=160$ Вт/(м·°К); $D=0,05$ — толщина цилиндра; $\alpha=0,925 \approx 1$ — относительная глубина активного слоя.

Критерий Фурье [5]

$$\tau = \frac{a \cdot t}{D^2} = \frac{0,127 \cdot 10^{-3} \cdot t}{0,05^2} = 0,05 \cdot t, \quad (3)$$

где $a=0,127 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент температуропроводности, м²/с.

Следовательно $t=20 \cdot \tau$.

Если $\tau > 0,3$ или $t > 6$ с, то в этом случае:

$$S(\alpha, \beta, \tau) \approx S(\alpha, \beta) = \frac{1}{\alpha} \cdot \left[\frac{\alpha}{3} - \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2} + \frac{\alpha \cdot (\alpha^2 + 3 \cdot \beta^2)}{6} \right]. \quad (4)$$

Таким образом, $T=53 \cdot [\tau + 1,08(0,008 + 0,04 \cdot \beta_2)]$, процесс нагрева считается как адиабатический и T будет больше 2000 °С при $\tau > 37,2$ или $t > 744$ с, или 12,4 мин. При этом вторым слагаемым в формуле можно пренебречь.

Произведем расчет параметров электромагнитного поля в рассматриваемой системе. Горячая глубина проникновения тока в материал графитового цилиндра

$$\Delta_2 = 0,05 \text{ м}. \quad (5)$$

Величина относительного наружного радиуса цилиндра

$$m_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot R_2}{\Delta_2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,35}{0,05} = 9,9, \quad (6)$$

где R_2 — внешний радиус графитового цилиндра, м.

Относительный внутренний радиус графитового цилиндра

$$m_3 = \frac{\sqrt{2} \cdot R_3}{\Delta_2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,3}{0,05} = 8,49, \quad (7)$$

где R_3 — внутренний радиус, м.

Уравнение Бесселя от комплексного аргумента, на основе решения которого могут быть рассчитаны значения параметров электромагнитного поля [6]:

$$\frac{d^2 \dot{H}_m}{d(\sqrt{-j} \cdot m)^2} + \frac{1}{\sqrt{-j} \cdot m} \cdot \frac{d\dot{H}_m}{d(\sqrt{-j} \cdot m)} + \dot{H}_m = 0, \quad (8)$$

где \dot{H}_m — амплитуда напряженности магнитного поля, А/м.

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяются путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{H}_m = H_{me} = \frac{\sqrt{2} \cdot w \cdot I_n}{a} = c_1 \cdot J_0(m_2 \cdot \sqrt{-j}) + c_2 \cdot Y_0(m_2 \cdot \sqrt{-j}); \\ \delta_{m_3} = \frac{\sqrt{-2 \cdot j}}{\Delta_2} \cdot [c_1 \cdot J_1(m_3 \cdot \sqrt{-j}) + c_2 \cdot Y_1(m_3 \cdot \sqrt{-j})] = \\ = -\frac{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot R_3}{2 \cdot \rho_2} \cdot [c_1 \cdot J_1(m_3 \cdot \sqrt{-j}) + c_2 \cdot Y_1(m_3 \cdot \sqrt{-j})], \end{cases} \quad (9)$$

где H_{me} — амплитуда напряженности магнитного поля на поверхности индуктора, А/м; w — число витков индуктора; I_n — действующее значение тока индуктора, А; a — длина индуктора, м; c_1, c_2 — постоянные интегрирования; J_0 — функция Бесселя первого рода, нулевого порядка; Y_0 — функция Бесселя второго рода, нулевого порядка; J_1 — функция Бесселя первого рода, первого порядка; Y_1 — функция Бесселя второго рода, первого порядка; — амплитуда плотности тока на внутренней поверхности графитового цилиндра, А/м²; ω — угловая частота, рад/с; μ_0 — магнитная постоянная, Гн/м.

Напряженность магнитного поля на поверхности индуктора и равная ей напряженность на внешней поверхности графитового цилиндра:

$$H_{me} = \frac{\sqrt{2} \cdot w \cdot I_u}{a} = 48853 \text{ А/м}. \quad (10)$$

Напряженность магнитного поля внутри стенки графитового цилиндра в зависимости от координаты определяется по выражению [6]:

$$\dot{H}_m = c_1 \cdot J_0(m \cdot \sqrt{-j}) + c_2 \cdot Y_0(m \cdot \sqrt{-j}), \quad (11)$$

где m — относительный радиус.

Напряженность электрического поля внутри стенки графитового цилиндра в зависимости от координаты:

$$\dot{E}_m = \frac{\sqrt{-2 \cdot j} \cdot \rho_2}{\Delta_2} \cdot [c_1 \cdot J_1(m \cdot \sqrt{-j}) + c_2 \cdot Y_1(m \cdot \sqrt{-j})]. \quad (12)$$

Плотность тока внутри стенки графитового цилиндра в зависимости от координаты:

$$\dot{\delta}_m = \frac{\sqrt{-2 \cdot j}}{\Delta_2} \cdot [c_1 \cdot J_1(m \cdot \sqrt{-j}) + c_2 \cdot Y_1(m \cdot \sqrt{-j})]. \quad (13)$$

В соответствии с формулами (11)–(13) были рассчитаны значения напряженностей магнитного и электрического полей и плотности тока в стенке графитового цилиндра.

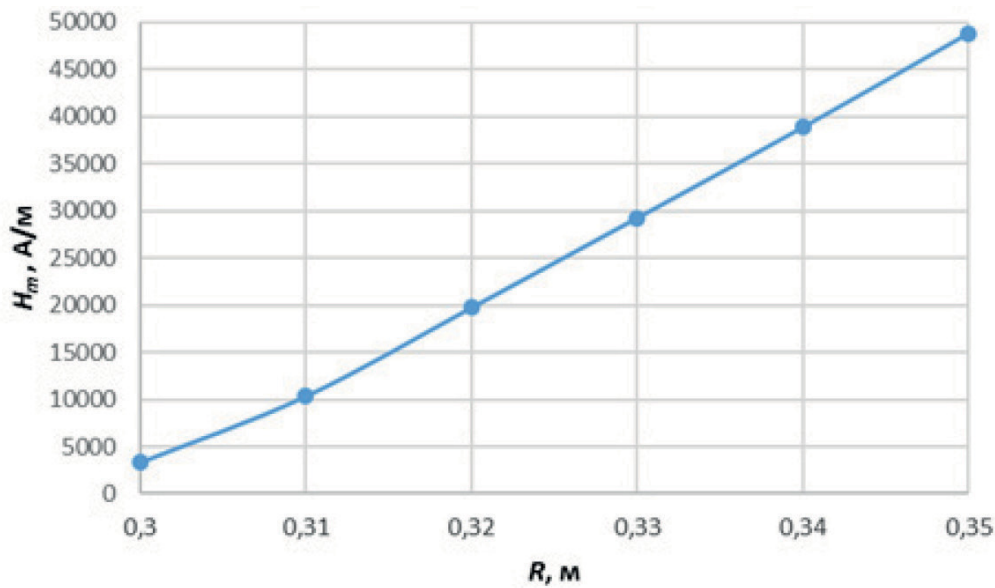


Рисунок 1. Напряженность магнитного поля, А/м

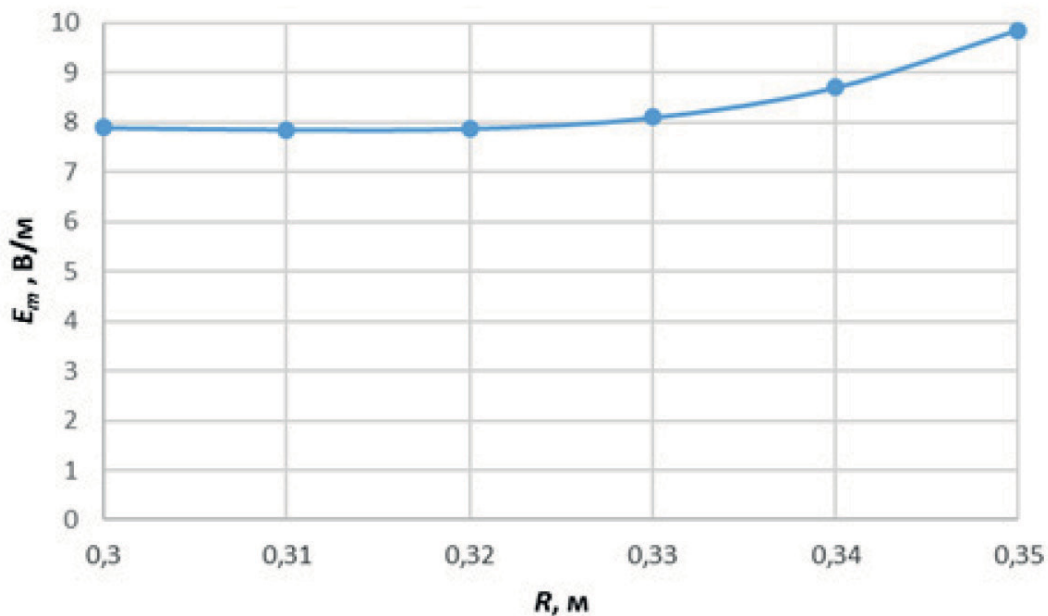
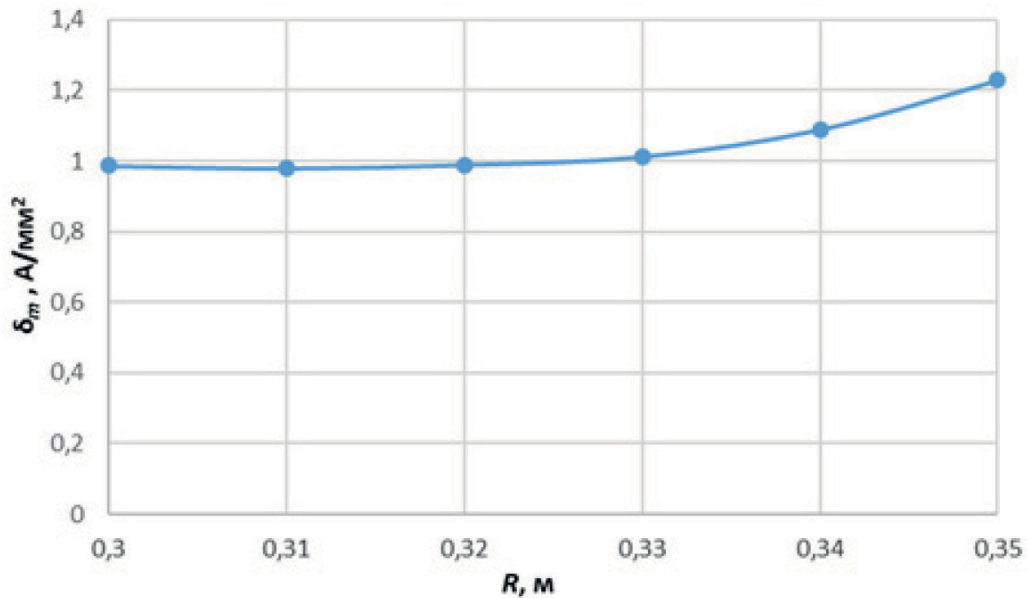


Рисунок 2. Напряженность электрического поля, В/м

Рисунок 3. Плотность тока, A/mm²

Результаты расчетов представлено на рисунках 1–3.

Следующим этапом является расчет параметров электромагнитного поля для области дна графитового цилиндра. Напряженность магнитного поля [5]:

$$\dot{H}_m = \dot{H}_{me} \cdot \frac{I_0(\sqrt{-j} \cdot m)}{I_0(\sqrt{-j} \cdot m_2)}. \quad (14)$$

Напряженность электрического поля:

$$\dot{E}_m = \frac{\rho_2 \cdot \sqrt{-2 \cdot j}}{\Delta_2} \cdot \dot{H}_{me} \cdot \frac{I_1(\sqrt{-j} \cdot m)}{I_0(\sqrt{-j} \cdot m_2)}. \quad (15)$$

Плотность тока:

$$\dot{\delta}_m = \frac{\sqrt{-2 \cdot j}}{\Delta_2} \cdot \dot{H}_{me} \cdot \frac{I_1(\sqrt{-j} \cdot m)}{I_0(\sqrt{-j} \cdot m_2)}. \quad (16)$$

Графики распределения электромагнитных параметров, рассчитанных по формулам (14)–(16), показаны на рисунках 4–6.

Определение параметров схемы замещения

По аналогии с вышеприведенными расчетами, при определении параметров схемы замещения, так как в приводимых в литературе физических параметрах графита существует большой разброс, принимались некоторые средние значения этих величин.

1. Уточненная глубина проникновения тока [4]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}} = 0,045 \text{ м}, \quad (17)$$

где $\gamma = 1/\rho_2$ — удельная проводимость материала цилиндра, См/м.

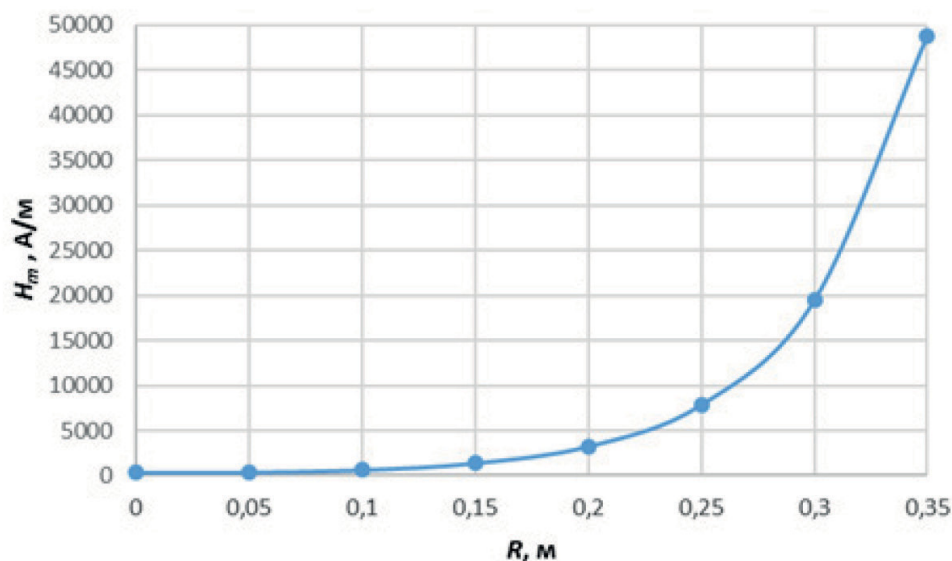


Рисунок 4. Напряженность магнитного поля, A/m

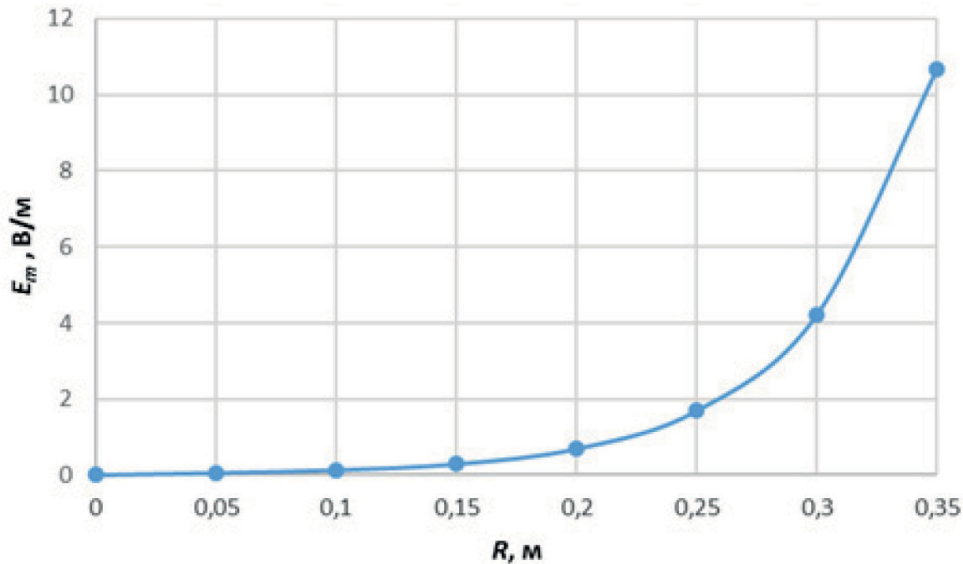
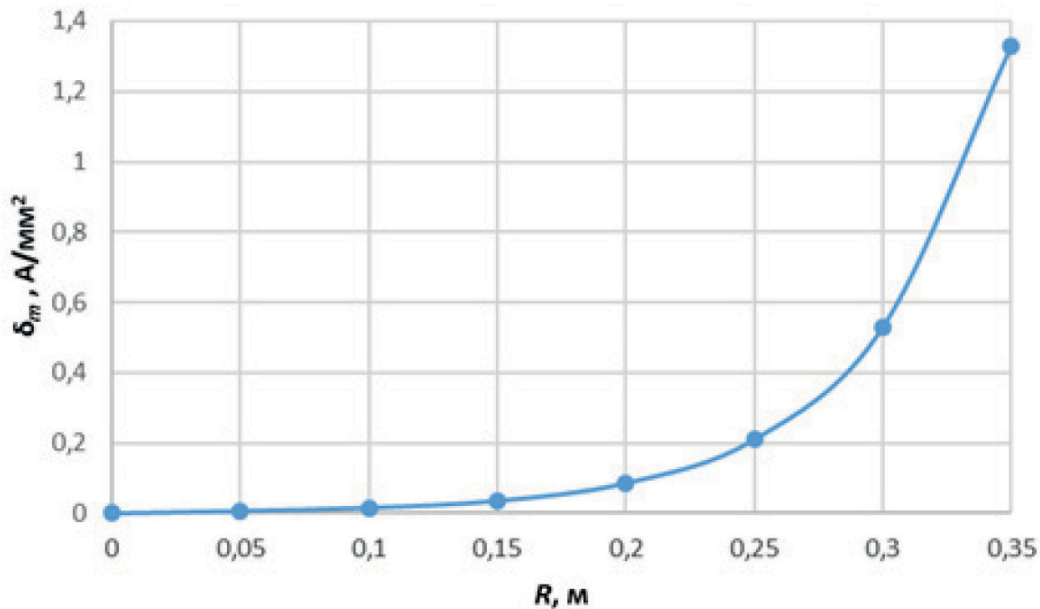


Рисунок 5. Напряженность электрического поля, В/м

Рисунок 6. Плотность тока, А/мм²

Так как плотность графита может превышать 10^{-5} кг/м³, то принимаем, что толщина цилиндра равна глубине проникновения тока, то есть 0,045 м.

2. Параметры (активное и реактивное сопротивления) детали (эквивалентной нагрузки): $r_2=362 \cdot 10^{-6}$ Ом, $x_2M=305,6 \cdot 10^{-6}$ Ом.

3. Реактивное сопротивление намагничивающего контура: $x_{10}=7333 \cdot 10^{-6}$ Ом.

4. Сопротивление рассеяния: $x_s=1719 \cdot 10^{-6}$ Ом.

5. Сопротивления, приведенные к первичной цепи схемы замещения: $r'_2=221 \cdot 10^{-6}$ Ом, $x'_2=1587 \cdot 10^{-6}$ Ом.

6. Параметры индуктора: $r_1=28,8 \cdot 10^{-6}$ Ом, $x_1=14,4 \cdot 10^{-6}$ Ом.

7. Эквивалентные активное и реактивное сопротивления индуктора: $r_3=250 \cdot 10^{-6}$ Ом, $x_3=1600 \cdot 10^{-6}$ Ом, $z_3=1620 \cdot 10^{-6}$ Ом.

8. КПД индуктора и коэффициент мощности ($\cos \varphi$): $\eta=0,884$, $\cos \varphi=0,15$.

9. Напряжение на одновитковом индукторе: $U_1=61,5$ В.

10. Подводимое напряжение к индуктору равно 800 В. Таким образом, число витков индуктора $w=13$.

11. Ток в индукторе $I=2923$ А.

12. Сопротивления индуктора: $R=4,2 \cdot 10^{-2}$ Ом, $x=27 \cdot 10^{-2}$ Ом, $z=27,4 \cdot 10^{-2}$ Ом.

13. Тепловой расчет производится с учетом допущения, что процесс адиабатический. Тогда уравнение баланса мощностей с учетом того, что охлаждение в вакууме осуществляется только излучением, имеет вид [7]:

$$c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} + 5,67 \cdot \varepsilon_{12} \cdot S_1 \cdot [(0,01 \cdot T)^4 - (0,01 \cdot T_2)^4] = 0. \quad (18)$$

В выражении (18) m — масса графита, кг; $\varepsilon_{12}=0,8$ — приведенная степень черноты; T — температура графита, °C; T_2 — температура кремния, °C.

Примем T_2 равной температуре плавления (1414 °C). Если обозначить $0,01 \cdot T$ через x , а $0,01 \cdot T_2$ обозначить через a , тогда уравнение (18) будет иметь вид:

$$-\frac{750 \cdot 590 \cdot 100}{5,67 \cdot 0,8 \cdot 1,6} \cdot \int_a^x \frac{dx}{x^4 - a^4} = t. \quad (19)$$

После интегрирования получим:

$$61 \cdot 10^5 \cdot \left[\frac{1}{a^3} \cdot \ln \left(\frac{x+a}{x-a} \right) + \frac{1}{a^2} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{x}{a} \right) \right] = t. \quad (20)$$

Если принять $x=20$, тогда время нагрева $t=29280$ с = 488 мин, или около 6 ч.

По результатам расчета был спроектирован и изготовлен индуктор, а также получены интегральные параметры. В качестве источника питания рассматриваемой вакуумной индукционной печи использовался тиристорный преобразователь частоты ППЧ-320-1,0. Основные параметры индуктора были рассчитаны с помощью созданной авторами программы, скриншот окна которой приведен на рисунке 7.

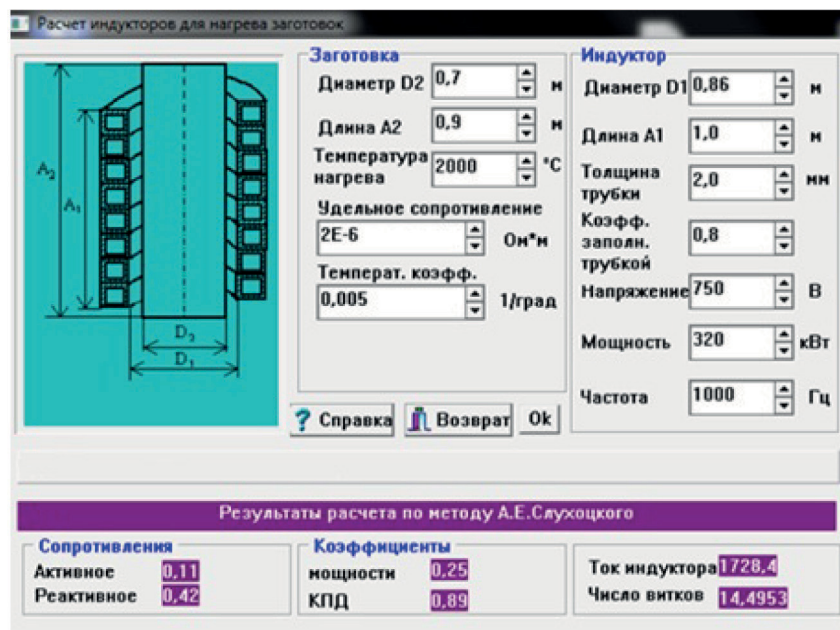


Рисунок 7. Программа для расчета индуктора

Выводы

1. Графитовый тигель можно разделить на две области: полый цилиндр, в котором происходит нагрев диэлектрика, и сплошной цилиндр — дно графитового тигля. В процессе нагрева электромагнитные параметры в этих областях изменяются по-разному.

2. Напряженность магнитного поля по толщине стенки полого цилиндра изменяется практически линейно согласно формуле $H_{mc}(1-x/d)$.

3. Плотность тока практически постоянна в стенке тигля (особенно это касается диапазона координат $0 \leq x \leq 0,03$ м при движении от внутреннего радиуса), где $\delta_m = 1$ А/мм².

4. Напряженность магнитного поля в сплошном цилиндре (область дна тигля) уменьшается при движении от наружного радиуса к центру и становится близкой нулю, когда радиус равен приблизительно 0,01 м. Напряженность магнитного поля в стенке тигля уменьшается до 3000 А/м на ее внутреннем радиусе. Плотность тока в области дна тигля уменьшается от максимального значения в 1,3 А/мм² снаружи тигля до нуля в центре области дна.

3. Полезная мощность в полном цилиндре может быть определена по формуле: $[(H_{mc} - H_{m1}) \cdot a_2]^2 \cdot r_2' / 2$ и составляет $P_{ct} = 200$ кВт.

4. Полезная мощность в сплошном цилиндре равна 2,2 кВт, следовательно, мощность в области дна (сплошного цилиндра) составляет менее двух процентов от мощности в области полого цилиндра.

5. Тепловые потери в теплоизоляции графитового тигля:

$$\Delta P_{\tau} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot a_{\text{из}} \cdot (T_0 - T_1)}{\ln(D_1 / D_2)} \approx 16 \text{ кВт}, \quad (21)$$

где $a_{\text{из}}$ — длина теплоизоляции, м; T_0 — значение температуры внутренней стороны изо-

ляции, °С; T_1 — значение температуры наружной стороны изоляции, °С; D_1 — наружный диаметр изоляции, м; D_2 — внутренний диаметр изоляции, м.

6. Термический КПД:

$$\eta_{\tau} = \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{ст}} + \Delta P_{\tau}} = \frac{200000}{200000 + 16000} = 0,93. \quad (22)$$

7. Мощность источника питания с учетом потерь в подводящих шинах — 320 кВт.

Список литературы

1. Тарабанов А.С., Костиков В.И. Силицированный графит. М.: Metallurgiya, 1977. 208 с.
2. Федин М.А. Выбор принципа регулирования и разработка системы управления индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // Индукционный нагрев. 2014. № 1 (27). С. 24–28.
3. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Формирование эффективных режимов работы индукционной тигельной печи с графитовым тиглем // Особенности обработки и применения изделий из тяжелых цветных металлов: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. С. 84–94.
4. Слухоцкий А.Е. и др. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоиздат, 1981. 328 с.
5. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
6. Бодажков В.А. Индукционный нагрев труб. Л.: Машиностроение, 1969. 151 с.
7. Чунихин А.А. Электрические аппараты: учебник для вузов, общий курс. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Альянс, 2013. 720 с.

References

1. Tarabanov A.S., Kostikov V.I. *Silicized Graphite*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 208 p. [in Russian].
2. Fedin M.A. The Choice of Regulation Principle and the Development of a Control System for Induction Crucible Furnaces with a Conductive Crucible. *Induction Heating*, 2014, No. 1 (27), pp. 24–28. [in Russian].
3. Luzgin V.I., Petrov A.Yu., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. Formation of Effective Operating Modes of an Induction Crucible Furnace with a Graphite Crucible. *Materials of International Scientific and Practical Conference «Features of Processing and Application of Products from Heavy Non-Ferrous Metals*. Yekaterinburg, UrO RAN, 2006, pp. 84–94. [in Russian].
4. Slukhotskiy A.Ye., e.a. *Installation of Induction Heating: Manual for Universities*. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 328 p. [in Russian].
5. Slukhotskiy A.Ye., Ryskin S.Ye. *Inductors for Induction Heating*. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 264 p. [in Russian].
6. Bodazhkov V.A. *Induction Heating Pipes*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1969. 151 p. [in Russian].
7. Chunikhin A.A. *Electrical Apparatus: Textbook for Universities, General Course*. Moscow, Al'yans Publ., 2013. 720 p. [in Russian].



Дунаев Д. И.
Dunaev D. I.

инженер 2 категории,
ФГУП «Российский Федеральный ядерный центр — Всероссийский
научный исследовательский институт экспериментальной физики»,
г. Саров, Российская Федерация

УДК 621.313.333

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВЛИЯНИИ СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА

Состояние вопроса. Асинхронные дебалансные вибродвигатели широко применяются на практике, но при этом имеют существенный недостаток — влияние величины статического момента на процесс пуска, что отрицательно сказывается на их работе. В момент пуска скорость вращения ротора асинхронного вибродвигателя растет неравномерно, это вызвано величиной статического момента дебаланса, что приводит к провалам скорости асинхронного вибродвигателя в первый полупериод вращения до полной остановки — критический режим, при этом время пуска наибольшее. Многие исследователи решали данную проблему использованием двигателей со значительным резервом мощности (30–70 %), однако резерв мощности ухудшает энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности в рабочем режиме).

Цель исследования — рассмотрение и анализ влияния величины статического момента на процесс пуска вибрационной машины с целью выявления способа, который позволит снизить установленную мощность асинхронного вибродвигателя, тем самым улучшая пусковой процесс вибрационного электропривода.

Материалы и методы. Для проведения исследований может применяться любой серийный вибродвигатель с паспортными характеристиками. В настоящей работе исходными данными для исследования использовались паспортные характеристики серийного вибродвигателя ИВ-105-2,2 и основные параметры вибрационной системы. Создан математический аппарат рассматриваемой вибрационной системы и вибродвигателя при общепринятых допущениях в программной среде MBTU 3.7.

Результаты. Предложен способ применения подпружиненного дебаланса, позволяющего улучшить пусковые процессы вибрационного электропривода и предотвратить провалы скорости, а также возможное «застывание» скорости асинхронного вибродвигателя, вызванного значительным значением статического момента. Получены расчетные и экспериментальные осциллограммы.

Вывод. Корректное применение математического аппарата позволяет утверждать, что при проведении исследований с серийным вибродвигателем полученные расчетные результаты совпадают с экспериментальными, это доказывает эффективность применения подпружиненного дебаланса, что позволит повысить надежность вибрационных машин и увеличить срок эксплуатации электропривода.

Ключевые слова: вибрационные машины, вибрационный электропривод, математическая модель, дебалансный асинхронный вибродвигатель, резонанс, пуск, дебаланс.

INVESTIGATION OF STARTING REGIMES OF THE ASYNCHRONOUS UNBALANCED VIBRATION ENGINE UNDER THE INFLUENCE OF THE STATIC MOMENT

Background. Asynchronous unbalanced vibrating motors are widely used in practice, but they have a significant drawback — the influence of the magnitude of the static torque on the start-up process, which negatively affects their operation. At the moment of starting, the rotor speed of an

asynchronous vibration motor grows unevenly, this is caused by the magnitude of the static moment of the unbalance, which results in the failure of the speed of the asynchronous vibrating motor in the first half-cycle of rotation to a complete stop — the critical regime, with the start time being greatest. Many researchers solved this problem using engines with a significant power reserve (30–70 %), however, the power reserve worsens energy performance (efficiency and power factor in operating mode).

The purpose of the study is to analyze and analyze the influence of the magnitude of the static torque on the process of starting the vibrating machine in order to identify a method that will reduce the installed power of an asynchronous vibrating motor, thereby improving the starting process of the vibrating electric drive.

Materials and methods. For carrying out of researches any serial with passport characteristics can be applied. In the present work, the initial data for the study used the passport characteristics of the IV-105-2.2 serial vibratory engine and the main parameters of the vibration system. A mathematical model of the considered vibration system and a vibration motor is developed under the generally accepted assumptions in the software environment of the MVTU 3.7.

Results. A method of applying spring-loaded imbalance is proposed, which allows improving the starting properties of a vibrating electric drive and preventing speed dips, as well as the possible «lowing down» of the speed of an asynchronous vibrational motor caused by a significant value of a static motive. The calculated and experimental oscillograms are obtained.

Conclusions. The correct application of the mathematical apparatus allows us to state that the results obtained with the serial vibrational motor coincide with the experimental ones. This proves the effectiveness of applying spring-loaded imbalance, which will increase the reliability of vibrating machines and increase the life of the electric drive.

Key words: vibration machines, vibration electric drive, mathematical model, unbalanced asynchronous vibration motor, resonance, start-up, unbalance.

Введение

В настоящее время широкое применение на практике получили вибрационные машины и установки на базе асинхронных дебалансных вибродвигателей (далее АДВД), работающих в зарезонансной зоне частотной характеристики (сейсмоиспытательные установки, виброплощадки и т.д.) [1], поэтому процесс изучения вибрационных систем прослеживается у отечественных и у зарубежных исследователей [2–4].

Одним из основных способов пуска АДВД от сети питания является асинхронный пуск. У большинства вибрационных машин основное значение имеет режим пуска, являющийся наиболее тяжелым в связи с увеличенным статическим моментом дебалансного ротора, исходя из этого при выборе мощности АДВД необходимо ориентироваться на режимы пуска. Поэтому зачастую на практике в вибрационных машинах устанавливаются электродвигатели с большим резервом мощности (30–70 %), что часто приводит к ухудшенным энергетическим показателям — КПД и коэффициент мощности при рабочем режиме [5]. Также из-за наличия большого

статического момента дебалансов возникает неравномерное вращение ротора электродвигателя. Из-за этого такие вибрационные машины не допускается использовать в виброустановках, где требуется возмущающая сила синусоидальной формы.

Приняв во внимание, что при скольжении критическом ($S_{кр}$) момент максимальный (M_{max}) АДВД значительно превышает момент пусковой ($M_{п}$), возникает необходимость заблаговременного разгона ротора АДВД до скольжения критического ($S_{кр}$), с целью приведения во вращение дебалансного ротора с большим статическим моментом (рисунок 1).

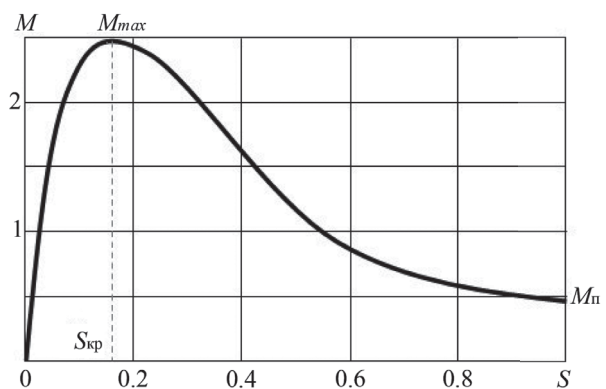


Рисунок 1. Механическая характеристика АДВД

Метод исследования. В настоящей работе рассматриваются пусковые режимы АДВД. В качестве примера используется динамическая одномассовая вибрационная система направленных колебаний с парой вибродви-

гателей. Вибрационная система представлена на рисунке 2, которая является характерной для большинства промышленных вибрационных машин направленных колебаний, имеет следующий вид [6–8]:

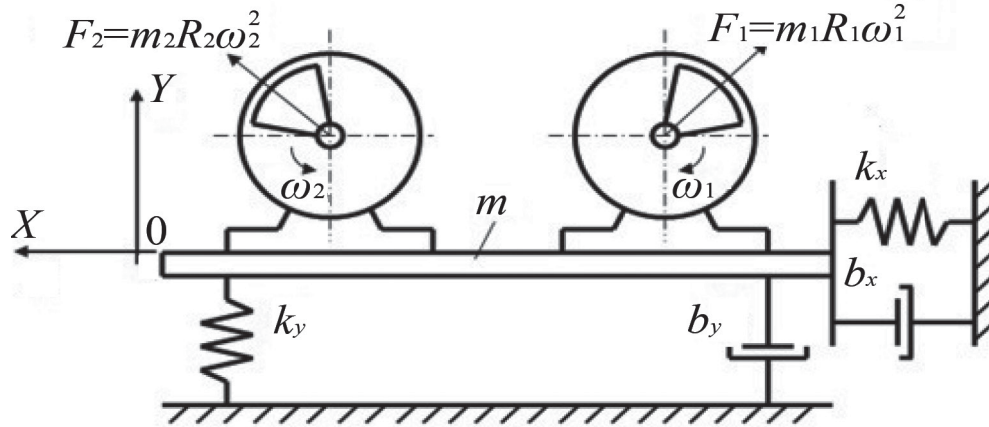


Рисунок 2. Динамическая одномассовая вибрационная система

Уравнения рассматриваемой вибрационной системы записываются следующим образом [6, 7]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b_y \frac{dy}{dt} + k_y y = \sum_{i=1}^2 m_{oi} R_i \omega_i^2 \times \cos \omega_i t; \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b_x \frac{dx}{dt} + k_x x = \sum_{i=1}^2 m_{oi} R_i \omega_i^2 \times \sin \omega_i t; \quad (2)$$

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = M_{эмi} - M_{виби} - m_{oi} R_i g \times \sin \omega_i t - M_{мехi} - M_{мпi}, \quad (3)$$

где m — масса платформы с грузом; y и x — смещение платформы по осям Y и X ; b_y и b_x — коэффициенты сопротивления системы по осям Y и X ; k_y и k_x — жесткости упругих связей по осям Y и X ; m_{oi} — масса i -го дебаланса; R_i — эксцентриситет i -го дебаланса; g — ускорение свободного падения; J_i — приведенный момент инерции i -го электродвигателя; $M_{эмi}$ — момент электромагнитный на валу i -го электродвигателей; $M_{мехi}$ — момент сопротивления на валу i -го электродвигателя, обусловленного механическими потерями; $M_{виби}$ — момент вибрационный на валу i -го электродвигателя; $M_{мпi}$ — момент сопротивления трения i -го электродвигателя; ω_i — частота вращения вала i -го электродвигателя.

В уравнениях (1) и (2) описывается движение платформы согласно II закону Ньютона в проекциях на оси X и Y соответ-

ственно, а уравнение (3) описывает равновесие моментов на валу i -го двигателя соответственно.

Момент вибрационный i -го вибродвигателя имеет две составляющие:

$M_{вибиY} = F_{Xi} y$ — составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси Y и проекции центробежной силы i -го АДВД на ось X , где F_{Xi} определяется по формуле:

$$F_{Xi} = m_{oi} R_i \omega_i^2 \sin \omega_i t;$$

$M_{вибиX} = F_{Yi} x$ — составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси X и проекции центробежной силы i -го АДВД на ось Y , где F_{Yi} определяется по формуле:

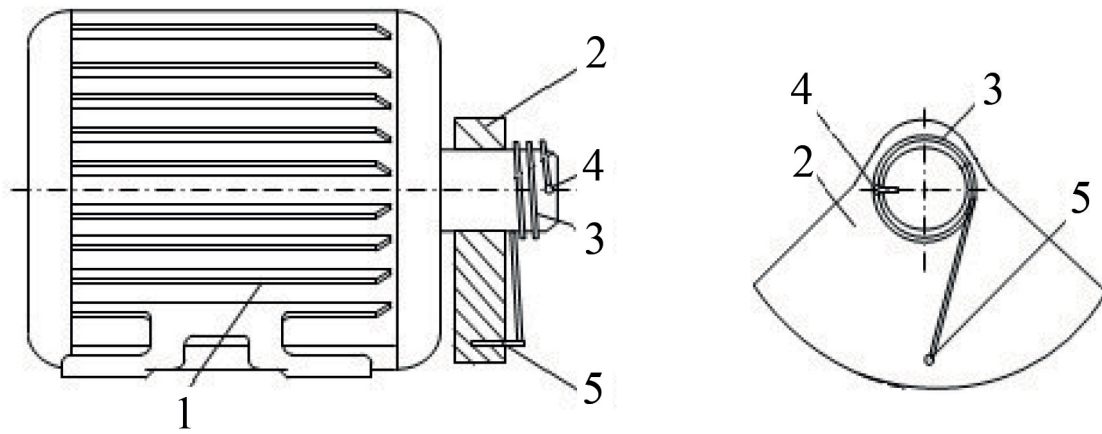
$$F_{Yi} = m_{oi} R_i \omega_i^2 \cos \omega_i t.$$

Результирующее значение момента вибрационного, приложенного к валу i -го АДВД, определяется формулой:

$$M_{виби} = F_{Xi} y + F_{Yi} x.$$

Для проведения исследований пусковых режимов АДВД, динамической одномассовой вибрационной системы направленных колебаний, показанной на рисунке 2, в математической модели использовался вибродвигатель с упругим элементом связи между ротором АДВД и дебалансом, представленный на рисунке 3.

АДВД состоит из асинхронного двигателя (1), на валу двигателя установлен дебаланс (2), который имеет возможность вращения,



1 — асинхронный двигатель; 2 — дебаланс; 3 — пружина;
4 — место крепления пружины на валу двигателя; 5 — место крепления пружины на дебалансе

Рисунок 3. Асинхронный дебалансный вибродвигатель

а также упругий элемент в виде пружины кручения (3). Одним концом пружина закреплена на валу двигателя (4), а другим концом на дебалансе (5).

В момент пуска АДВД и по мере набора номинальной скорости, в начальный период времени, приводится во вращение выходной вал, который приводит к скручиванию пружины, установленной на выходном валу. При скручивании пружины достигается ее максимальный момент, который компенсирует статический момент дебаланса, происходит запуск дебаланса и приведение его во вращение с выходным валом.

Правильный подбор пружины кручения с необходимой жесткостью приведет к сокращению времени запуска вибродвигателя, пропадет явление «раскачки» дебаланса на валу.

Момент пружины вычисляется по формуле:

$$M_{np} = k_{np} \alpha_c, \quad (4)$$

где k_{np} — коэффициент жесткости пружины, который зависит от диаметра проволоки, количества витков (рабочих), а также диаметра пружины, Н м/рад; α_c — угол скручивания, рад.

Момент пружины M_{np} в динамике запишется следующим образом:

$$M_{np}(\omega) = k_{np} \omega t. \quad (5)$$

Подставив формулы (4) и (5) в уравнение (3), получим:

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = M_{\Sigma Mi} - M_{\text{ВИБи}} - m_{0i} R_i g \times \\ \times \sin \omega_i t - M_{\text{МЕХи}} + M_{np} - k_{np} \omega t. \quad (6)$$

На основе полученных уравнений в программном пакете МВТУ 3.7 был создан математический аппарат рассматриваемой динамической одномассовой вибрационной системы направленных колебаний и асинхронного дебалансного вибродвигателя при общепринятых допущениях. Массы дебалансов подобраны так, что при отсутствии вспомогательного упругого элемента (пружины) пуск был неосуществим. При проведении исследований варьировался коэффициент жесткости пружины:

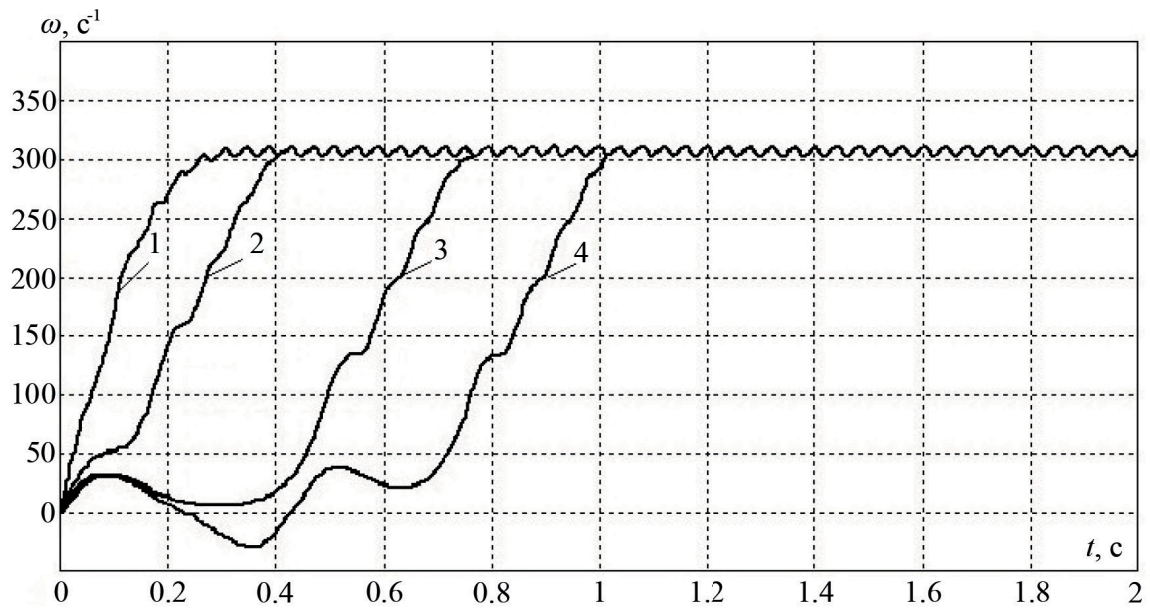
$$k_1 > k_2 > k_3 > k_4.$$

Используемые параметры вибрационной системы при проведении исследований, параметры платформы: $m=172$ кг, $b_y=800$ Н/м, $b_x=500$ Н/м, $k_y=3000000$ кг·м/с², $k_x=390000$ кг·м/с². Тип двигателя (серийный вибродвигатель АДВД марки ИВ-105-2,2) со следующими параметрами: $P_H=2,2$ кВт, $n_1=3000$ об/мин, $R_1=3,13$ Ом, $L_1=0,015$ Гн, $R_2=5,7$ Ом, $L_2=0,010$ Гн, $L_m=0,51$ Гн, $J_d=0,0034$ кг·м², $m_0=3,7$ кг, $r_0=0,06$ м.

Результаты исследования. Осциллограммы результатов исследования представлены на рисунке 4.

Анализ осциллограмм показывает, что осциллограмма 4 совпадает с граничным режимом вибрационной системы без пружины, а осциллограммы 1, 2, 3 показывают, что при увеличении жесткости пружины уменьшается время пуска АДВД и пропадает явление «раскачки» дебаланса на валу.

В ходе эксперимента был проведен пуск АДВД, на валу которого с помощью шпоноч-



1, 2, 3, — изменение частоты вращения АДВД с увеличением жесткости упругого элемента;
4 — частота вращения АДВД без пружины

Рисунок 4. Осциллограммы пусковых характеристик с изменяемой величиной жесткости пружины

ного соединения и гайки был жестко закреплен дебаланс. Результаты эксперимента, представленные на рисунке 5, показали, что осциллограмма 4 на рисунке 4 проведенных исследований совпала с экспериментальной осциллограммой.

Таким образом, все вышеизложенное приводит к идеи развития о применении подпружиненных дебалансов, которые позволят улучшить пусковые характеристики вибрационных машин и, как следствие, снизить установленную мощность асинхронного вибродвигателя.

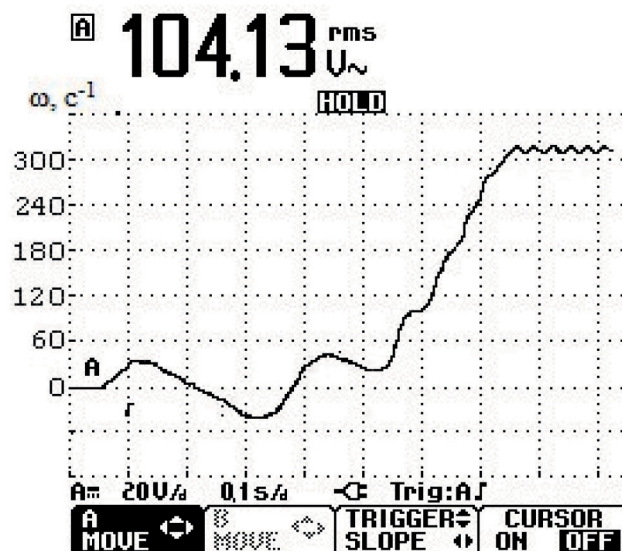


Рисунок 5. Экспериментальный график изменения частоты вращения АДВД с жестко закрепленным дебалансом

Выводы

1. Созданный математический аппарат позволит проводить исследования как вибрационной системы в целом, так и отдельных вибродвигателей.

2. Математический аппарат учитывает: используемые параметры вибродвигателей, величину статического момента и пульсирующий вибрационный момент, а также трение подшипников вибродвигателей.

3. Корректное применение математического аппарата позволяет утверждать, что при проведении исследований с различными серийными вибродвигателями полученные результаты совпадают с результатами эксперимента, это доказывает ее эффективность.

Список литературы

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: Руда и Металлы, 2013. 640 с.
2. Шестаков В.М., Белокузов Е.В., Епешкин А.Е. Синтез законов управления режимами работы автоматизированных вибрационных установок // Электричество. 2013. № 11. С. 31–35.
3. Jnoue J., Araki Y., Hirakawa M. The Self-Synchronization of Mechanical Vibrators of the Resonance Type Vibrating Machinery with Multidegree of Freedom // *Dyn. Multibody Syst. Symp.*, Munich, 1977. Berlin e. a., 1978. P. 75–86.
4. Michalczyk J. Angular Oscillations of Vibratory Machines of Independent Driving Systems Caused by a Non-Central Direction of the Exciting Force Operations // *Arch. Min. Sci. Warszawa*, 2012. Vol. 57, No. 1. P. 169–177.
5. Дмитриев В.Н., Горбунов А.А. Исследование пусковых режимов асинхронного дебалансного вибродвигателя // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 1–2. С. 119–122.
6. Дмитриев В.Н., Гаврилов Е.Н. Переходные процессы резонансных вибрационных машин // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2011. № 4. С. 52–55.
7. Гаврилов Е.Н. Динамические процессы резонансных вибрационных машин // *Вестник Казанского технологического университета*. Т. 16. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. № 12. С. 87–90.
8. Гаврилов Е.Н. Математическое описание одномассовой вибрационной транспортирующей машины // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. № 1 (18). С. 339–343.

4. Применение подпружиненных дебалансов позволит повысить надежность вибрационных машин и увеличить срок эксплуатации электропривода в целом.

References

1. Blekhman I.I. *Theory of Vibration Processes and Devices. Vibration Mechanics and Vibration Technology*. St. Petersburg, Publishing house «Ore and Metals», 2013. 640 p. [in Russian].
2. Shestakov V.M., Belokuzov E.V., Epishkin A.E. *Synthesis of the Laws Governing the Operating Modes of Automated Vibration Units*. Electricity, 2013, No. 11, pp. 31–35. [in Russian].
3. Jnoue J., Araki Y., Hirakawa M. The Self-Synchronization of Mechanical Vibrators of the Resonance Type Vibrating Machinery with Multidegree of Freedom. *Dyn. Multibody Syst. Symp., Munich, 1977, Berlin e. a., 1978*. P. 75–86.
4. Michalczyk J. Angular Oscillations of Vibratory Machines of Independent Driving Systems Caused by a NonCentral Direction of the Exciting Force Operations. *Arch. Min. Sci. Warszawa*, 2012, Vol. 57, No. 1, pp. 169–177.
5. Dmitriev V.N., Gorbunov A.A. Investigation of the Starting Modes of an asynchronous Unbalanced Vibrating Motor. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2008, No. 1–2, pp. 119–122. [in Russian].
6. Dmitriev V.N., Gavrilov E.N. Transient Processes of Resonant Vibration Machines. *Electrotechnical Complexes and Control Systems*, 2011, No. 4, pp. 52–55. [in Russian].
7. Gavrilov E.N. Dynamic Processes of Resonant Vibration Machines. *Bulletin of Kazan Technological University*. Kazan, Publishing house KNIU, 2013, No. 12, Vol. 16. pp. 87–90. [in Russian].
8. Gavrilov E.N. Mathematical Description of a Single-Mass Vibrating Transporting Machine. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2015, Vol. 18, No. 1, pp. 339–343. [in Russian].



Шapiro С. В.

Shapiro S. V.

доктор технических наук,
профессор,
профессор кафедры
медицинской физики
с курсом информатики,
ФГБОУ ВО «Бакирский
государственный
медицинский университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Гумерова М. Б.

Gumerova M. B.

кандидат технических
наук, доцент, доцент
кафедры электромеханики,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Бабикова Н. Л.

Babikova N. L.

кандидат технических
наук, доцент кафедры
электромеханики,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный
авиационный технический
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Гареев Р. И.

Gareev R. I.

старший преподаватель кафедры
электромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Юшкова О. А.

Yushkova O. A.

кандидат технических наук, доцент
кафедры электромеханики, ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.31

КАСКАДНЫЙ АСИНХРОННО-СИНХРОННЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

В статье описываются устройство и принцип действия каскадного асинхронно-синхронного двигателя, который благодаря усовершенствованию конструкции способен вырабатывать реактивную мощность, т.е. работать как обычный синхронный, при этом не имеет скользящих контактов. К тому же расход активных материалов — обмоточного провода и электротехнической стали — и, соответственно, потери у каскадного двигателя практически такие же, как у асинхронного на ту же мощность и число оборотов. В результате проведенного сравнения габаритных факторов каскадного асинхронно-синхронного двигателя и обычных асинхронных двигателей установлено, что при одинаковом числе пар полюсов масса и потери нашего двигателя должны превосходить таковые показатели асинхронного двигателя на 19 %, а при соотношениях $p_1 : p_2 = 2 : 1$ на 18,5 %, при 3 : 1 и 4 : 1 соответственно на 18 % и 16 %. Предложено устройство каскадного двигателя с короткозамкнутым

ротором, благодаря которому трехфазный ток имеет опережающий характер, а каскадный двигатель вырабатывает реактивную мощность. При этом трехфазный выпрямительный мост, питающий обмотку возбуждения, можно подключить прямо к питающей сети, без применения понижающего трансформатора.

Проведен анализ работы каскадной системы при нагрузке, приведена схема замещения. Отставание по фазе магнитного поля, создаваемого током ротора второй ступени, приводит к увеличению его вращающего момента, к которому добавляется вращающий момент асинхронного преобразователя, который также растет с ростом токов в его статоре и роторе. Нагрузочные характеристики каскада мало чем отличаются от нагрузочных характеристик синхронного двигателя.

Приведено экспериментальное исследование, подтверждающее возможность создания каскадного двигателя, сочетающего преимущества синхронных и асинхронных машин. Экспериментальная установка состоит из двух крановых асинхронных двигателей с фазным ротором серии ДМТФ-011-041 IP44, и двигателя постоянного тока типа П-42 в качестве нагрузки.

Ключевые слова: каскадный асинхронно-синхронный двигатель, вращающееся магнитное поле, габаритные факторы, формула Арнольда.

CASCADING ASYNCHRONOUS-SYNCHRONOUS NON-CONTACT MOTORS

The article describes the device and the principle of operation of a cascade asynchronous-synchronous motor, which is capable of producing reactive power, thus work as a normal synchronous, while it does not have sliding contacts. The consumption of active materials and the losses of the cascade are almost the same as for asynchronous at the same power and speed. It was established that for an equal number of pole pairs, the mass and losses of our engine should exceed those of an asynchronous motor by 19 %, and for $p_1 : p_2 = 2 : 1$ ratios 18.5 %, at 3 : 1 and 4 : 1, respectively, by 18 % and 16 %. The device of a cascade motor with a squirrel-cage rotor is proposed, thanks to which the three-phase current has a leading character, and the cascade produces reactive power. The three-phase rectifier bridge, which supplies the excitation winding, can be connected directly to the mains without the use of a transformer.

The analysis of operation of the cascade system under load is carried out, the scheme of substitution is given. The lag in the phase of the magnetic field created by the current of the second stage rotor leads to an increase in its torque, to which the torque of the asynchronous converter is added. The load characteristics of the cascade differ little from the load characteristics of the synchronous motor.

The experimental study confirmed the possibility of creating a cascade combining the advantages of synchronous and asynchronous machines.

Key words: cascading asynchronously-synchronous motor, the rotating magnetic field, dimensional factors, Arnold formula.

Асинхронные двигатели, повсеместно применяемые в промышленности, несмотря на свою дешевизну и высокую надежность обладают одним весьма серьезным недостатком — они являются потребителями реактивной мощности. Поэтому на большинстве промышленных предприятий наряду с ними приходится применять синхронные двигатели, которые, хотя и дороже первых и менее надежны, позволяют не потреблять, а вырабатывать реактивную мощность.

В исследовательской лаборатории кафедры электромеханики Уфимского государ-

ственного авиационного технического университета (УГАТУ) исследован каскадный асинхронно-синхронный двигатель, который путем небольшого усовершенствования конструкции способен вырабатывать реактивную мощность, т.е. работать как обычный синхронный, но при этом не имеет скользящих контактов. Ротор этого двигателя может быть выполнен короткозамкнутым, как и у асинхронного. Расход активных материалов — обмоточного провода и электротехнической стали — и, соответственно, потери у каскадного двигателя практически

такие же, как у асинхронного на ту же мощность и число оборотов.

Каскадные электромеханические системы довольно подробно исследовались в прошлом веке как у нас в стране, так и за рубежом [1–4], но в основном в генераторном режиме. О возможности их работы в режиме двигателя, т.е. преобразователя электрической энергии в механическую, в ряде работ говорилось, но лишь как иллюстрации общетеоретического положения об обратимости такого рода систем [1]. Особенности работы подобного рода каскадов в качестве двигателей слабо изучены.

Устройство и принцип действия каскада

На рисунке 1 дана принципиальная схема каскада, состоящего из обращенной синхронной машины I и асинхронного преобразователя, работающего в режиме тормоза II.

Статорная обмотка асинхронного преобразователя w_c подключена к обычной трехфазной сети частотой f_c . Для определенности обмотки w_c , w_{p1} и w_{p2} показаны соединенными в трехфазные и многофазные звезды, хотя они могут быть соединены и треугольником.

Роторная обмотка w_{p1} ступени I подсоединена к многофазной роторной обмотке ступени II – w_{p2} так, что фаза m первой связана с фазой 1 второй, а фаза $m-1$ с фазой 2 и т.д.

Поскольку полюса синхронной ступени находятся на статоре, ее обмотка возбуждения w_d подключена к источнику постоянного напряжения без контактных колец.

При подключении обмотки w_c к трехфазной цепи в воздушном зазоре преобразователя II возникает вращающееся магнитное поле с частотой n_1 , равной

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_c}{p_1}, \quad (1)$$

где p_1 — число пар полюсов этого преобразователя, об/мин.

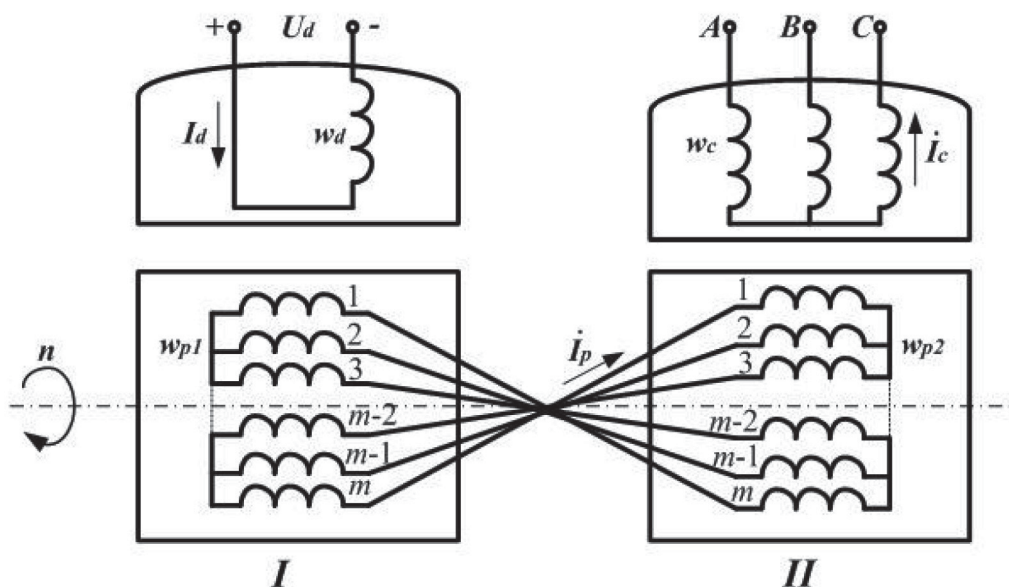
В роторной обмотке w_{p2} этим полем наводятся многофазные ЭДС и, поскольку эта обмотка связана с w_{p1} , появляется ток I_p также многофазный с частотой f_1 . Возникает вращающийся момент, и роторы обеих ступеней каскада начинают вращаться с частотой n [об/мин].

В обмотках ротора w_{p1} при таком вращении наводится ЭДС полем, созданным полюсами машины I, с частотой

$$f_2 = \frac{p_2 \cdot n}{60}, \quad (2)$$

где p_2 — число пар полюсов обращенной синхронной машины 2. Появляется встречный ток I_p , тоже многофазный.

Поскольку последовательность фаз обмоток w_{p2} и w_{p1} обратная, этот ток создает в воз-



I — обращенный синхронный двигатель (вторая ступень каскада); II — асинхронный преобразователь (первая ступень каскадного двигателя); m — число фаз роторных обмоток w_{p1} и w_{p2} ; I_c , I_p и I_d — токи в статоре и роторе асинхронной ступени, а также в обмотке возбуждения статорной ступени w_d ; n — число оборотов ротора

Рисунок 1. Принципиальная схема асинхронно-синхронного каскада

душном зазоре преобразователя II дополнительное магнитное поле, вращающееся в направлении, противоположном направлению n_1 . Частота вращения этого поля n' равна

$$n' = \frac{60 \cdot f_c}{p_1}. \quad (3)$$

При этом возникает тормозящий магнитный момент, препятствующий разогнаться роторной части каскада до частоты вращения, близкой к n_1 , как это обычно бывает у асинхронного двигателя. Числа витков обмоток w_{p1} и w_{p2} выбираются такими, чтобы ЭДС, наводимые в них при одинаковой частоте f_2 , E_{p1} и E_{p2} , были равны или, по крайней мере, близки по величине друг к другу.

Вследствие встречного включения последовательности фаз обмоток эти ЭДС имеют одинаковую частоту и уравнивают друг друга при скорости вращения ротора n , равной

$$n = \frac{60 \cdot f_c}{p_1 + p_2}. \quad (4)$$

Частота f_2 этих ЭДС и тока ротора в этом случае равна

$$f_2 = f_p = f_c \frac{p_2}{p_1 + p_2}. \quad (5)$$

Отношение

$$s = \frac{f_p}{f_c} = \frac{p_2}{p_1 + p_2} \quad (6)$$

по существу, скольжение ротора относительно магнитного поля, создаваемого статорной обмоткой w_c асинхронного преобразователя II (рисунок 1).

Частота вращения n является стационарной для нашего каскада.

На рисунке 2 схематически показаны вращающиеся магнитные поля и моменты обеих ступеней каскада (для большей наглядности обе ступени изображены двухполюсными).

Ясно, что в силу третьего закона Ньютона момент, действующий на обмотку w_c , равен моменту, действующему на обмотку w_{p2} , но направлен в противоположную сторону:

$$M_c = M_{p2}.$$

Мощность P_1 , потребляемая каскадным двигателем из сети, определяется за вычетом потерь в обмотке w_c и в стали магнитной системы ступени II ΔP_1 — произведением

$$P_{1\text{мех}} = P_1 - \Delta P_1 = M_c \omega_1, \quad (7)$$

где ω_1 — угловая скорость вращения магнитного поля этой ступени, равная

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60} = \frac{2\pi \cdot f_c}{p_1}. \quad (8)$$

Мощность $P_{1\text{мех}}$, передаваемая ротором ступени II на вал и от него в нагрузку, равна

$$P_{1\text{мех}} = M_{p2} \omega, \quad (9)$$

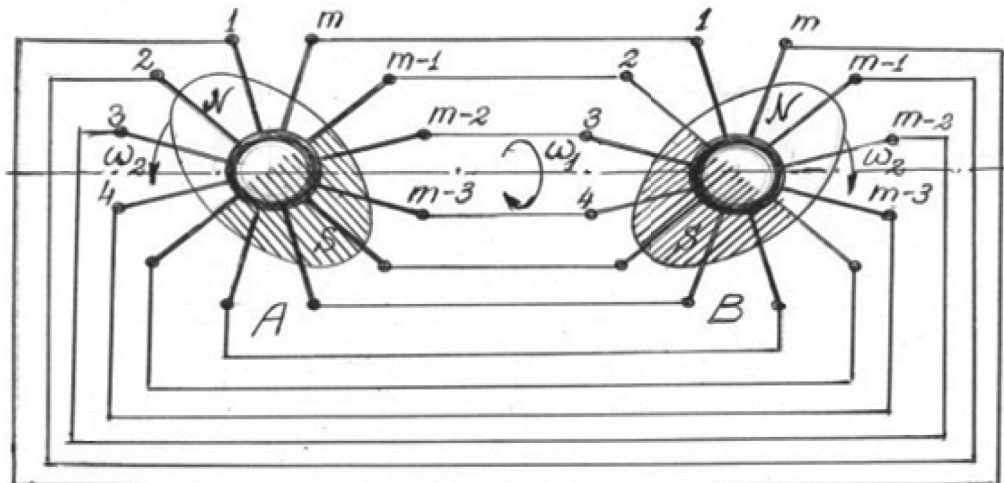
где ω — угловая скорость вращения ротора каскада, равная

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot f}{p_1 + p_2} = \frac{2\pi \cdot f_1 \cdot p_1}{p_1 + p_2}. \quad (10)$$

Нетрудно видеть, что если не учитывать потери в роторе, то

$$P_{p1\text{мех}} = s P_{1\text{мех}}, \quad (11)$$

т.е. $P_{p1\text{мех}} < P_{1\text{мех}}$.



ω_1 и ω_2 — угловые скорости вращения магнитного поля статора асинхронного преобразователя и магнитных полей роторных обмоток (относительно ротора)

Рисунок 2. Схематическое изображение вращающихся магнитных полей (N-S) ступеней каскада A и B

Остальная мощность, потребляемая каскадным двигателем из сети, преобразуется обращенным синхронным двигателем I :

$$P_{2\text{мех}} = (1-s)P_{1\text{мех}} = \frac{P_1}{p_1 + p_2} P_{1\text{мех}}. \quad (12)$$

Сравнение габаритных факторов каскадного асинхронно-синхронного двигателя и обычного асинхронного двигателя

Формулы (7), (9) и (12) позволяют сопоставить экономические показатели описываемого в статье каскадного двигателя с обычным асинхронным или синхронным двигателем на ту же выходную мощность и угловую скорость вращения. Согласно известной формуле Арнольда [5], габариты, масса активных материалов, потери в стали и обмотках и вытекающие из этих данных стоимостные показатели любой электрической машины определяются так называемым габаритным фактором Γ , равным

$$\Gamma = \left(\frac{P}{n}\right)^{\frac{3}{4}}, \quad (13)$$

где P — мощность электрической машины; n — частота вращения ее вала. Степень $\frac{3}{4}$ связана с так называемым «законом роста» [5], указывающим на то, что с увеличением отношения $\frac{P}{n}$ масса активных материалов машины, а вместе с ней и потери в ней, растут несколько медленнее.

В нашем случае габаритный фактор Γ_k складывается из двух-асинхронного преобразователя Γ_1 и обращенной синхронной машины Γ_2 :

$$\begin{aligned} \Gamma_k &= \Gamma_1 + \Gamma_2 = \left(\frac{P_1}{n_1}\right)^{\frac{3}{4}} + \left(\frac{P_2}{n}\right)^{\frac{3}{4}} = \\ &= \left(\frac{P_1}{n}s\right)^{\frac{3}{4}} + \left(\frac{P_1(1-s)}{n}\right)^{\frac{3}{4}} = \\ &= \left(\frac{P_1}{n}\right)^{\frac{3}{4}} \left[(1-s)^{\frac{3}{4}} + s^{\frac{3}{4}} \right] = \left(\frac{P_1}{n}\right)^{\frac{3}{4}} \frac{p_1^{\frac{3}{4}} + p_2^{\frac{3}{4}}}{(p_1 + p_2)^{\frac{3}{4}}}. \quad (14) \end{aligned}$$

Первый сомножитель этого выражения $\left(\frac{P_1}{n}\right)^{\frac{3}{4}}$ представляет собой габаритный фактор обычного асинхронного двигателя мощностью P_1 частотой вращения n . Второй сомно-

житель — дробь $\frac{p_1^{\frac{3}{4}} + p_2^{\frac{3}{4}}}{(p_1 + p_2)^{\frac{3}{4}}}$ — показывает, во

сколько раз масса активных материалов предлагаемого здесь каскадного двигателя должна превосходить массу асинхронного двигателя. Несложные расчеты показывают, что если $p_1 = p_2$, то масса и потери нашего двигателя должны превосходить асинхронный на 19 %, при $p_1 : p_2 = 2 : 1$ на 18,5 %, при $3 : 1$ и $4 : 1$ соответственно на 18 % и 16 %.

Асинхронно-синхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Дальнейшее усовершенствование асинхронно-синхронного каскада можно осуществить, выполнив оба ротора с короткозамкнутой обмоткой [6] (рисунок 3). Правда, у такого каскада должно быть одинаковое число пар полюсов — $p_1 = p_2 = p$.

Как видим, у ротора левой ступени каскада замкнуты накоротко только левые концы лежащих в пазах проводов, а у ротора правой ступени замыкающее кольцо расположено справа.

Расположенные друг напротив друга концы роторных обмоток соединены между собой наискосок, т.е. так, чтобы последовательность фаз роторных токов левой ступени была обратной по отношению к последовательности фаз правой ступени. В результате магнитные поля обоих роторов вращаются друг относительно друга в противоположные стороны. Именно такое взаимное вращение и предполагает принцип действия каскадного двигателя, описанный выше (см. рисунок 1).

На рисунке 4 дан чертеж каскадного двигателя мощностью 2 кВт с числом оборотов $n = 750$ [об/мин]. Двигатель спроектирован на базе серийно выпускаемой асинхронной машины 4А112М4У3. Асинхронная ступень каскада выполнена практически так же, как исходный двигатель, только роторная обмотка имеет замыкающее кольцо с одного (на рисунке 4 правого) торца магнитопровода. Левые концы этой обмотки не замкнуты — в них установлены отверстия с винтовой нарезкой с целью гальванической связи с шинами, электрически замыкающими эту обмотку с концами роторной обмотки синхронной ступени.

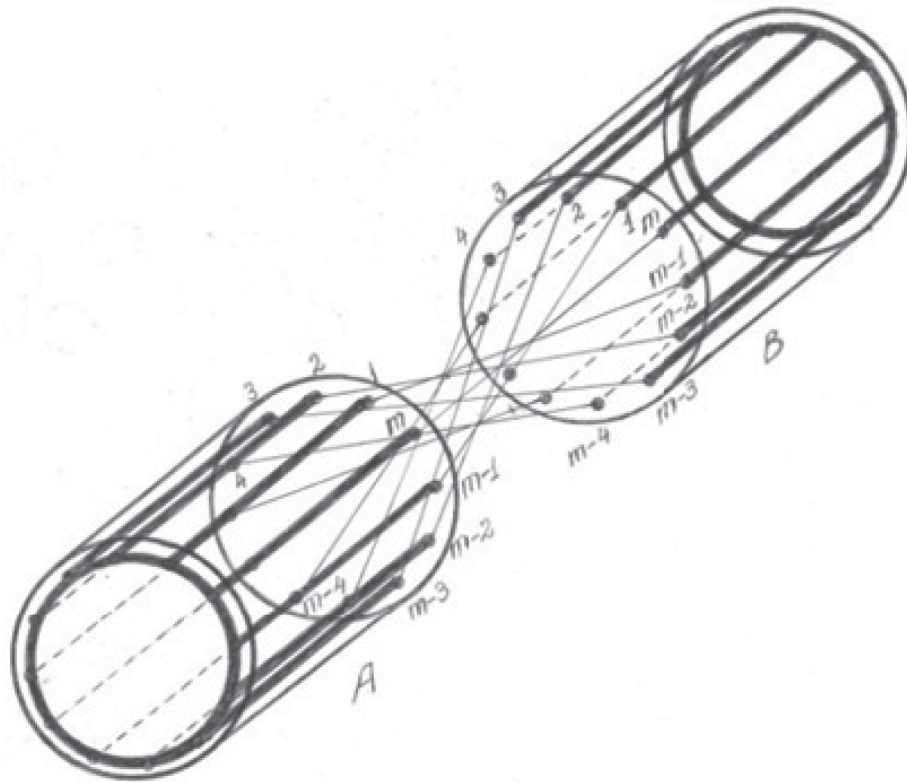


Рисунок 3. Схема короткозамкнутой обмотки ротора каскадного двигателя

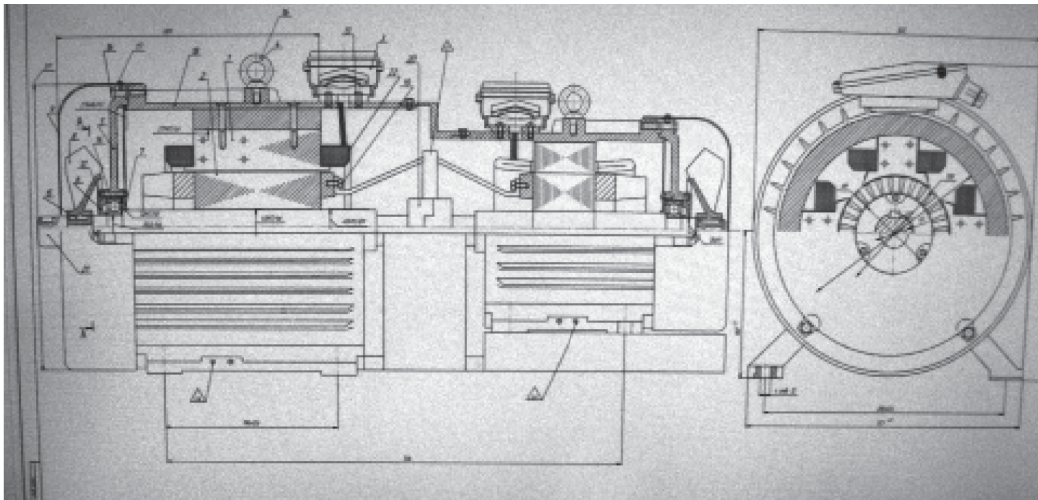


Рисунок 4. Чертеж каскадного двигателя мощностью 2 кВт и числом оборотов 750 [об/мин]

Статорная обмотка выполнена так же, как и у двигателя 4A112M4УЗ, т.е. имеет 36 пазов, две пары полюсов и двухслойную обмотку. Воздушный зазор между статором и ротором так же, как у исходной машины, составляет 0,3 мм.

Диаметр магнитопровода ротора синхронной ступени каскадного двигателя тоже такой же, как у исходного, — 122 мм. Точно такое же число пазов — 28 и все размеры паза и зубцов. Ничем не отличается и высота спинки ротора. Иными словами ротор второй ступени каскада набирается из таких же

штампованных пластин электротехнической стали, что и у ротора первой ступени. Различие лишь в длине пакета ротора — у синхронной ступени он в два раза длиннее, чем у асинхронной. Благодаря этому обеспечивается, в конечном счете, опережающий по фазе характер выходного тока нашего двигателя.

Роторная обмотка второй ступени выполнена также алюминиевой беличьей клеткой с одним короткозамкнутым кольцом, только с левого торца магнитопровода. Правые концы не замкнуты, и у них имеются винто-

вые отверстия для подсоединения шин связи с роторной обмоткой асинхронной ступени.

На этом аналогия второй ступени каскада с первой заканчивается.

Пакет ротора синхронной машины имеет длину, большую, чем у пакета ротора первой ступени. Благодаря этому трехфазный ток, потребляемый каскадным двигателем, имеет опережающий характер, т.е. вырабатывает, как и обычный синхронный, реактивную мощность.

Статор второй ступени выполнен с четырьмя явно выраженными полюсами. Обмотка возбуждения выполнена тем же проводом, что и статорная обмотка асин-

хронного преобразователя. Как показали расчеты, благодаря этому трехфазный выпрямительный мост, питающий обмотку возбуждения, можно подключить прямо к питающей сети, не прибегая к понижающему трансформатору.

Анализ работы каскадного двигателя при нагрузке

На рисунке 5 дана схема замещения каскада.

Все величины на этой схеме записаны в комплексной форме и приведены к первичной (статорной) обмотке асинхронного преобразователя и к его одной фазе:

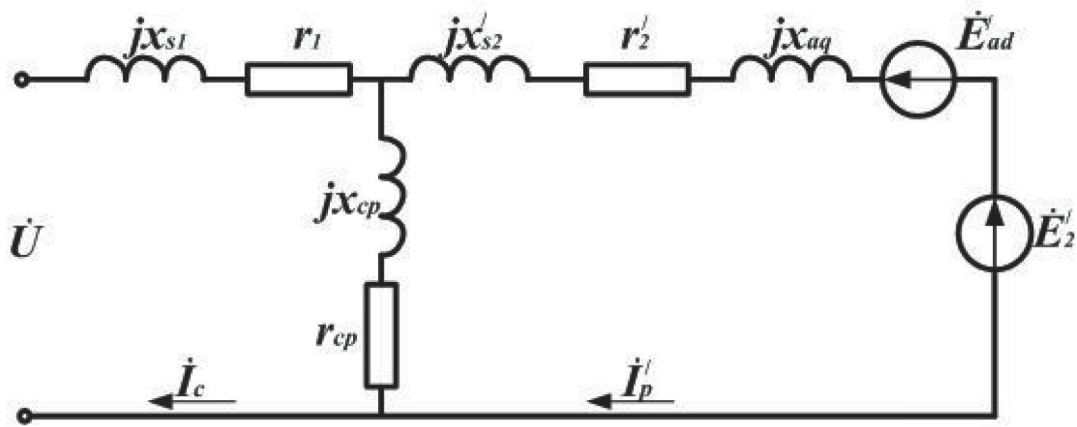


Рисунок 5. Схема замещения каскадного асинхронно-синхронного двигателя

\dot{U} — действующее значение фазного напряжения сети, В;

\dot{I}_c — действующее значение фазного тока первичной обмотки статора первой ступени, А;

\dot{I}'_p — действующее значение роторного тока каскада, приведенное к обмотке w_{c1} ;

r_1 — активное сопротивление фазной обмотки w_c ;

jx_{s1} — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки w_c ;

jx_{cp} — индуктивное сопротивление взаимной индукции обмоток w_c и w_p ;

r_{cp} — активное сопротивление, обусловленное потерями в стали асинхронного преобразователя;

jx'_{aq} — индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря синхронной ступени, приведенное к обмотке w_c ;

r'_2 и jx'_{s2} — активное и индуктивное сопротивления обмоток w_{p1} и w_{p2} , приведенные к w_c ;

\dot{E}'_2 — действующее значение ЭДС, наводимой в обмотке w_{p2} , приведенное к w_c ;

\dot{E}'_{ad} — часть ЭДС, наведенной потоком продольной реакции якоря и не учтенное падением напряжения на jx'_{aq} , приведенная к обмотке w_c .

Приведение параметров обмоток w_{p1} и w_{p2} осуществляется по классическим формулам электромеханики [7] с учетом различия частоты токов I_1 и I_2 . Для каскада с короткозамкнутыми обмотками w_{p1} и w_{p2} эти параметры рассчитываются по формулам:

$$x'_{aq} = 2 \left(\frac{w_c k_{wc} \pi p}{z_2} \right)^2 \omega_1 \Lambda_{aq}, \quad (15)$$

$$r'_2 = 2r_2 \left(\frac{w_c k_{wc} \pi p}{z_2} \right)^2, \quad (16)$$

где r_2 — сумма сопротивлений одного стержня первой ступени каскада и одного стержня второй ступени каскада;

$$x'_{s2} = 2 \left(\frac{w_c k_{wc} \pi p}{w_c^2} \right)^2 \omega_1 \Lambda_{s2}, \quad (17)$$

$$x'_{s1} = \omega_1 \Lambda_{s1}, \quad (18)$$

$$\dot{E}'_{ad} = \dot{I}'_{pp} j(x'_{ad} - x'_{aq}), \quad (19)$$

где \dot{I}'_{pp} — реактивная (т.е. сдвинутая на 90° относительно ЭДС \dot{E}'_2) составляющая тока \dot{I}'_p , приведенная к обмотке w_c ;

$$E'_2 = 4,44 \cdot f_1 \left(\frac{w_c k_{wc} \pi p}{z_2} \sqrt{2} \right) \Phi_2, \quad (20)$$

$$x'_{ad} = 2 \left(\frac{w_c k_{wc} \pi p}{z_2} \right)^2 \omega_1 \Lambda_{ad}. \quad (21)$$

В формулах (15)–(21) принято Λ_{ad} , Λ_{aq} , Λ_{s2} , Λ_{s1} — магнитные проводимости для потоков продольной и поперечной реакции якоря и потока рассеяния роторных обмоток второй и первой ступеней каскада; r_1 и r_2 — активные сопротивления одного стержня ротора первой и второй ступеней каскада; k_{wc} — обмоточный коэффициент статорной обмотки асинхронного преобразователя; Φ_2 — основной магнитный поток синхронной ступени каскада.

Анализ схемы замещения рисунка 5 показывает, что при нагрузке двигателя, т.е. появлении тормозного момента на его валу, ЭДС E_2 не меняется, так как сохраняются синхронное число оборотов и магнитный поток Φ_2 , создаваемый полюсами, возбуждение второй ступени, но происходит отставание по фазе магнитного потока ротора этой ступени.

В свою очередь, это приводит к увеличению тока I_2 и, вследствие этого, возникновению реакции якоря в синхронной ступени и увеличению тока I_1 .

Как и в обычном синхронном двигателе, отставание по фазе магнитного поля, создаваемого током ротора второй ступени, приводит к увеличению его вращающего момента. К этому моменту добавляется вращающий момент асинхронного преобразователя, который также растет с ростом токов в его статоре и роторе.

Нагрузочные характеристики каскада мало чем отличаются от нагрузочных характеристик синхронного двигателя. Также как у последнего, имеется предельный, макси-

мальный момент M_{max} , превысив который, можно вывести каскад из синхронизма.

Экспериментальное исследование асинхронно-синхронного каскада

В указанной выше исследовательской лаборатории была произведена экспериментальная проверка асинхронно-синхронного каскадного двигателя.

На рисунке 6 изображена фотография этой установки.

Она состоит из двух крановых асинхронных двигателей с фазным ротором серии ДМТФ-011-041 IP44 и двигателя постоянного тока типа П-42 в качестве нагрузки.

Их номинальные данные:

- двигатель ДМТФ-011-041 IP44;
 - трехфазное напряжение питания 220/380 В;
 - частота сети — 50 Гц;
 - мощность 1,4 кВт при повторно-кратковременном режиме S3 — 40 %;
 - угловая скорость ротора — 880 об/мин;
 - напряжение ротора — 118 В;
 - ток ротора — 9,0 А;
- двигателя П-42:*
- мощность — 8 кВт;
 - число оборотов — 3000 об/мин;
 - ток якоря — 43 А;
 - ток возбуждения — 5А

При проведении испытаний фазные обмотки роторов асинхронных двигателей соединяли по схеме, представленной на рисунке 1 ($m = 3$), причем один из них использовался как преобразователь (первая ступень каскада), а второй — обращенный синхронный двигатель (вторая ступень). Статорную обмотку первой ступени подключили к трехфазной сети напряжением 220 В. Статорную обмотку второй ступени соединили звездой, два луча которой запараллелили и подключили к минусовой клемме источника постоянного тока, а третий луч подключили к плюсовой клемме.

Поскольку оба эти двигателя были шестиполюсными, то синхронная скорость ротора каскада составляла 500 об/мин. Максимальная мощность, которую мог развить каскад в длительном режиме, равнялась $0,5 \cdot 1,4 \cdot 0,4 = 280$ Вт.

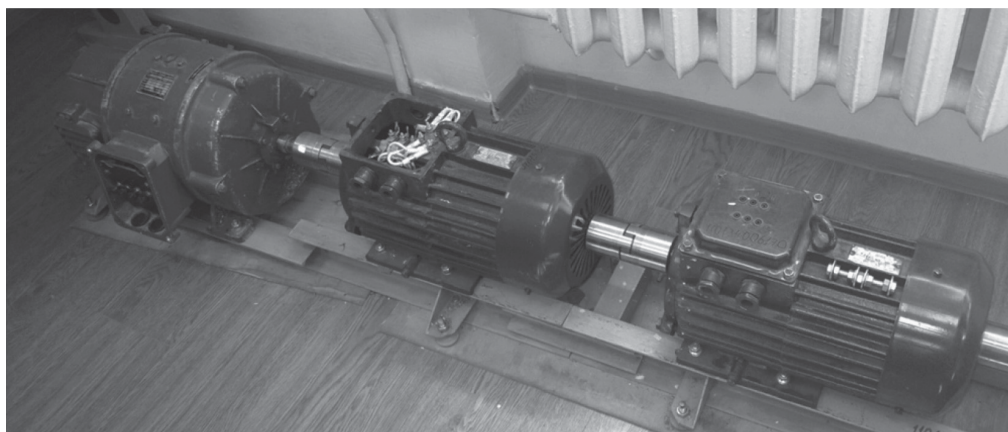


Рисунок 6. Фотография экспериментальной установки каскадного асинхронно-синхронного двигателя

При этой мощности каскад вырабатывал реактивную мощность по фазам: А — 48 ВАр; В — 45 ВАр; С — 47 ВАр. При этом ток возбуждения второй ступени был равен 5,8 А.

Каскад запускался без каких-либо дополнительных элементов сразу после включения и обеспечивал синхронную скорость вращения вала 500 об/мин.

Вывод

В результате проведенных испытаний подтверждена возможность создания каскад-

ного асинхронно-синхронного двигателя, обладающего всеми качествами синхронного, включая массу активных материалов и потери, но при этом не имеющего скользящих контактов. Кроме того, рассмотренный в статье каскадный двигатель обладает практически такими же технологическими достоинствами, как и асинхронный, так как его роторная обмотка может быть выполнена короткозамкнутой.

Список литературы

1. Загрядцкий В.И. Совмещенные электрические машины. Кишинев: Картэ молдовеняскэ, 1971. 163 с.
2. Shapiro S.V., Kulinich V.A. Cascade Synchronous-Asynchronous Generator // *Russian Electrical Engineering*. 2002. Vol. 73. No. 1. P. 33–38.
3. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М.: Энергия, 1964. 528 с.
4. Шапиро С.В., Исмагилов Ф.Р., Тергулов Т.Р., Полихач Е.А., Кузнецов А.Ю. Каскадный бесконтактный четырехступенчатый генератор // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2013. № 3, Т. 9, С. 47–51.
5. Петров Г.Н. Электрические машины. М.: Госэнергоиздат, 1956. Т. I. 240 с.
6. Шапиро С.В. Каскадная электромеханическая система с короткозамкнутым ротором // *Электротехнические комплексы и системы*, 2015. С. 93–100.
7. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.

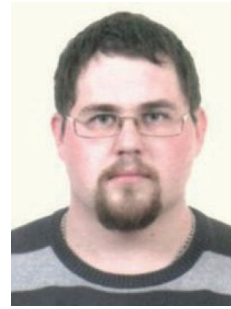
References

1. Zagradckiy V.I. *Combined Electric Machines*. Kishinev, Kartia Moldoveniaske Publ., 1971. Vol. I. 163 p. [in Russian].
2. Shapiro S.V., Kulinich V.A. Cascade Synchronous-Asynchronous Generator. *Russian Electrical Engineering*, 2002, Vol. 73, No. 1, pp. 33–38. [in Russian].
3. White D., Woodson G. *Electromechanical Energy Conversion*. Moscow, Energy Publ., 1964. 528 p. [in Russian].
4. Shapiro S.V., Ismagilov F.R., Teregulov T.R., Polikhach E.A., Kuznetsov A.Yu. Cascade Uncontacted Four-Step Generator. *Electrotechnical and Informational Complexes and Systems*, 2013, No. 3, Vol. 9, pp. 47–51. [in Russian].
5. Petrov G.N. *Electrical Machines*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956. Vol. I. 240 p. [in Russian].
6. Shapiro S.V. Cascade Electromechanical System with a Squirrel-Cage Rotor. *Electrotechnical Complexes and Systems*, 2015, pp. 93–100. [in Russian].
7. Kopylov I.P. *Electric Machines*. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1986. 360 p. [in Russian].



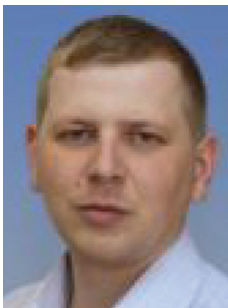
Возмилов А. Г.
Vozmilov A. G.

доктор технических наук, профессор
кафедры «Автомобильный транспорт»,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет»,
(национальный исследовательский
университет),
г. Челябинск, Российская Федерация



Мельников А. В.
Melnikov A. V.

заведующий лабораторией
кафедры «Электрооборудование и
электротехнологии»,
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский
государственный аграрный университет»,
г. Челябинск, Российская Федерация



Астафьев Д. В.
Astafev D. V.

кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Электрооборудование
и электротехнологии»,
ФГБОУ ВО «Южно-
Уральский государственный
аграрный университет»,
доцент кафедры
«Автомобильный
транспорт» ФГАОУ
ВО «Южно-Уральский
государственный
университет»,
(национальный
исследовательский
университет),
г. Челябинск,
Российская Федерация



Звездакова О. В.
Zvezdakova O. V.

кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Электрооборудование
и электротехнологии»,
ФГБОУ ВО «Южно-
Уральский государственный
аграрный университет»,
доцент кафедры
«Автомобильный
транспорт», ФГАОУ
ВО «Южно-Уральский
государственный
университет»,
(национальный
исследовательский
университет),
г. Челябинск,
Российская Федерация



Пархомчук Г. Е.
Parkhomchuk G. E.

студент энергетического
факультета,
ФГБОУ ВО «Южно-
Уральский государственный
аграрный университет»,
г. Челябинск,
Российская Федерация

УДК 621.3

РАЗРАБОТКА СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ОДНОЗОННОГО И ДВУХЗОННОГО ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

Рассмотрены технологические процессы аппаратов электронно-ионной технологии (ЭИТ) сельскохозяйственного назначения и факторы влияния источника высокого напряжения на них. Приведены электрические схемы замещения однозонных и двухзонных аппаратов элек-

тронно-ионной технологии. Показано влияние формы кривой выходного напряжения на вольт-амперные характеристики коронно-разрядной системы, степень очистки воздуха и озонотенерирование. Показан механизм влияния выходных параметров источника высокого напряжения, на основе схем замещения, на технологические характеристики аппаратов ЭИТ.

Приведённые схемы замещения максимально учитывают взаимосвязи коронно-разрядной системы и источника высокого напряжения (ИВН) в однозонных и двухзонных аппаратах ЭИТ, а также учитывают физические процессы коронного разряда. Было получено аналитическое выражение для расчёта электрической конструктивной ёмкости наиболее часто применяемой в электрофильтрах сельскохозяйственного назначения коронно-разрядной системы «ряд проводов–плоскость» с учётом добавочной электрической ёмкости соединительных элементов.

В статье показан и описан механизм влияния формы кривой выходного напряжения ИВН на физические процессы протекания коронного разряда и, как следствие, на технологические процессы аппарата ЭИТ в целом. Показана возможность управления параметрами коронно-разрядной системы и, как следствие, технологическими параметрами всего аппарата ЭИТ в целом без изменения конструкции коронно-разрядной системы и, таким образом, изменять либо оптимизировать режим работы аппаратов ЭИТ сельскохозяйственного назначения в конкретных технологических процессах.

Проведённые нами исследования показали несоответствие уравнения вольт-амперной характеристики в классическом виде для напряжения постоянного тока с применяемыми на практике выходными параметрами ИВН. На основании полученных результатов нами было получено уравнение вольт-амперной характеристики коронного разряда с учётом выходных параметров ИВН, применяемых на практике.

Таким образом, показано, что ИВН не является отдельным элементом аппарата ЭИТ, а является неотъемлемой частью системы «ИВН–коронно-разрядная система». Его параметры задают режим работы аппарата ЭИТ и позволяют его изменять и корректировать в зависимости от требований технологического процесса.

Ключевые слова: схемы замещения, источник высокого напряжения, аппараты электронно-ионной технологии, электрофильтр, высокое напряжение.

SUBSTITUTION SCHEMES DEVELOPMENT FOR SINGLE-STAGE AND TWO-STAGE ELECTRIC PRECIPITATORS

The article presents the technological processes of electron-ion technology (EIT) mechanisms for agricultural purposes and the high voltage source influence factors that affect them. Electric schemes for substitution of single-stage and two-stage mechanisms of electron-ion technology are given. The influence of the output voltage curve shape on the current-voltage characteristics of the corona-discharge system, the degree of air purification and ozone generation is shown. The technique of the high-voltage source output parameters influencing the technical characteristics of EIT mechanisms based on substitution schemes is revealed.

The given equivalent circuits maximally take into account the interrelationships of the corona-discharge system and the high voltage source (HVS) in single-zone and two-zone EIT devices, and also take into account the physical processes of the corona discharge. An analytical expression was obtained for the calculation of the electrical design capacity of the most commonly used in electrostatic precipitators for agricultural purposes, the corona-discharge system «a series of wires-plane», taking into account the additional electrical capacity of the connecting elements.

The article shows and describes the mechanism of influence of the shape of the output voltage curve of the HVS on the physical processes of a corona discharge and, as a result, on the technological processes of the EIT device as a whole. The possibility of controlling the parameters of the corona-discharge system and, as a result, the technological parameters of the entire EIT device as a whole without changing the design of the corona-discharge system and, thus, changing or optimizing the operation mode of EIT devices for agricultural purposes in specific technological processes is shown.

Our studies have shown the inconsistency of the equation of the current-voltage characteristics in the classical form for a DC voltage with the HVS output parameters used in practice. Based on the results obtained, we obtained the equation for the current-voltage characteristic of the corona discharge, taking into account the output parameters of the IVN used in practice.

Thus, it is shown that the HVS is not a separate element of the EIT apparatus, but is an integral part of the «HVS–corona-discharge system» system. Its parameters set the operation mode of the EIT device and allow it to be changed and adjusted depending on the requirements of the technological process.

Key words: substitution schemes, high-voltage source, mechanisms related to electronic-ion technology, electric precipitator, high voltage.

При проектировании аппаратов электронно-ионной технологии (ЭИТ) необходимо иметь возможность определения основных технологических и электротехнических параметров электрофильтров. Расчёт переходных процессов в системе «источник высокого напряжения (ИВН) — коронно-разрядная система» и выражения для вольт-амперных характеристик (ВАХ) с целью уточнения режима работы рабочей установки аппаратов ЭИТ и выдвигания соответствующих требований к ИВН возможно на основе эквивалентных схем замещения электрофильтров.

В работах [1–10] при рассмотрении различных вариантов коронно-разрядных систем были получены и приведены выражения, описывающие их вольт-амперные характеристики. Проводя анализ данных зависимостей, можно сделать вывод, что в общем виде уравнение вольт-амперной характеристики коронного разряда можно записать:

$$\begin{cases} I = GK(U - U_0)U \\ K = f(U) \end{cases}, \quad (1)$$

где G — коэффициент, зависящий от типа коронно-разрядной системы (геометрический коэффициент); K — подвижность ионов, (м/с)/(В/м).

Подвижность ионов, согласно [6], нельзя считать величиной постоянной. Она зависит в некотором диапазоне от результирующей напряжённости поля и, как следствие, от приложенного к коронно-разрядной системе напряжения.

Основной характеристикой работы электрофильтров является эффективность очистки и обеззараживания фильтруемой ими воздушной (газовой) среды.

Анализируя зависимости степени очистки аппаратов ЭИТ, можно сделать вывод, что она зависит от приложенного к коронно-разрядной системе напряжения:

$$\eta \sim 1 - \exp(-kU^2), \quad (2)$$

где k — коэффициент размерности, $1/V^2$.

Процессу коронного разряда, а, следовательно, и всем аппаратам ЭИТ, присущи функции озонотенерирования и ионотенерирования.

Наиболее интересен первый процесс, а именно процесс озонотенерирования аппаратами ЭИТ сельскохозяйственного назначения. С одной стороны, в сельском хозяйстве есть технологические процессы, в которых озон применяется в качестве «рабочего инструмента». При очистке вентиляционного воздуха электрофильтрами существует ограничение его максимальной концентрации (ПДК озона в РФ — 0,1 мкг/м³, в США — 0,2 мкг/м³) [1].

Анализируя результаты предыдущих исследований [11], можно сделать вывод, что при отрицательной и положительной короне концентрация озона на выходе аппарата ЭИТ будет прямо пропорциональна току коронно-разрядной системы:

$$C_{[O_3]_{\pm}} \sim I. \quad (3)$$

При описании процессов, происходящих в рабочей установке электрофильтров, существенную роль играет правильный выбор эквивалентной электрической схемы замещения. Этот выбор необходим при учёте требований к источнику высокого напряжения на этапе его расчёта и проектирования.

Электрофильтры подразделяются на два типа: однозонные, в которых зарядка и осаждение частиц происходят в одной зоне, и двухзонные, использующие как коронный разряд (зона зарядки), так и электростатический эффект (зона осаждения) [11–13].

В работах [4, 14–16] приведены эквивалентные электрические схемы замещения однозонных электрофильтров. На основании анализа данных схем и учёта их недостатков нами была составлена эквивалентная схема

замещения однозонного электрофильтра, которая приведена на рисунке 1.

Данная схема отличается от схем [4, 14–16] тем, что вместо диода и противоэдс, которые обуславливали одностороннюю проводимость коронного разряда (униполярность) и начальное напряжение зажигания короны, поставлен неуправляемый электронный ключ VD . Применение в схеме замещения противоэдс является нерациональным, т.к. она не исключается из схемы замещения при зажигании короны и получается, что напряжение на коронно-разрядной системе меньше напряжения питания на величину противоэдс, что является неверным. Так же дифференциальная ёмкость, обусловленная объёмным зарядом, созданным ионами и заряженными частицами, перемещена за ключ VD , т.к. объёмным зарядом можно пренебречь до момента зажигания коронного разряда при рассмотрении коронно-разрядной системы, т.е. для упрощения принять условие, что объёмные заряды создаются только коронным разрядом.

Данная схема замещения максимально учитывает все особенности однозонных аппаратов ЭИТ, такие как конструктивные ($R_{ут}$ и $C_{г}$) и особенности самого коронного разряда (VD , $C_{диф}$ и $R_{диф}$). Роль идеализированного неуправляемого электронного ключа (динистора) VD заключается в том, что он открывается при достижении определённого уровня напряжения — напряжения зажигания короны, и в дальнейшем имеет про-

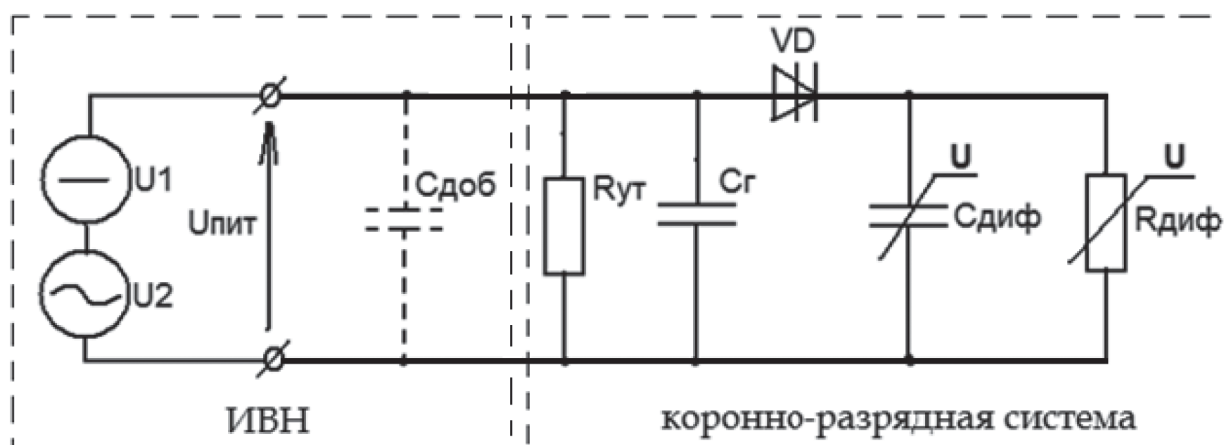
водимость, равную ∞ . Тем самым, условием для работоспособности схемы замещения является то, что до достижения напряжения зажигания $C_{диф} = 0$, а $R_{диф}$ велико, но меньше ∞ , т.е.:

$$\lim_{U \rightarrow U_{0-}} R_{диф} \rightarrow \infty. \quad (4)$$

На основании схемы, приведённой на рисунке 1, была составлена электрическая эквивалентная схема замещения двухзонного электрофильтра, которая приведена на рисунке 2.

Приведённая схема учитывает вариант раздельного питания зоны зарядки и зоны осаждения электрофильтра. Дифференциальная электрическая ёмкость CO обусловлена объёмным зарядом, который создаётся заряженными частицами, попавшими в зону осаждения из зоны зарядки. Нелинейное сопротивление RO обусловлено осаждением заряженных частиц на осадительные электроды, и его нелинейность обусловлена в общем случае неоднородностью концентрации поступающих заряженных частиц при работе электрофильтра, т.к. запылённость среды в реальных условиях не является величиной постоянной и зависит от многих факторов.

Сопротивление токам утечки и геометрическая (конструктивная) электрическая ёмкость коронно-разрядной системы зависят от конструкции электрофильтра и применяемых изоляционных материалов. Если значение сопротивления токов утечки с достаточ-

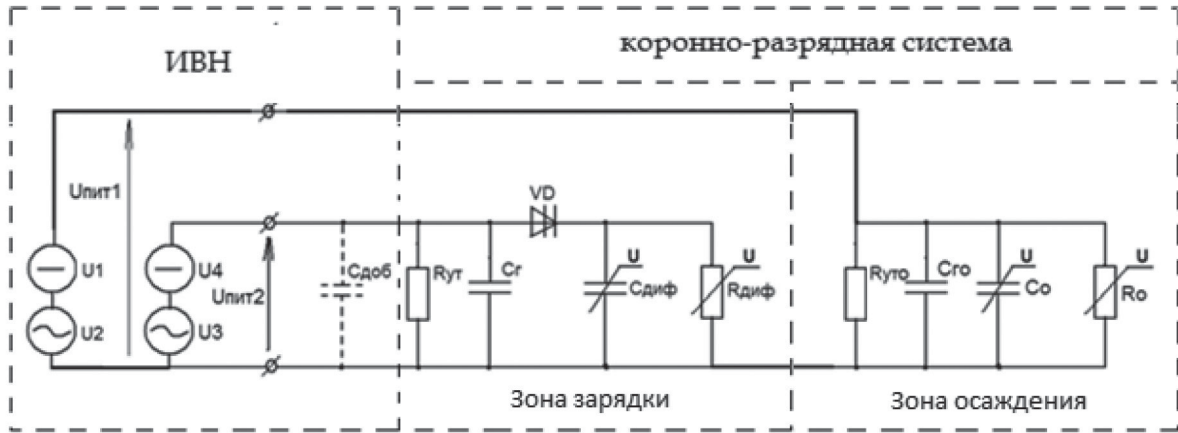


U_1 и U_2 — постоянная и переменная составляющие питающего напряжения $U_{пит}$ соответственно; $C_{доб}$ — добавочная электрическая ёмкость $ИБН$; $C_{г}$ и $C_{диф}$ — геометрическая (конструкционная) и дифференциальная электрические ёмкости электрофильтра соответственно; $R_{ут}$ и $R_{диф}$ — сопротивление токов утечки и дифференциальное сопротивление коронно-разрядной системы соответственно

Рисунок 1. Электрическая принципиальная схема замещения однозонного электрофильтра

ной точностью можно определить только при электрических испытаниях конкретной конструкции электрофильтра, то значение геометрической ёмкости с достаточной точностью можно определить аналитически,

рассматривая конкретную конструкцию коронно-разрядной системы. Значение геометрической ёмкости можно рассчитать по выражениям, приведённым в работе [17].



$R_{ут0}$ и R_0 — сопротивление токов утечки в зоне осаждения и нелинейное сопротивление соответственно; $C_{г0}$ и C_0 — геометрическая и дифференциальная ёмкости зоны осаждения соответственно

Рисунок 2. Электрическая принципиальная схема замещения двухзонного электрофильтра

Нами было получено аналитическое выражение для расчёта электрической конструктивной ёмкости, наиболее часто применяемой в электрофильтрах сельскохозяйственного назначения коронно-разрядной системе «ряд проводов — плоскость» с учётом добавочной электрической ёмкости:

$$C = \frac{n2\pi\epsilon\epsilon_0 lN}{\ln\left(\frac{\prod_{k=1}^n \sqrt{4h^2 + a^2(k-1)^2}}{r \cdot a^{(k-1)} \cdot (k-1)!}\right)} + C_{доб}, \quad (5)$$

где n — количество коронирующих электродов; l — длина коронирующего электрода, м; h — расстояние коронирующий электрод — плоскость, м; a — расстояние между коронирующими электродами, м; r — радиус коронирующего электрода, м; N — количество плоскостей; $C_{доб}$ — значение добавочной электрической ёмкости, согласно электрическим эквивалентным схемам замещения электрофильтров. Количество плоскостей $N=1$ для системы «ряд проводов — плоскость» и $N=2$ для системы «ряд проводов между двумя плоскостями».

Одним из существенных явлений коронного разряда является прерывистый эффект коронного разряда. Он заключается в самозапираании короны и выражается в импульсности разрядного тока. Данный эффект, согласно [5, 6, 18], напрямую зависит от приложенного к коронно-разрядной системе

напряжения и, как следствие, от формы кривой данного напряжения. Чем больше приложенное к разрядному промежутку напряжение, тем скорее совершается процесс запираания короны и тем больше, следовательно, частота импульсов тока. Наличие на некотором расстоянии от катода — коронирующего электрода объёмного заряда отрицательных ионов, согласно уравнению Пуассона и законам движения заряженных частиц в газе, ограничивает плотность разрядного тока [6]. Частота следования импульсов обуславливается временем рассеяния объёмного заряда, образованного возле коронирующего электрода отрицательных ионов. При этом для возникновения нового импульса не обязательно, чтобы отрицательные ионы достигли анода — осадительного электрода, достаточно, чтобы они отодвинулись на некоторое, сравнительно небольшое расстояние от области образования короны [5, 6].

Таким образом, точка коронирования является источником (генератором) импульсов тока высокой частоты, а сумма этих токов и будет являться результирующим током коронно-разрядной системы. Эффект запираания коронного разряда зависит от приложенного к коронно-разрядной системе напряжения и учащается с ростом последнего [5, 6].

Следовательно, можно сделать вывод, что ток коронно-разрядной системы зависит от объёмной плотности заряда в точке коронирования, которая является функцией напряжённости электрического поля, и, следовательно, от действующего напряжения, приложенного к ней.

Большинство аппаратов ЭИТ питается выпрямленным напряжением, т.е. униполярным пульсирующим напряжением, т.е. напряжением, форма кривой которого имеет подъёмы и спады (передний и задний фронт пульсации). Таким образом, можно сделать вывод на основании исследований [5, 6, 18], что во время спада питающего напряжения (задний фронт пульсации) возможно учащение эффекта запираания коронного разряда из-за спада эмиссии электронов с коронирующего электрода и большой плотности заряда вокруг него от предварительно произведённой ионизации. Другими словами, каждый последующий импульс разряда в точке коронирования будет запирается предыдущим, т.к. подвижность заряженных пылевых частиц меньше подвижности электронов [5, 19], то они не успевают отодвинуться от точки коронирования на некоторое расстояние для формирования нового импульса короны, и этот импульс происходит позже, т.е. растёт скважность импульсов тока в точках коронирования и снижается значение результирующего тока.

Отсюда можно сделать вывод о том, что чем больше время спада напряжения (чем больше длительность заднего фронта пульсации), тем меньше результирующий ток при одном и том же действующем напряжении.

Все аппараты ЭИТ являются активно-ёмкостной системой, а это значит, что задний фронт пульсации будет всегда длиннее, чем передний, т.е. время спада напряжения будет всегда больше времени его нарастания до амплитудного значения ($t_{U\downarrow} > t_{U\uparrow}$). Именно изменение времени спада пульсации позволяет, согласно ранее сказанному, изменять время запираания коронного разряда.

Оценка формы кривой напряжения производится по двум известным коэффициентам:

1. Коэффициент пульсации напряжения — величина, равная отношению наи-

большого значения переменной составляющей пульсирующего напряжения к его постоянной составляющей:

$$K_{\Pi} = \frac{U_{m\sim}}{U_{=}}; \quad (6)$$

2. Коэффициент амплитуды кривой переменного напряжения — величина, равная отношению максимального по модулю за период значения напряжения к действующему значению периодического напряжения:

$$K_A = \frac{U_m}{U_D}. \quad (7)$$

Данные коэффициенты, приняв условие, что $U_{=} \approx U_D$ можно связать следующим соотношением:

$$K_A \approx K_{\Pi} + 1. \quad (8)$$

Следовательно,

$$U_D \approx \frac{U_m}{K_{\Pi} + 1}. \quad (9)$$

В свою очередь, коэффициент пульсации имеет зависимость от частоты следования пульсаций:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{2mf\tau}, \quad (10)$$

где m — показатель пульсности схемы выпрямления; f — частота следования пульсаций, Гц.

$$\begin{cases} U_D \approx \frac{U_m}{\frac{1}{2mfCR} + 1} \\ R = \frac{R_{\text{Диф}} \cdot R_{\text{УТ}}}{R_{\text{Диф}} + R_{\text{УТ}}} \\ C = C_{\text{Доб}} + C_{\text{Го}} + C_{\text{Диф}} \end{cases}. \quad (11)$$

Из зависимости (11) видно, что при $U_m = \text{const}$ значение действующего напряжения (U_D) будет различным; так, при увеличении суммарной электрической ёмкости системы, частоты или совместно электрической ёмкости и частоты значение действующего напряжения возрастает. Также можно сказать, что одно и то же значение действующего напряжения при неизменном значении амплитуды пульсации может быть получено при различных значениях суммарной электрической ёмкости системы и частоте следования пульсаций. Суммарное электрическое сопротивление системы (R) записано согласно эквивалентной электрической схеме

замещения аппарата ЭИТ, приведённой на рисунке 1.

Можно сделать вывод, что за счёт изменения добавочной ёмкости и частоты следования пульсаций изменятся значения действующего напряжения и тока, с помощью которых, согласно зависимостям (1)–(3) и (11) с учётом схем 1, 2 и эффекта запирания коронного разряда, можно управлять параметрами коронно-разрядной системы и, как следствие, технологическими параметрами всего аппарата ЭИТ в целом. Тем самым оптимизировать режим работы аппаратов ЭИТ сельскохозяйственного назначения в конкретных технологических процессах.

Результаты и обсуждение

В работе [20] нами было показано влияние частоты выходного напряжения ИВН и добавочной ёмкости конденсаторной батареи на вольт-амперные характеристики коронно-разрядной системы электрофилтра-озонатора.

На рисунке 4 показаны осциллограммы выходного напряжения ИВН с максимальным коэффициентом пульсаций при частоте следования пульсаций 50 Гц без подключения дополнительных емкостей и с минимальным при частоте следования пульсаций 200 Гц с максимальной ёмкостью 3760 пФ в выходном каскаде ИВН.

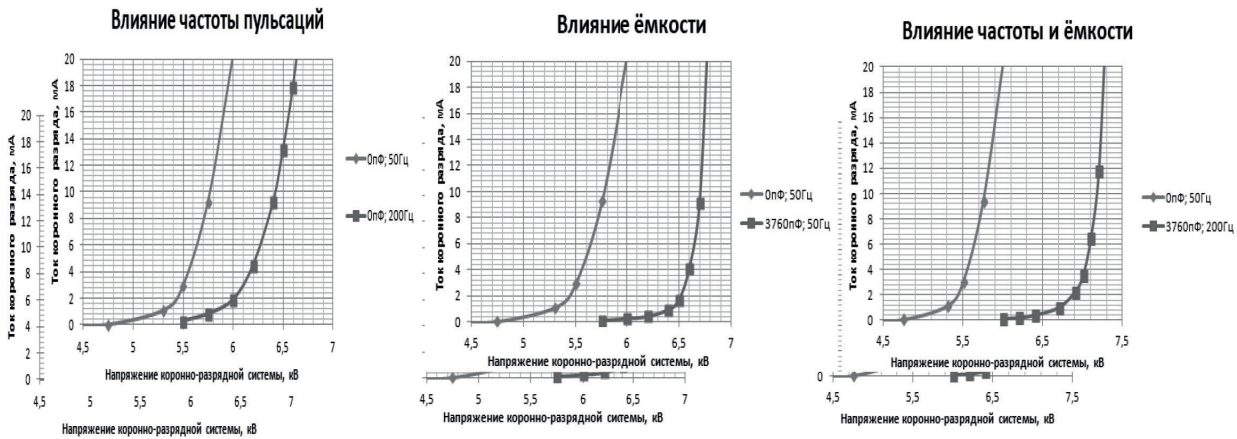
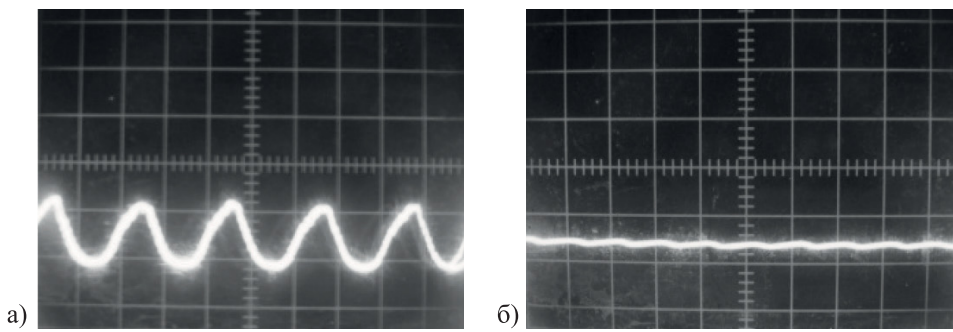


Рисунок 3. ВАХ электрофилтра-озонатора при различных величинах частоты и пульсаций выходного напряжения ИВН



а) 0 пФ 50Гц; б) 3760 пФ 200Гц. Масштаб Y=5 В/см; X=5 мс/см; КДЕЛ=758

Рисунок 4. Осциллограммы выходного напряжения ИВН

Анализ полученных результатов, представленных на рисунке 3, показывает, что при увеличении частоты или уменьшении коэффициента пульсаций происходит сдвиг ВАХ в область больших напряжений. При введении дополнительной электрической ёмкости в выходной каскад уменьшается градиент изменения выходного напряжения, т.е. форма выходного напряжения становится

более близкой к постоянному напряжению. Данные зависимости отражают влияние формы выходного напряжения ИВН на ВАХ аппарата ЭИТ. Это позволяет получить тот же ток коронно-разрядной системы при больших значениях действующего напряжения, приложенного к коронно-разрядной системе и, как следствие, увеличить мощность коронного разряда. Таким образом, выражение (1)

является справедливым лишь для «источника постоянного тока».

Таким образом, выражение (1), описывающее ВАХ, можно записать в виде:

$$\begin{cases} I = GK K_U (U - U_0) U \\ K = f(U) \\ K_U = f(U(t)) \end{cases}, \quad (12)$$

где K_U — коэффициент, зависящий от формы питающего аппарат ЭИТ напряжения; U — действующее значение питающего аппарат ЭИТ напряжения ИВН, В.

Выводы

1. Изменение формы кривой выходного напряжения ИВН оказывает существенное влияние на режим работы аппарата ЭИТ.

2. При уменьшении коэффициента пульсаций, т.е. при приближении формы кривой напряжения ИВН к напряжению постоянного

тока, происходит сдвиг ВАХ в область больших напряжений, и наоборот.

3. При уменьшении коэффициента пульсаций, т.е. при приближении формы кривой напряжения ИВН к напряжению постоянного тока, степень очистки электрофильтра возрастает, и наоборот.

4. Уменьшение коэффициента пульсаций выходного напряжения, т.е. приближение формы кривой напряжения ИВН к напряжению постоянного тока, позволяет снизить концентрацию озона на выходе аппарата ЭИТ, и наоборот.

5. Классическое уравнение ВАХ коронного разряда справедливо лишь при питании коронно-разрядной системы напряжением постоянного тока. Необходимо учитывать влияние формы кривой питающего напряжения аппарата ЭИТ.

Список литературы

1. Возмилов А.Г., Астафьев Д.В., Матвеев С.Д. Применение озона в технологических процессах птицеводства и критерии сравнительной оценки озонаторов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 3. С. 13–16.
2. Астафьев Д.В. Исследование и разработка электрофильтра-озонатора для очистки и озонирования воздушной среды в цехе инкубации (на примере помещения хранения инкубационных яиц): дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЧГАА, 2010. 135 с.
3. Райзвих В.Г. Исследование концентрации озона в воздушной среде вблизи аппаратов электронно-ионной технологии сельскохозяйственного назначения // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. 2001. № 1. С. 89–97.
4. Экотехника: Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, газа и туманов / Под ред. Л.В. Чекалова. Ярославль: Изд-во «Русь», 2004. 424 с.
5. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. Л.: ОГИЗ Ростехиздат, 1947. 808 с.
6. Капцов Н.А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. М.: ОГИЗ, 1947. 227 с.
7. Попков В.И., Рябая С.И. Распределение тока униполярной короны на некоронирующем и коронирующем электродах // Электричество. 1974. № 11. С. 45–51.
8. Соколов А.Г. Исследование уравнений коронного разряда для коаксиальных цилиндров // Электричество. 1972. № 4. С. 20–23.
9. Васяев В.И., Верещагин И.П. К расчёту характеристик униполярного коронного разряда в системе «ряд проводов между плоскостями» // Электричество. 1972. № 5. С. 34–39.
10. Файн В.Б. Расчёт вольт-амперной характеристики униполярного коронного разряда в системе электродов «провод — две плоскости» // Электричество. 1977. № 1. С. 7–11.
11. Райзвих В.Г. Разработка и обоснование основных положений по проектированию аппаратов ЭИТ сельскохозяйственного назначения с учётом образования озона: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2002. 129 с.
12. Тайманов С.Т. Исследование и разработка системы электроочистки воздуха и дезинфекции яиц в инкубаторе: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1995. 178 с.
13. Возмилов А.Г. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в промыш-

ленном животноводстве и птицеводстве: дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск, 1993. 400 с.

14. Чекалов Л.В. Электрические режимы и источники питания электрофильтров // Промышленная и санитарная очистка газов. Обзорная информация. М.: ЦИНТИ-ХИМНЕФТЕМАШ, 1982. 28 с.

15. Чекалов Л.В., Громова С.А. Новые способы и источники питания электрофильтров // Промышленная и санитарная очистка газов. Обзорная информация. М.: ЦИНТИ-ХИМНЕФТЕМАШ, 1986. 30 с.

16. Санаев Ю.И. Методы повышения эффективности работы электрофильтров // Промышленная и санитарная очистка газов. Обзорная информация. М.: ЦИНТИ-ХИМНЕФТЕМАШ, 1986. 23 с.

17. Иоссель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г. Расчёт электрической ёмкости. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 288 с.

18. Куду К.Ф. О начальных стадиях разряда с острия в воздухе. Тарту: Типография имени Ханса Хейдеманна, 1960. 56 с.

19. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер. с англ. М.: Химия, 1981. 616 с.

20. Возмилов А.Г., Мельников А.В., Еськова С.М. Влияние выходных параметров источника высокого напряжения на технологические характеристики аппаратов электронно-ионной технологии сельскохозяйственного назначения // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 5. С. 76–78.

References

1. Vozmilov A.G., Astaf'ev D.V., Matveev S.D. The Use of Ozone in Poultry Production Processes and Criteria for Comparative Evaluation of Ozonizers. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 2007, No. 3, pp. 13–16. [in Russian].

2. Astaf'ev D.V. *Research and Development of an Electrostatic Precipitator-Ozonizer for Cleaning and Ozonating Air in the Incubation Workshop (on example of Storage Room for Hatching Eggs): Cand. Engin. Sci. Diss.* Chelyabinsk, CHGAA Publ., 2010. 135 p. [in Russian].

3. Rajzvih V.G. Study of the Concentration of Ozone in the Air near the Apparatus of Electronic-Ionic Technology for Agricultural Purposes. *Bulletin of the Altai State Technical Uni-*

versity. I.I. Polzunova, 2001, No. 1, pp. 89–97. [in Russian].

4. *Ecotechniques: Protection of Atmospheric Air from Emissions of Dust, Gas and Fog. Edited by L.V. Chekalova.* Yaroslavl', Rus' Publ., 2004. 424 p. [in Russian].

5. Kaptsov N.A. *Electrical Phenomena in Gases and Vacuum.* Leningrad, OGIZ Rostekhizdat, 1947. 808 p. [in Russian].

6. Kaptsov N.A. *Corona Discharge and its Application in Electrostatic Precipitators.* Moscow, OGIZ, 1947. 227 p. [in Russian].

7. Popkov V.I., Ryabaya S.I. The Current Distribution of the Unipolar Corona on Non-Corona and Corona Electrodes. *Electricity*, 1974, No. 11, pp. 45–51. [in Russian].

8. Sokolov A.G. Investigation of the Corona Discharge Equations for Coaxial Cylinders. *Electricity*, 1972, No. 4, pp. 20–23. [in Russian].

9. Vasyaev V.I., Vereshchagin I.P. To the Calculation of the Characteristics of a Unipolar Corona Discharge in the System «a Series of Wires between Planes». *Electricity*, 1972, No. 5, pp. 34–39. [in Russian].

10. Fajn V.B. The Calculation of the Current-Voltage Characteristics of the Unipolar Corona Discharge in the System of Electrodes «Wire — Two Planes». *Electricity*, 1977, No. 1, pp. 7–11. [in Russian].

11. Rajzvih V.G. *Development and Substantiation of the Main Provisions for the Design of EIT Devices for Agricultural Purposes with Account of Ozone Formation: Cand. Engin. Sci. Diss.* Chelyabinsk, 2002. 129 p. [in Russian].

12. Tajmanov S.T. *Research and Development of the System of Electrical Air Cleaning and Disinfection of Eggs in an Incubator: Cand. Engin. Sci. Diss.* Chelyabinsk, 1995. 178 p. [in Russian].

13. Vozmilov A.G. *Electrical Cleaning and Electrical Disinfection of Air in Industrial Livestock and Poultry Farming: Dr. Engin. Sci. Diss.* Chelyabinsk, 1993. 400 p. [in Russian].

14. Chekalov L.V. Electric Modes and Power Sources of Electrostatic Precipitators. *Industrial and Sanitary Gas Cleaning. Overview Information.* Moscow, TSINTIHIMNEFTEMAASH Publ., 1982. 28 p. [in Russian].

15. Chekalov L.V., Gromova S.A. New Ways and Power Sources of Electrostatic Precipitators. *Industrial and Sanitary Gas*

Cleaning. Overview Information. Moscow, TSINTIHIMNEFTEMASH Publ., 1986. 30 p. [in Russian].

16. Sanaev U.I. Methods to Improve the Efficiency of Electrostatic Precipitators. *Industrial and Sanitary Gas Cleaning. Overview Information.* Moscow, TSINTIHIMNEFTEMASH Publ., 1986. 23 p. [in Russian].

17. Iossel' U.J., Kachanov E.S., Strunsky M.G. *Calculation of Electrical Capacity.* 2nd ed. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 288 p. [in Russian].

18. Kudu K.F. *About the Initial Stages of Discharge from the Tip in the Air.* Tartu,

Tipografiya imeni Hansa Hejdemanna, 1960. 56 p. [in Russian].

19. Straus V. *Industrial Gas Cleaning: Transl. from Engl.* Moscow, Himiya Publ., 1981. 616 p. [in Russian].

20. Vozmilov A.G., Melnikov A.V., Eskova S.M. Influence of the Output Parameters of the High Voltage Source on the Technological Characteristics of the Apparatus of the Electron-Ion Technology for Agricultural Purposes. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*, 2011, No. 5, pp. 76–78. [in Russian].



Линенко А. В.
Linenko A. V.

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и электрооборудование», ФГБОУ ВО «Бакирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Российская Федерация



Камалов Т. И.
Kamalov T. I.

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве», ФГБОУ ВО «Бакирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Российская Федерация



Халилов Б. Р.
Khalilov B. R.

ассистент кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве», ФГБОУ ВО «Бакирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 62-133.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРОЦЕНТРОБЕЖНОГО СЕПАРАТОРА С ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Экономическая эффективность производства зерновой продукции в значительной степени зависит от применения энергоэффективного, ресурсосберегающего технологического оборудования, способного обеспечить высокое качество технологического процесса. В связи с этим в работе предложена оригинальная конструкция виброцентробежного зернового сепаратора, в качестве вибрационного привода которого применяется плоский линейный асинхронный электродвигатель. Линейный асинхронный электродвигатель позволяет, минуя различного рода преобразователи вида движения, получать непосредственно поступательное движение рабочего органа, а совместно с упругими элементами реализовать энергетически эффективный электропривод вибрационного движения с регулируемыми параметрами колебаний. Разработана математическая модель виброцентробежного зернового сепаратора с линейным электроприводом, позволяющая исследовать его работу и определять зависимости изменения параметров колебаний рабочего органа от кинематических параметров привода, что, в свою очередь, отражается на производительности и эффективности виброцентробежного сепаратора. Реализованная в среде объектно-визуального моделирования MatLab (Simulink) математическая модель виброцентробежного сепаратора позволяет исследовать ее как в режиме вынужденных, так и в режиме автоколебаний. Установлено, что при работе виброцентробежного сепаратора в режиме вынужденных колебаний изменение подачи зернового материала на 10 % не оказывает существенного влияния на амплитудно-частотные характеристики. Предложенное техническое решение позволяет снизить установленную мощность вибрационного привода, увеличить сроки межсервисных интервалов и за счет возможности регулирования параметров колебаний рабочего органа повысить эффективность сепарирования зерновой смеси.

Ключевые слова: сепаратор, очистка, линейный двигатель, электропривод, вибрация, индуктор, вторичный элемент.

A MATHEMATICAL MODEL OF A VIBROCENTRIFUGAL GRAIN SEPARATOR WITH A LINEAR ELECTRIC DRIVE

The economic efficiency of grain production highly depends on using of energy-efficient, resource-saving technological equipment capable of ensuring high quality of the technological process. In response to this, the original structure of a vibrocentrifugal grain separator is proposed in the work, it is applied a flat linear asynchronous electric motor as a vibrating drive. Passing a different kind of transducers of the type of motion, linear asynchronous electric motor allows to obtain directly progressive movement of the working member, and together with elastic elements realize an energetically effective electric drive of vibration motion with adjustable parameters of oscillations. A mathematical model of a vibrocentrifugal grain separator with a linear electric drive is developed. It makes it possible to investigate its operation and determine the dependence of the variation of the oscillation parameters of the working member on the kinematic parameters of the drive, which in turn affects the productivity and efficiency of the vibratory centrifugal separator. Implemented in the environment of object-visual modeling MatLab (Simulink), the mathematical model of the DCS makes it possible to investigate it both in the forced and self-oscillating modes. It is had been found that when the vibratory centrifugal separator is operated in the forced oscillation mode, the change in the feed of the grain material by 10 % does not significantly affect the amplitude-frequency characteristics. The proposed technical solution makes it possible to reduce the installed power of the vibrating drive, to increase the service intervals and, to increase the efficiency of separation of the grain mixture by the possibility of adjusting the parameters of the oscillations of the working member.

Key words: separator, cleaning, linear motor, electric drive, vibration, inductor, secondary member.

Виброцентробежные сепараторы предназначены для разделения, преимущественно зерновых материалов, на фракции по размерам и аэродинамическим свойствам и широко используются на селекционных станциях, в фермерских хозяйствах, а также в мукомольной, комбикормовой, химической и других отраслях промышленности. Однако эксплуатация современных виброцентробежных сепараторов (ВЦС) сопряжена с трудностями, к которым относятся низкая надежность вибрационного привода, вызванная наличием сложного механического преобразователя вращательного движения в возвратно-поступательное, отсутствие возможности регулирования параметров колебаний рабочего органа. Вследствие этого решета ВЦС не имеют возможности обеспечить достаточную пропускную способность и не оказывают технологически оптимального воздействия на обрабатываемый зерновой материал, что приводит к снижению качества процессов сепарирования и потерям зерна [1, 2].

Одним из путей устранения указанных недостатков, упрощения конструкции ВЦС в целом является разработка вибрационного привода на базе плоского линейного асинхронного электродвигателя (ПЛАД) [1].

По результатам проведенного анализа существующих вибрационных приводов ВЦС была разработана кинематическая схема экспериментальной установки получения вращательного от двигателя вращения и вибрационного от ПЛАД движений рабочего органа ВЦС (рисунок 1). Установка включает в себя разбрасыватель 11, рабочий орган, представляющий собой решето 5, которое соединено с вторичным элементом 2 ПЛАД и выполнено из материала с высокой электропроводностью. Вторичный элемент 2 связан с горизонтально расположенным ведомым шкивом 9, который при помощи клиновых ремней 6 получает вращение от ведущего шкива 10, закрепленного на валу электродвигателя 7. При вращении ведомого шкива 9 рабочий орган приводится во вращение вокруг своей вертикальной оси через шлицевое соединение 8.

Электропривод вибрационного движения рабочего органа в вертикальной плоскости представляет собой ПЛАД, состоящий из нескольких индукторов 1, которые электрически соединены последовательно. Индукторы расположены симметрично и жестко закреплены на основании. Рабочий орган подпружинен относительно основания с

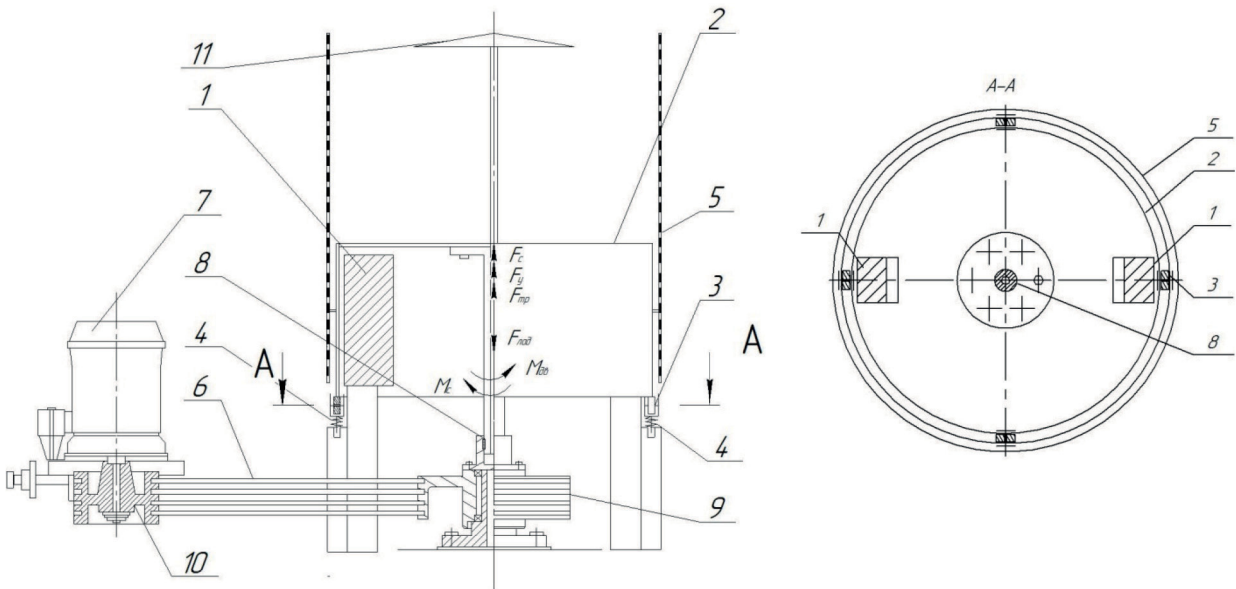


Рисунок 1. Кинематическая схема экспериментальной установки ВЦС с ПЛАД

помощью роликов 3 и упругих элементов 4 (рисунок 1). ПЛАД работает в режиме вынужденных колебаний и включается в работу согласно частоте задаваемой схемой управления [3].

При подаче блоком импульсного управления (на рисунке 1 не показан) напряжения питания на обмотки индуктора ПЛАД возникает сила тяги $F_{ЛЛД}$, под действием которой рабочий орган начинает двигаться вниз, сжимая упругие элементы 4. Силе $F_{ЛЛД}$ противодействуют сила трения $F_{тр}$ в шлицевом соединении, сила сопротивления упругого элемента $F_у$, сила сопротивления решета движению потока в рабочем зазоре $F_с$. По истечении времени подачи питания обмотки индуктора ПЛАД отключаются от питающей сети, рабочий орган останавливается и начинает под действием потенциальной энергии, накопленной в упругих элементах движение вверх, возвращаясь в исходное положение. Теперь сила упругости $F_у$ действует сонаправленно с движением рабочего органа, ей противодействуют сила трения $F_{тр}$ и сила сопротивления зерна $F_с$. По истечении времени паузы блок управления вновь подключает обмотки индуктора ПЛАД к питающей сети, колебательное движение повторяется. Все это время асинхронный электродвигатель вращает рабочий орган.

С учетом сложности и нелинейности вибрационного привода ВЦС, а также

цикличности работы ПЛАД в режиме частых переходных процессов, детальный анализ работы привода с учетом влияния отдельных его элементов на параметры колебаний можно произвести, разработав его математическую модель.

Математическая модель реализуется в соответствии с уравнениями динамики ВЦС, которые имеют следующий вид:

— для поступательного движения рабочего органа:

$$ma = F_{ЛЛД} - F_{тр} - F_с - F_у, \quad (1)$$

— для вращательного движения рабочего органа:

$$J \frac{\partial \omega}{\partial t} = M_{дв} - M_с - M_{тр}, \quad (2)$$

где m — масса рабочего органа и вторичного элемента ПЛАД, кг;

a — ускорение рабочего органа и вторичного элемента ПЛАД, м/с²;

$F_{ЛЛД}$ — сила, развиваемая ПЛАД, Н;

$F_{тр}$ — сила трения в шлицевом соединении, Н;

$F_у$ — сила упругости, Н;

$F_с$ — сила сопротивления решета движению потока, Н;

$J \frac{\partial \omega}{\partial t}$ — динамический момент, кг·м²/с²;

$M_{дв}$ — момент развиваемый АД, Н·м;

$M_с$ — момент сопротивления от потока зерна в рабочем зазоре, Н·м;

$M_{тр}$ — момент трения в подшипниках, Н·м.

Математическая модель разработанного вибрационного привода ВЦС реализована в MatLab (Simulink) — среда объектно-визуального моделирования. Линейный асинхронный электродвигатель реализован по дифференциальным уравнениям Парка-Горева, упругие элементы — по закону Гука. С учетом известных преобразований [4] составленная по уравнениям (1) и (2) математическая модель примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} ma = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot \omega_0}{\tau} \cdot \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} \cdot (\varphi_{x2} \varphi_{y1} - \varphi_{x1} \varphi_{y2}) - \\ - k \cdot x - f \cdot m \cdot g - \frac{\pi \cdot \mu \cdot V \cdot R \cdot R_c \cdot H}{R_c^2 - R^2} \\ J \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot \omega_0'}{\tau'} \cdot \frac{X_m'}{X_s' X_r' - X_m'^2} \cdot (\varphi'_{x2} \varphi'_{y1} - \varphi'_{x1} \varphi'_{y2}) - \\ - N \cdot \frac{f_p}{R_p} - \left(f_0 \cdot \rho \cdot h \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \left(1 - \frac{n_0 \cdot S_0}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot H} \right) \right), \end{array} \right. (3)$$

где ω_0 — угловая частота питающей сети, с⁻¹;
 τ, τ' — полюсное деление обмотки ПЛАД и обмотки АД соответственно, м;

X_m — сопротивление взаимной индукции между статором и ротором, Ом;

X_s, X_r — значения сопротивлений индуктора и вторичного элемента, Ом;

$\varphi_{x1}, \varphi_{y1}, \varphi_{x2}, \varphi_{y2}$ — потокосцепления по осям ОХ, ОУ соответственно статора и ротора, Вб;

k — жесткость упругих элементов, Н/м;

μ — коэффициент динамической вязкости слоя зерновой смеси;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

R — радиус решета, м;

R_c — средний радиус, м;

H — высота решета, м;

N — прижимающая сила, Н;

f_p — коэффициент трения качения;

R_p — радиус ролика, м;

f_o — динамический коэффициент трения зерновой смеси о решето;

ρ — плотность слоя зерновой смеси, кг/м³;

h — толщина слоя зерновой смеси, м;

ω — угловая скорость, рад/с;

n_0 — количество отверстий решета, шт.;

S_0 — площадь одного отверстия, м².

Для исследования математической модели определены параметры схемы замещения ПЛАД: $R_1 = 4,09$ Ом, $X_1 = 0,141$ Ом, $X_2 = 0,85$ Ом, $X_m = 4,7$ Ом, $R_2 = 5,05$ Ом и полюсное деление $\tau = 0,036$ м.

При исследовании приняты за базовые величины: плотность продовольственного зерна пшеницы с влажностью до 16 % равна 770 кг/м³; производительность установки $Q = 1$ т/ч; номинальная угловая скорость рабочего органа составляет $\omega = 11,3$ рад/с; жесткость упругих элементов $k = 600$ Н/м; масса рабочего органа $m_1 = 10$ кг; масса зерновой смеси $m_2 = 1$ кг; продолжительность включения ПЛАД составляет 60 %; мощность ПЛАД $P = 1$ кВт.

На качество разделения зерновой смеси и на производительность ВЦС в целом большее влияние оказывают амплитуда и частота колебаний рабочего органа [5].

Эффективным способом регулирования параметров колебаний является изменение частоты и продолжительности подключения индукторов ПЛАД к источнику питания. Частота включения ПЛАД регулируется в необходимых пределах в зависимости от вида, сорта и влажности обрабатываемой зерновой смеси [4].

Как видно из рисунка 2, в промежутке продолжительности включения ПЛАД от 10 % до 55 % амплитуда колебаний рабочего органа возрастает, достигает своего максимального значения и начинает убывать.

На рисунке 3 представлены графики амплитудно-частотных характеристик ВЦС при изменении подачи зерновой смеси.

Как видно из рисунка 3, увеличение или уменьшение подачи зерновой смеси на 10 % не оказывает значительного влияния на амплитуду колебаний рабочего органа. Следовательно, в режиме вынужденных колебаний влияние изменения подачи зерновой смеси на производительность ВЦС незначительно.

На рисунке 4 представлена экспериментальная зависимость производительности ВЦС от частоты колебаний рабочего органа. ВЦС имеет максимальную производительность при высокой интенсивности разрыхления зерновой смеси, которая достигается увеличением частоты колебаний рабочего органа путем увеличения частоты подключения индукторов ПЛАД к источнику питания [4]. При этом эффективность разрыхления и пористость зерновой смеси увеличиваются,

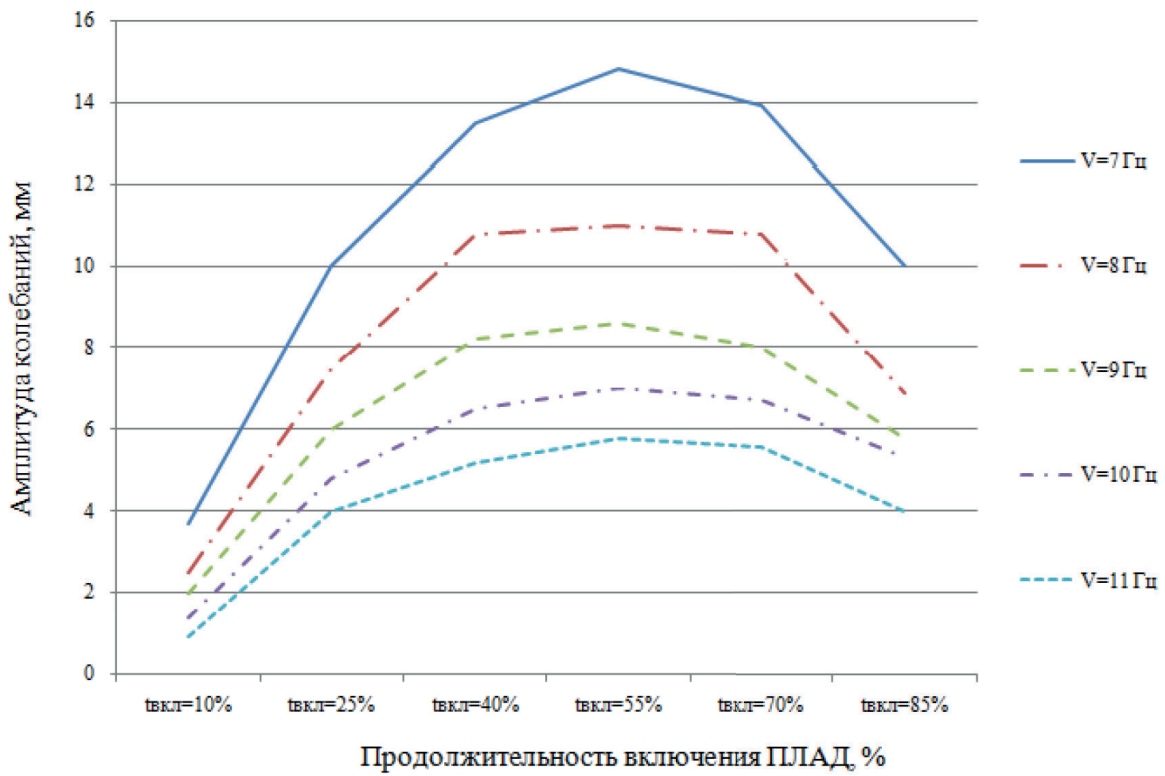


Рисунок 2. Амплитудно-частотные характеристики ВЦС в зависимости от продолжительности включения ПЛАД

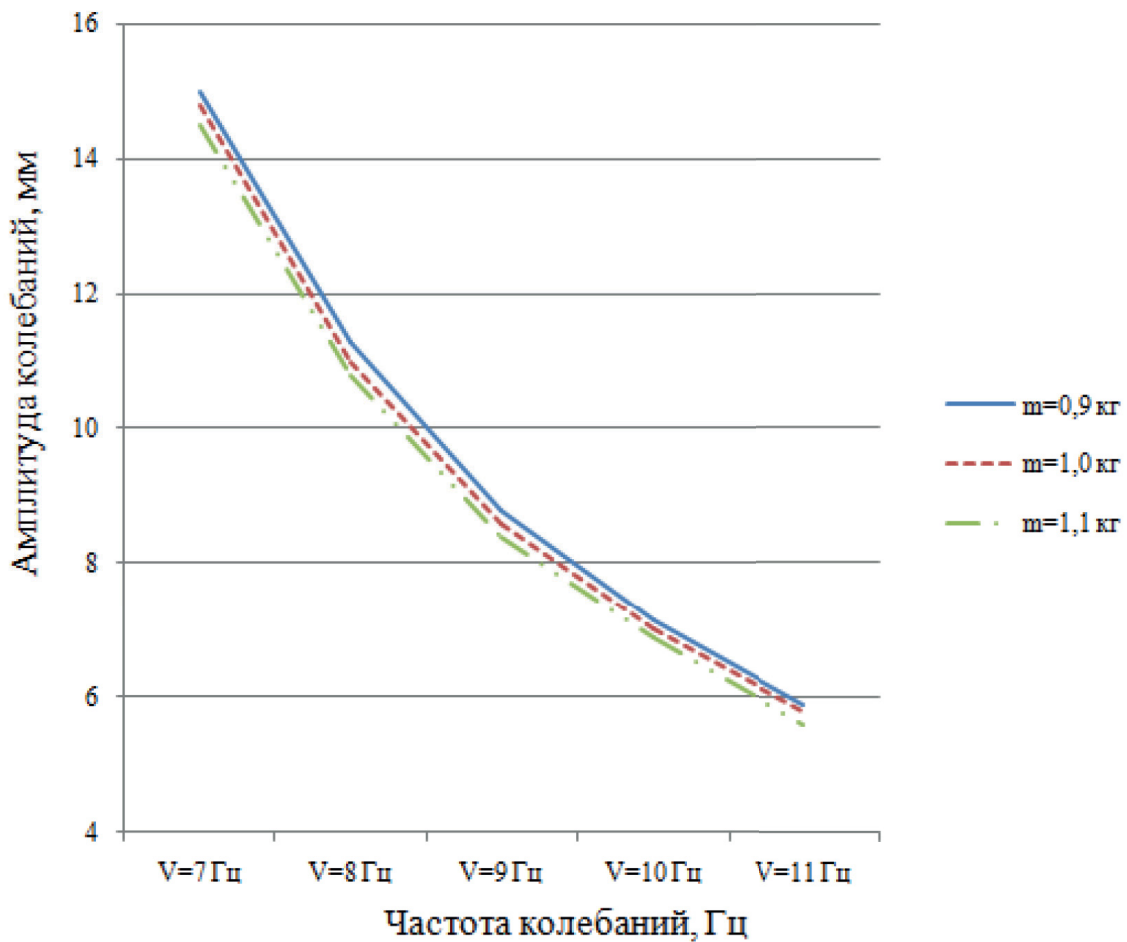


Рисунок 3. Амплитудно-частотные характеристики ВЦС в зависимости от массы подаваемой зерновой смеси

производительность повышается, достигает некоторой величины и в дальнейшем резко уменьшается, т.к. уменьшается динамический коэффициент трения зерновой смеси по решетке, что приводит к возрастанию средней скорости движения зерновой смеси вдоль решетки, а следовательно, к уменьшению вероятности западания частиц в отверстия решетки.

Выводы

В результате исследования предложена оригинальная конструкция ВЦС с ПЛАД, защищенная патентом РФ [3], которая за счет непосредственного преобразования электрической энергии в вибрационное движение рабочего органа позволяет отказаться от механического преобразователя вида движения. Это, в свою очередь, по сравнению с существующими конструкциями ВЦС, снизит эксплуатационные затраты на 31 %, уменьшит массогабаритные показатели. Разработана математическая модель, позво-

ляющая исследовать работу ВЦС в режиме вынужденных колебаний и определять зависимости изменения параметров колебаний рабочего органа от подачи зерновой смеси и режима работы ПЛАД. Как показали результаты исследования, увеличение или уменьшение подачи зерновой смеси на 10 % не оказывает значительного влияния на амплитуду колебаний рабочего органа. Возможность регулирования параметров колебаний рабочего органа ВЦС обеспечивает в зависимости от сорта и влажности зерновой смеси повышение эффективности сепарирования на 2,5–4,0 %.

Благодаря применению ПЛАД в вибрационном приводе ВЦС достигается экономия металла за счет уменьшения установленной мощности вибрационного привода на 37,5 % (с 2 до 1,25 кВт), снижается расход электроэнергии, увеличиваются сроки межсервисных интервалов обслуживания вибрационного привода на 18,2 % с 180 до 220 ч.

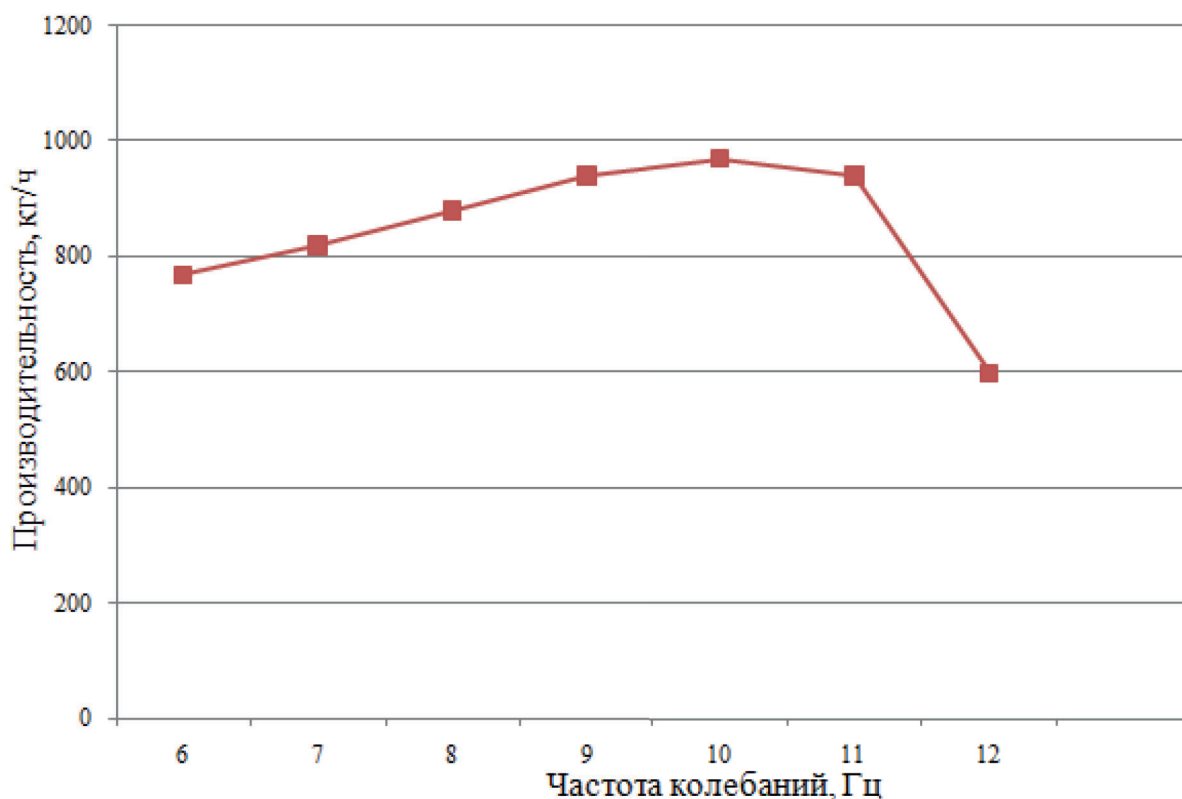


Рисунок 4. Зависимость производительности ВЦС от частоты колебаний вторичного элемента ПЛАД

Список литературы

1. Линенко А.В., Халилов Б.Р., Камалов Т.И. Энергоэффективный вибрационный привод виброцентробежного зернового сепаратора с линейным электродвигателем // Достижения науки и инновации для аграрного производства: матер. национальн. науч. конф. / Башкирский государственный аграрный университет. 2016. С. 217–220.
2. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин: учебник. М.: Машиностроение, 1999. 344 с.
3. Пат. 2624702 РФ, МПК В 04 В 3/06. Вибрационная центрифуга / Линенко А.В., Линенко Ю.А., Халилов Б.Р., Туктаров М.Ф. 2016108368, Заявлено 09.03.2016; Опубл. 05.07.2017. Бюл. 19.
4. Аипов Р.С., Линенко А.В. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин: учеб. пособие / Мин-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, Башк. гос. аграр. ун-т. Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. 306 с.
5. Тищенко Л.Н., Мазоренко Д.И., Пивень М.В., Харченко С.А., Бредихин В.В., Мандрыка А.В. Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография. Харьков: ХНТУСХ, «Миськдрук», 2010. 360 с.

References

1. Linenko A.V., Khalilov B.R., Kamalov T.I. Energy-Efficient Vibrating Drive of Vibrocentrifugal Grain Separator with Linear Electric Motor. *Materials of the National Scientific Conference «Achievements of Science and Innovation for Agrarian Production»*, Bashkir State Agrarian University. 2016, pp. 217-220.
2. Goldi A.S. Vibration of Rotary Machines. *Mechanical Engineering*, 1999, 344 p.
3. Linenko A.V., Linenko Y.A., Khalilov B.R., Tuktarov M.F. *Vibration centrifuge*. Patent RF, No. 2624702, 2017.
4. Aipov R.S., Linenko A.V. *Linear Electrical Machines and Linear Asynchronous Electric Drives of Technological Machines: Tutorial*. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Bashkir State Agrarian University. Ufa, Bashkir State Agrarian University, 2013. 306 p.
5. Tishchenko L.N., Mazorenko D.I., Piven M.V., Kharchenko S.A., Bredikhin V.V., Mandryka A.V. *Modeling of Grain Separators Processes*. Kharkov. KhNTUKh, «Miskrudk», 2010. 360 p.



Бухаров Д. С.
Bukharov D. S.

кандидат технических наук,
заместитель начальника службы — начальник отдела,
Служба автоматизированных систем диспетчерского управления,
Филиал АО «Системный оператор Единой энергетической системы»
«Региональное диспетчерское управление энергосистемы
Иркутской области»,
г. Иркутск, Российская Федерация

УДК 004.021

О МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ МАССИВОВ ЗНАЧЕНИЙ ТОКА В ЗАДАЧЕ НАСТРОЙКИ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИКВИДАЦИИ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА

В статье рассматриваются способы определения точек минимума и максимума в исходном массиве данных, характеризующем собой график колебания тока. Каждый такой график состоит из парных значений времени и значений величины тока в соответствующий момент времени. Найденные на графике точки максимумов и минимумов используются для вычисления тока срабатывания и возврата, характеризующих собой уставки устройства автоматической ликвидации асинхронного режима. Исходные данные обладают особенностью (локальные колебания малой амплитуды), препятствующей применению для решения задачи метода стрельбы и поиска по маске. При поиске по маске фиксируется каждое локальное колебание, что приводит к невозможности определения уставок автоматики. Метод стрельбы позволяет решить поставленную задачу только в исключительных случаях, когда удачно подобран шаг горизонтального сканирования (стрельбы). Адекватное решение задачи дает метод равномерного поиска (метод сканирования), но при этом снижается точность решения из-за потери большого количества исходных данных. Потеря данных обусловлена неравномерностью данных в массиве (отсутствует жестко заданный шаг по времени) и достаточно большим шагом сканирования самого метода (необходимо приближенное вычисление значений тока). Автором предложен метод решения задачи без потери данных. Метод основан на разделении исходного множества данных на пересекающиеся подмножества и анализе всех данных на малых интервалах времени. Анализ динамики изменения величины тока на каждом выделенном интервале позволяет зафиксировать «глобальный» минимум и максимум. Пересечение интервалов необходимо для идентификации экстремума, отброса «локальных» экстремумов, отброса наибольших и наименьших величин тока на исследуемом интервале. Вычислительный эксперимент показал, что скоростью решения задачи у метода равномерного поиска выше, чем у метода с разбиением на подмножества на 27 %. Сто графиков колебания тока методом с разбиением на подмножества обрабатываются приблизительно 1,1 с, при этом вычисления экстремумов выполняется без потери данных.

Ключевые слова: обработка данных, устройство автоматической ликвидации асинхронного режима, АЛАР, поиск точек максимума и минимума, график колебания тока, равномерный поиск, пересекающиеся подмножества.

ON METHODS OF CURRENT VALUES SETS PROCESSING FOR ADJUSTMENT OF AUTOMATICS FOR ELIMINATION OF ASYNCHRONOUS OPERATION

The article presents methods for determining points of maximum and minimum within sets of current oscillation values. Each set contains two values: a time mark and a current magnitude in this time mark. The points of maximum and minimum are used in determining of operative and drop-away currents (setting of automatics for elimination of asynchronous operation). There is a feature in basic data: sets of current values enclose local current oscillation with small amplitude. This feature is a restriction in using of shooting method and mask search for problem solving.

Mask search is allowed to set each local current oscillation, that prevents solving the problem. Shooting method is allowed to solve the problem in exceptional cases. Adequate decision is obtained with using even step search. This method has higher speed by solving the problem than other methods. Even step method has smaller accuracy as a result of data bulk loss. Data bulk loss is caused by granularity of data set (missing of predefined time step) and big search step (approximate computation of current values). Author offers a method for problem solving without the data loss. The method based on splitting of basic data on overlapping sets and analyzing of these data within minor time intervals. This method allows switching off local current oscillations from the solution. Local current oscillations can be able to alter adjustment of automatics for elimination of asynchronous operation. Computational experiments are showed the step search is more rapidly in computations than author's method. One hundred of current oscillation sets is processed by author's method per 1,1 second and extremums are determined without the data loss.

Key words: data processing, automatics for elimination of asynchronous operation, АЕАО, determining points of maximum and minimum, current oscillation chart, even step search, overlapping sets.

Устройства автоматической ликвидации асинхронного режима (АЛАР) являются неотъемлемой составляющей энергосистемы и предназначены для восстановления синхронного режима в электропередаче и обеспечения устойчивости энергосистемы в целом [1, 2]. Для настройки устройств АЛАР, выполненных по принципу фиксации колебания тока (ФКТ) [3, 4], требуется проведение значительного количества расчетов переходных процессов, в результате которых специалист по электрическим режимам получает большое количество данных, требующих детальной обработки.

Обработка больших массивов данных должна выполняться не только с максимально возможной скоростью, но и с достаточной точностью [5]. Для решения многих прикладных задач требуется применение специфических алгоритмов и методов, различия которых зачастую обусловлены особенностями исходных данных и условий [6].

В задаче настройки устройств АЛАР, выполненных по принципу ФКТ [4], исходными данными являются массивы значений времени и тока, полученных в результате расчета переходного процесса. Каждый массив может содержать по несколько тысяч парных значений время — ток, которые могут быть получены, например, посредством программных комплексов Eurostag [7], Rustab [8] или с регистраторов аварийных событий.

На одном из этапов настройки устройства АЛАР [4] из каждого такого массива выделяются точки максимума и минимума, что

необходимо для дальнейшего вычисления токов срабатывания I_{cp} и возврата $I_{воз}$, характеризующих собой уставки устройства АЛАР. Рассмотрим некоторые способы определения точек максимума. Описание вычисления точек минимума в настоящей работе не приводится.

Способы поиска точек максимума

1. *Поиск по маске.* Поскольку исходными данными в рассматриваемой задаче являются массивы значений времени $T = \{t_j : j = \overline{1, n}\}$ и токов $I = \{I(t_j) : j = \overline{1, n}\}$, то обработка этих данных выполняется последовательным перебором всех значений с поиском точки максимума I_{max} . Величина n характеризует количество элементов в массиве. Точкой максимума I_{max} в момент времени $t_j (j = \overline{1, n})$ считается точка $I(t_j)$, в окрестности которой выполняется условие $I(t_{j-1}) < I_{max}(t_j) > I(t_{j+1})$ (рисунок 1, а) [9, 10].

Отметим, что в зависимости от специфики исходных данных окрестность может содержать несколько точек слева и справа, что необходимо, например, для корректной обработки данных в случае наличия нескольких рядом расположенных точек максимума: $I(t_{j-2}) < [I_{max}(t_{j-1}) = I_{max}(t_j) = I_{max}(t_{j+1})] > I(t_{j+2})$.

2. *Метод стрельбы.* Для поиска точки максимума также возможно применить метод стрельбы [11], предварительно подвергнув его незначительной модификации для решения настоящей задачи.

Суть метода заключается в выделении интервала времени $[a_q; b_q]$ (рисунок 1, б) и

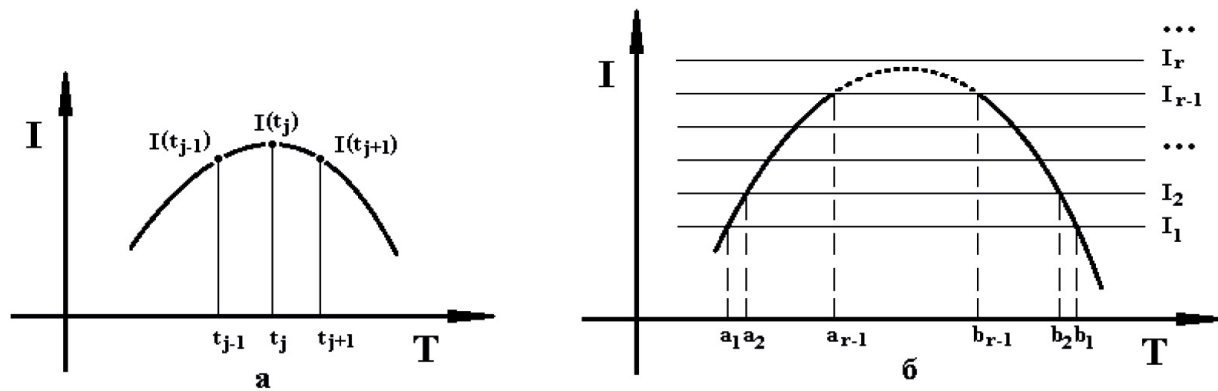


Рисунок 1. Поиск точки максимума

исследовании относящегося к нему массива точек $\{I(a_q), \dots, I(b_q)\}$ на максимум, где $q = 1, 2, \dots, r-1, r, \dots, k, k$ — количество «выстрелов», делящих ось тока I на равные интервалы $(I_2 - I_1) = (I_3 - I_2) = (I_{r-1} - I_r) = (I_{k-1} - I_k)$.

Таким образом, на каждом шаге вычисления q определяется интервал времени, сужающийся по мере приближения к точке максимума: $[a_3; b_3] \in [a_2; b_2] \in [a_1; b_1]$. Граничные точки этих интервалов вычисляются при пересечении исследуемого графика колебания тока линией I_q . На шаге $q = r - 1$ (рисунок 1, б) фиксируется последний интервал $[a_{r-1}; b_{r-1}]$, поскольку на шаге $q = r$ график колебания тока линией I_q не пересекается. На интервале $[a_{r-1}; b_{r-1}]$ выполняется поиск точки максимума $I_{max} = \max \{I(a_{r-1}), \dots, I(b_{r-1})\}$.

Поиск по маске и метод стрельбы эффективно решают задачу поиска точки максимума, однако график переходного процесса может содержать также и «локальные колебания» (рисунок 2, а). Точки максимума таких колебаний не должны попадать в число максимумов, необходимых для вычисления тока срабатывания $I_{ср}$, поскольку они могут существенно исказить конечную настройку устройства АЛАР.

3. *Метод равномерного поиска.* Проблема с локальными колебаниями может быть

решена предварительной обработкой исходного массива данных $I = \{I(t_j) : j = \overline{1, n}\}$ с целью формирования нового массива $I' = \{I'(t_s) : s = \overline{1, m}\}$ с равномерным шагом по времени Δt [12], при этом шаг Δt задается достаточно большим (рисунок 2, б).

Стоит отметить, что при приведении данных к равномерному шагу Δt происходит снижение точности конечного решения. В массив I' не попадает значительное количество точек из массива t_s . Кроме того, выполняется приближенное вычисление значения в момент времени t_s , поскольку совпадение моментов времени t_s и t_j маловероятно.

4. *Разбиение на пересекающиеся подмножества.* Для возможности учета всех исходных данных и выделения точек максимума без учета максимумов локальных колебаний автором настоящей статьи разработан алгоритм обработки массива данных с разбиением на пересекающиеся подмножества. Поиск максимума по данному алгоритму описывается следующими шагами.

Шаг 1. Множество $I = \{I(t_j) : j = \overline{1, n}\}$ разбивается на подмножества $I_{sub,c} = \{I_c(t_{c,j}) : j = \overline{1, n_c}\}$, $c = \overline{1, v}$, где v — количество подмножеств, n_c — количество

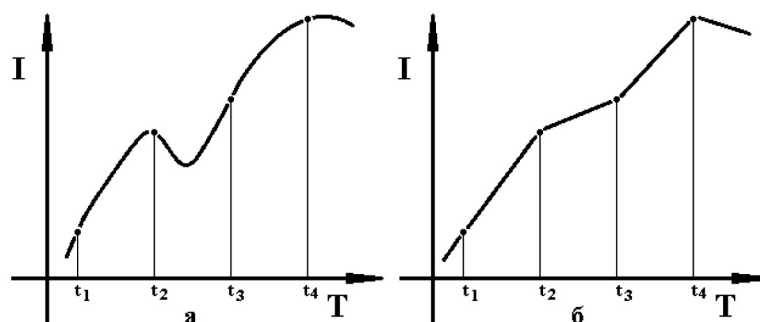


Рисунок 2. Разбиение графика на равные интервалы

точек в c -ом подмножестве, $I = I_{sub,1} \cup I_{sub,2} \cup \dots \cup I_{sub,v}$.

Множество I разделяется так, чтобы количество точек n_c в подмножестве $I_{sub,c}$ для $c = \overline{1, v-1}$ равнялось $3n/2v$, из которых n/v точек принадлежат интервалу времени $[t_c; t_{c+1}]$, $n/2v$ точек принадлежат интервалу времени $[t_{c+1}; t'_{c+1}]$ (рисунок 3). Количество элементов n_v в подмножестве $I_{sub,v}$ приблизительно равно n/v . Приближенность значения n_v объясняется тем, что не во всех случаях возможно разделение множества I на равные подмножества. Подмножества $(I_{sub,1} \cap I_{sub,2}), \dots, (I_{sub,v-1} \cap I_{sub,v})$ используются для анализа динамики изменения значения тока, например $(I_{sub,1} \cap I_{sub,2})$ исследуется на интервале $[t_2; t'_2]$.

После формирования множеств $I_{sub,c}$ переходим к шагу 2.

Шаг 2. Для обработки выбирается подмножество $I_{sub,c}$ при $c=1$, переходим к шагу 3.

Шаг 3. На интервале времени $(t_c; t_{c+1}]$, содержащем множество элементов $(I_{sub,c} \setminus I_{sub,c+1})$, выполняется поиск максимального значения тока $I_{max,c}$ последовательным перебором всех значений из $(I_{sub,c} \setminus I_{sub,c+1})$. Переходим к шагу 4.

Шаг 4. Если $c < v$, то переходим к шагу 5, в противном случае переходим к шагу 8.

Шаг 5. Если $I_c(t_c) < I_{max,c} \geq I_c(t_{c+1})$, то переходим к шагу 6. В противном случае на интервале $(t_c; t_{c+1}]$ нет решения, переходим к шагу 7.

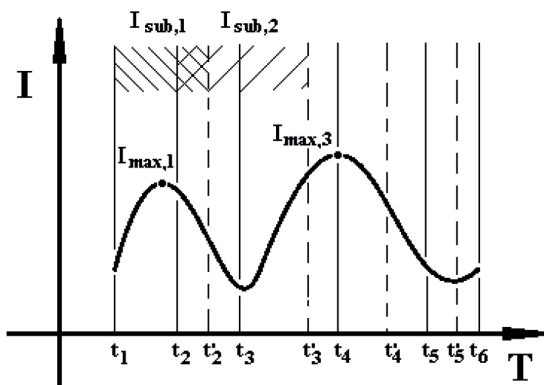


Рисунок 3. Разбиение на пересекающиеся подмножества

Шаг 6. Анализируется множество точек $(I_{sub,c} \cap I_{sub,c+1})$ на соответствующем интервале $(t_{c+1}; t'_{c+1}]$. Если $I_{max,c} > I_c(t_{c,j}) : \forall t_{c,j} \in (t_{c+1}; t'_{c+1}]$, $j = \overline{1, n_c}$, то $I_{max,c}$ — искомая точка максимума, в противном случае на интервале $(t_c; t_{c+1}]$ нет решения. Переходим к шагу 7.

Шаг 7. Для обработки выбирается подмножество $I_{sub,c}$ при $c = c + 1$, переходим к шагу 3.

Шаг 8. Если $I_c(t_c) < I_{max,c} > I_c(t_{c+1})$, то $I_{max,c}$ — искомая точка максимума на интервале $(t_v; t_{v+1}]$, в противном случае на интервале $(t_v; t_{v+1}]$ нет решения. Вычисления останавливаются.

Вычислительный эксперимент

Проведем простой и наглядный вычислительный эксперимент, сравним время решения задачи определения минимумов и максимумов каждым из вышеописанных способов, которые реализованы в рамках разрабатываемого автором программного обеспечения.

Исходными данными является массив парных значений время — ток (14800 значений). На рисунке 4 представлено графическое отображение данного массива. Для обеспечения более корректной оценки времени решения задачи данный массив обрабатывается 300 раз, при этом каждая обработка выполняется как для отдельного графика, и в результате вычисляется 300 наборов минимумов и максимумов

В исследуемом массиве содержится по 107 максимумов и минимумов, из которых

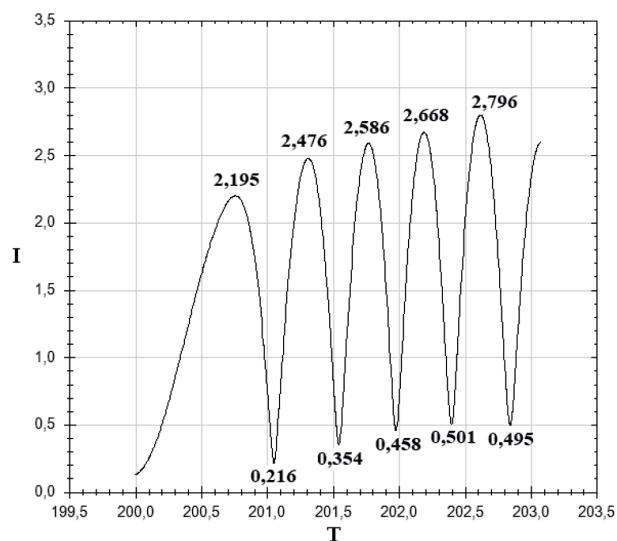


Рисунок 4. Результат решения задачи

только по 5 максимумов и минимумов — решение задачи.

Исходные данные предварительно обработаны: исключены точки с равными значениями тока, которые следуют в массиве друг за другом. Такая обработка выполнена с целью возможности применения поиска по маске по «жесткой» схеме $I(t_{j-1}) < I_{max}(t_j) > I(t_{j+1})$, при которой обра-

ботка каждой пары данных массива выполняется за равное время.

Сравним время решения задачи (таблица 1) при поиске по маске, равномерным поиском $\Delta t = 0,001$, методом стрельбы при $k = 20$ и методом с разбиением на пересекающиеся подмножества при $v = 296$, при этом $p(I_{sub,c} \cap I_{sub,c+1}) = 25$, $p(I_{sub,c} \setminus I_{sub,c+1}) = 50$, $c = \overline{1, v-1}$.

Таблица 1. Время решения задачи

Способ поиска	Время решения, мс	
	Количество максимумов/минимумов	
Поиск по маске	4201	107/107
Равномерный поиск	2348	5/5
Метод стрельбы	2695	9/9
Разбиение на подмножества	3208	5/5

Итак, из таблицы 1 видно, адекватное решение задачи определения точек минимума и максимума в массиве данных, характеризующем собой график колебания тока, дают метод равномерного поиска и метод с разбиением на пересекающиеся подмножества.

Наилучшей скоростью решения задачи обладает метод равномерного поиска: время решения задачи на 27 % меньше, чем у метода с разбиением на подмножества. Однако применение метода равномерного поиска сопряжено с потерей существенной части данных, что влечет за собой снижение точности решения: в интервале времени располагается 101 точка, но учитываются при расчетах только три. Точка минимума: $I_{min}(201,543) = 0,35452661$. При этом точка минимума на интервале $[201,542; 201,544]$ для исходного массива данных $I_{min}(201,5431976) = 0,35448759$.

Также для решения задачи возможно применение метода стрельбы, но, учитывая особенности исходных данных (локальные

колебания), существует риск получения неадекватного решения. После уменьшения в методе стрельбы величины k до 7 удается определить по 5 максимумов и минимумов, но такое условие не гарантирует адекватность решения при исследовании различных по содержанию графиков, а применимо только для рассмотренного примера. Применение поиска по маске в рамках рассматриваемой задачи нецелесообразно.

Вывод

Для решения рассмотренной задачи с учетом всех исходных данных необходимо использовать метод с разбиением на пересекающиеся подмножества, позволяющий определить точки минимума и максимума без потери точности. Данный метод позволяет исключить из конечного решения локальные экстремумы (проблема локальных колебаний), которые способны существенно исказить конечную настройку устройства АЛАР, выполненных по принципу ФКТ.

Список литературы

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
2. Вайнштейн Р.А., Шестаков В.В., Кац И.М. Автоматическое управление электроэнергетическими системами в нормальных и аварийных режимах. Ч. 2. Томск:

Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 124 с.

3. Гоник Я.Е., Иглицкий Е.С. Автоматика ликвидации асинхронного режима. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.

4. Комплекс противоаварийной автоматики многофункциональный. 656455.206-01 РЭ. Новосибирск: Институт автоматизации энергетических систем, 2013. 60 с.

5. Берг А.Ю., Бухаров Д.С., Гусев Р.А., Танирбергенов Е.Т. Об автоматизации настройки устройств АЛАР // Электроэнергетика глазами молодежи — 2016: матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. Т. 3. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. С. 20–21.

6. Берг А.Ю., Бухаров Д.С., Гусев Р.А., Танирбергенов Е.Т. О моделировании работы устройства АЛАР в процессе автоматической настройки его характеристики // Электроэнергетика глазами молодежи — 2017: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Т. 2. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. С. 314–315.

7. Stubbe M. High Performance Simulations // *Tractebel Link*. 1994. No. 6, P. 7-10.

8. Программные комплексы RastrWin, Bars, Lincor, Rustab, RastrKZ, RastrMDP. URL: <http://www.rastrwin.ru/rustab>.

9. Abbott S. *Understanding Analysis*. Springer, 2001. 257 p.

10. Herbert A., Joachim E. *Analysis*. Birkhauser Verlag, 2005. 426 p.

11. An P.T., Haic N.N., Hoaid T.V. Direct Multiple Shooting Method for Solving Approximate Shortest Path Problems // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2013. Vol. 244. P. 67–76.

12. Турчак Л.И., Плотников П.В. Основы численных методов. М.: Физматлит, 2003. 304 с.

References

1. Gurevich Ju.E., Libova L.E., Okin A.A. *Calculations of Stability and Emergency Control in Power Systems*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990. 390 p. [in Russian].

2. Vajnshtejn R.A., Shestakov V.V., Кас I.M. *Automatic Control of Power Systems in Normal and Emergency Modes*. Part 2. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2013. 124 p. [in Russian].

3. Gonik Ja.E., Iglickij E.S. *Automation of Asynchronous Mode Elimination*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1984. 112 p. [in Russian].

4. *The Complex of Emergency Control Automation Multifunctional. 656455.206-01 RJe*. Novosibirsk, Institute of Automation Energy Systems, 2013. 60 p. [in Russian].

5. Berg A.Ju., Bukharov D.S., Gusev R.A., Tanirbergenov E.T. On Automating the Configuration of ALAR Devices. *Materials of VII International Scientific and Technical Conference «Power Industry through the Eyes of Young People — 2016»*. Kazan, 2016, Vol. 3. pp. 20–21. [in Russian].

6. Berg A.Ju., Bukharov D.S., Gusev R.A., Tanirbergenov E.T. On the Modeling of the Operation of the ALAR Device in the Process of Automatic Adjustment of its Characteristics. *Materials of VIII International Scientific and Technical Conference «Power Industry through the Eyes of Young People — 2017»*. Samara, 2017, Vol. 2, pp. 314-315. [in Russian].

7. Stubbe M. *High Performance Simulations. Tractebel Link*, 1994, No. 6, pp. 7–10.

8. Software RastrWin, Bars, Lincor, Rustab, RastrKZ, RastrMDP. URL: <http://www.rastrwin.ru/rustab>.

9. Abbott S. *Understanding Analysis*. Springer, 2001. 257 p.

10. Herbert A., Joachim E. *Analysis*. Birkhauser Verlag, 2005. 426 p.

11. An P.T., Haic N.N., Hoaid T.V. Direct Multiple Shooting Method for Solving Approximate Shortest Path Problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2013, Vol. 244, pp. 67–76.

12. Турчак Л.И., Плотников П.В. *Fundamentals of Numerical Methods*. Moscow, Fizmatlit, 2003. 304 p. [in Russian].



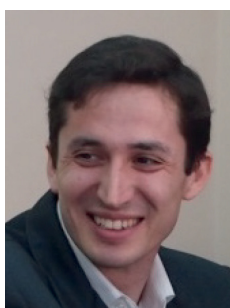
Мукаева В. Р.
Mukaeva V. R.

*кандидат технических наук,
старший научный сотрудник кафедры
«Теоретические основы электротехники»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Горбатков М. В.
Gorbatkov M. V.

*аспирант кафедры
«Теоретические основы электротехники»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Фаррахов Р. Г.
Farrakhov R. G.

*кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры
«Теоретические основы электротехники»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Парфенов Е. В.
Parfenov E. V.

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

УДК 621.9.047.7:519.8

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ

Плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО) — современный экологичный технологический процесс, который позволяет получать многофункциональные покрытия на поверхности металлов и сплавов, отличающиеся высокой коррозионной и износостойкостью. Так, в нефтехимической и газовой промышленности ПЭО-покрытия применяются на алюминиевых сплавах для центробежных насосов, торцевых уплотнений и позволяют увеличить срок их службы. Важной особенностью ПЭО является то, что оксидные слои растут в обе стороны относительно исходной поверхности детали на границах металл-оксид и оксид-электролит, но с различной скоростью. Скорости роста покрытия взаимосвязаны с комплексом физических процессов, в которых, наряду с процессами электрохимического окисления на границе металл-оксид и растворения на границе оксид-электролит, в местах локализации микроразряда происходит переплавление покрытия и подложки, а расплавленный металл выбрасывается на поверхность детали и немедленно окисляется и осаждается.

Таким образом, для обеспечения точных размеров детали актуальна задача диагностики скорости роста покрытия на различных стадиях обработки. Известно, что процесс ПЭО сопровождается кипением электролита, вспышками микроарзрядов; данные явления являются источниками акустических колебаний, характеристики которых зависят от стадии процесса ПЭО. Поэтому в работе проведен поиск информативных параметров акустических колебаний для контроля скорости роста ПЭО-покрытия. В статье приведены результаты экспериментальных исследований акустических характеристик и свойств поверхности в ходе ПЭО технически чистого алюминия в биполярном импульсном режиме. Выбор режима определяется преимуществом с точки зрения микротвердости, адгезии и шероховатости по сравнению с униполярными импульсным режимом и режимом постоянного тока. Проведен анализ экспериментальных данных и предложен подход для определения скорости роста покрытия без прерывания процесса. Показано, как изменяются акустические параметры на разных стадиях роста покрытия. Получена закономерность, позволяющая рассчитать скорость роста покрытия на каждой стадии по интенсивности акустических колебаний на частотах первой и второй гармоники импульсов рабочего напряжения.

Ключевые слова: плазменно-электролитическое оксидирование, биполярный режим, микроарзряды, акустические характеристики, регрессионное моделирование.

A STUDY OF THE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION OF ALUMINUM

Plasma electrolytic oxidation (PEO) is a modern environmentally friendly technological process, which helps to obtain multifunctional coatings providing high corrosion and wear resistance on the surface of metals and alloys. Thus, in the petrochemical and gas industry, PEO-coatings on aluminum alloys are used for centrifugal pumps, mechanical seals; this allow to increase their service life. An important feature of PEO is that the oxide layer grows in both directions with respect to the initial surface of the sample: at the metal-oxide and oxide-electrolyte interfaces, and at different rates. The coating growth rate is connected with a complex of physical processes: electrochemical oxidation at the metal-oxide interface, dissolution at the oxide-electrolyte interface. In addition, at the microdischarge site, the coating and the substrate melt and resolidify. The molten metal is released onto the surface of the part, immediately gets oxidized and precipitates back. Therefore, there is an important task of diagnosing the growth rate of the coating at various stages of processing to ensure accurate production of the sample size. The PEO process is accompanied by the electrolyte boiling and microdischarges. These phenomena are the sources of acoustic waves. The acoustic characteristics depend on the stage of the PEO process. Therefore informative parameters of acoustic characteristics which help to monitor the PEO process were searched in this work. This article presents the results of experimental studies of acoustic characteristics and surface properties during PEO of pure aluminum in pulsed bipolar mode. This mode is better than unipolar pulsed mode and DC mode in terms of coating microhardness, adhesion and roughness. Experimental data was analyzed and a new approach was proposed for determining the coating growth rate without interrupting the process. It was shown how the acoustic parameters change at different stages of the coating growth. A regularity was obtained to calculate the growth rate of the coating at each stage according to the intensity of acoustic oscillations at fundamental and second harmonic frequencies of the technological voltage pulses.

Key words: plasma electrolytic oxidation, bipolar mode, microdischarges, acoustic characteristics, regression modeling.

Введение

Плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО) — современный, экологичный технологический процесс формирования покрытий на сплавах вентильных металлов Al, Ti, Mg, Zr. Особенностью данного процесса является использование высокого напряжения, превышающего напряжение

пробоя растущего оксидного слоя [1]. В таких условиях на поверхности обрабатываемой детали образуются микроарзряды, которые играют ключевую роль в процессе формирования покрытия. Наряду с процессами электрохимического окисления на границе металл-оксид и растворения на границе оксид-электролит, в местах локализации

микроразряда происходит оплавление покрытия и подложки, расплавленный металл выбрасывается на поверхность детали и немедленно окисляется и осаждается [2, 3]. Характер микроразрядов изменяется в ходе обработки, что отражается на свойствах оксидного слоя. Для разработки способов контроля роста покрытия авторами анализируются видеоизображения микроразрядов [4], оптические спектры [5] и отклики в электрическом сигнале [6]. Также отмечается изменение акустического излучения в ходе ПЭО [7, 8]. Авторами [9] исследовались типы акустических колебаний, создаваемые различными микроразрядами для ПЭО магниевых сплавов в режиме постоянного тока. Наше исследование посвящено изучению акустического излучения в ходе ПЭО алюминия в режиме «мягкого искрения» (soft sparking) при импульсном биполярном напряжении. Данный режим обработки описан в литературе и позволяет получать покрытия с улучшенными свойствами микротвердости, адгезии, меньшей шероховатостью по сравнению с униполярными импульсным режимом и режимом постоянного тока [3, 10]. Исследование направлено на поиск закономерностей, позволяющих разделить стадии процесса ПЭО с характерными скоростями роста покрытия.

Экспериментальные исследования

Эксперименты проводились на автоматизированной экспериментальной установке для изучения электролитно-плазменных процессов в режиме импульсного биполярного напряжения со стабилизацией напряжения [11]. Частота следования импульсов 2 кГц. В качестве электролита использовался водный раствор, содержащий 1 г/л КОН, 2 г/л $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ и 2 г/л Na_2SiO_3 . Температура поддерживалась 20 °С. Для определения изменения толщины покрытия во времени проводилась серия экспериментов длительностью 1, 3, 6, 10, 17, 30 и 45 мин. Толщина покрытия на образцах измерялась вихретоковым толщиномером Defelsko Positector 6000. Микрофотографии поверхности получены с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6490.

В ходе процесса регистрировались средние и мгновенные значения тока и напряже-

ния с частотой 1 Гц и 1 МГц соответственно. Также проводилась видеосъемка с аудиозаписью с частотой 48 кГц в ходе опыта длительностью 20 мин. После обработки данные измерений электрических параметров и wav-аудиофайл были обработаны в программной среде MATLAB. Для выявления акустических колебаний на рабочей частоте и кратных гармониках были рассчитаны периодограммные оценки акустического спектра по методу Уэлча [12] с окном Кайзера. Разрешение по времени составило 5 с, разрешение по частоте — 9,3 Гц. Измерения усреднялись в интервале 1 мин. Осциллограммы тока были преобразованы в спектр с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Результаты и их обсуждение

Как показано на рисунке 1, а, среднее значение плотности тока в ходе оксидирования уменьшается в начале обработки и устанавливается на уровне 0,2 А/см² при достижении толщины покрытия 19–20 мкм после 10–14 мин обработки. Стабилизация величины тока при постоянных амплитудах импульсов напряжения свидетельствует о том, что после достижения определенной толщины покрытия на границе металл-оксид протекают реакции характерные для режима «мягкого искрения». По результатам быстрого преобразования Фурье выделены частоты: первая гармоника импульсов рабочего напряжения 2 кГц и вторая гармоника 4 кГц. Амплитуды колебаний тока на данных частотах также стремятся к постоянному значению.

В первой стадии обработки 1–10 мин наблюдается быстрый рост покрытия, в дальнейшем скорость замедляется. Каждый этап, как показано на рисунке 1, б, можно аппроксимировать прямыми:

$$h = 1,66t + 3,47, t = 1 \dots 10 \text{ мин};$$

$$h = 0,22t + 17,56, t = 10 \dots 45 \text{ мин}, \quad (1)$$

где h — толщина покрытия, мкм; t — длительность обработки, мин; коэффициенты $v_1 = 1,66$ и $v_2 = 0,22$ отражают скорости роста покрытия на первой и второй стадиях.

На рисунке 1, в представлены акустические колебания на частотах 2 кГц и 4 кГц. Изменение во времени амплитуд колебаний на выбранных частотах может объясняться эволюцией микроразрядов и изменением интенсивности кипения у поверхности

детали. Изменение характера микроарзрядов отражается и на микрорельефе поверхности покрытия, как показано на рисунке 1, а.

Первые 4 мин обработки микроарзряды — искровые (рисунок 1, г). Такие микроарзряды возникают при тонкой оксидной пленке, не требующей большой энергии электрического пробоя. При достижении толщины покрытия 16–18 мкм возникают более крупные микроарзряды, которые медленнее затухают и приводят к формированию более крупных кратеров и пор в поверхностном слое. При такой толщине покрытия необходимо больше энергии для возникновения пробоя между подложкой и электролитом. Можно предположить, что из-за малого времени жизни для вспышек пузырьков газа с искровыми микроарзрядами характерны механические колебания на более высоких частотах, по сравнению с более энергоемкими микроарзрядами. Поэтому на рисунке 1, в с ростом

покрытия мы наблюдаем уменьшение амплитуды колебаний A_2 на частоте 4 кГц и усиление колебаний A_1 на частоте 2 кГц.

При дальнейшей обработке, когда устанавливается постоянная величина тока, покрытие равномерно растет. Растущее покрытие препятствует прохождению заряда, поэтому количество микроарзрядов на поверхности покрытия сокращается (рисунок 1, г). Звуковые колебания на рабочей частоте импульсов напряжения также уменьшаются. В то же время нарастает амплитуда на частоте второй гармоники 4 кГц импульсов рабочего напряжения. На данном этапе в процессе преобладает формирование внутреннего слоя покрытия. Наблюдается свечение образца. Можно предположить, что люминесценцию вызывают малые искровые микроарзряды, возникающие на границе металл-оксид.

Таким образом, стадийность процесса ПЭО в выбранном режиме обработки отра-

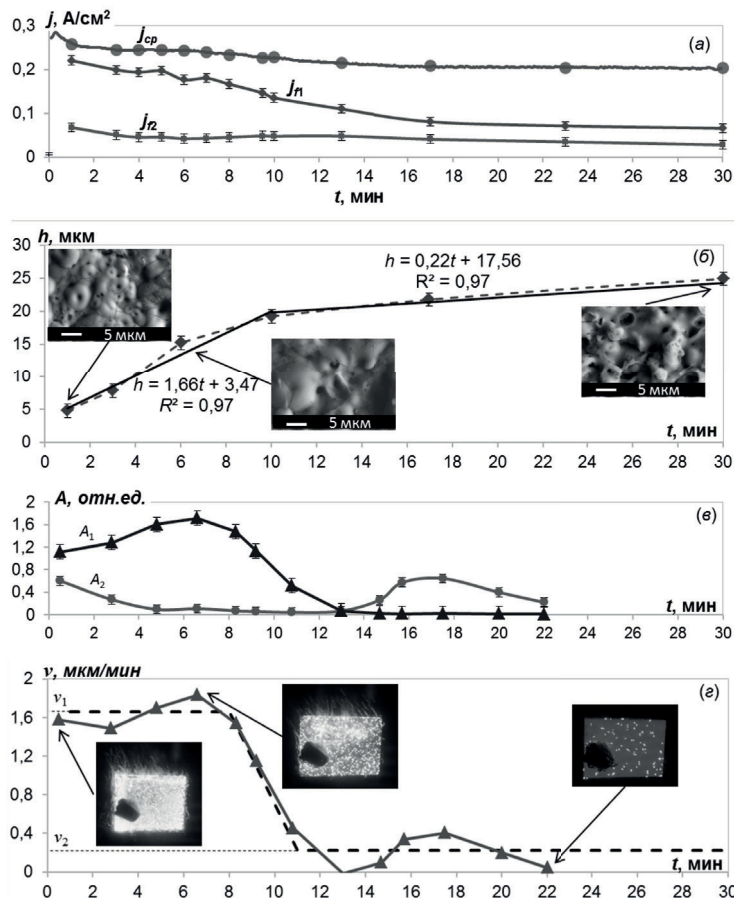


Рисунок 1. Изменение во времени параметров процесса ПЭО алюминия: средняя плотность j_{cp} , плотность тока j_{f1} и j_{f2} на частотах 2 кГц и 4 кГц (а); толщина покрытия и микрофотографии рельефа поверхности после 1, 6 и 30 мин обработки (б); интенсивность акустических колебаний A_1 и A_2 на частотах 2 кГц и 4 кГц (в); кривые скорости роста покрытия, полученные на основе уравнений аппроксимации экспериментальных данных (---) и по акустическим характеристикам (—▲—) (г)

жается в акустических характеристиках. Для поиска взаимосвязи акустических колебаний со скоростью роста покрытия v (мкм/мин) было проведено регрессионное моделирование. Получено уравнение:

$$v = k_0 + k_1 \cdot A_1 + k_2 \cdot A_2, \quad (2)$$

где $k_0 = -0,15$, $k_1 = 1,1 \cdot 10^5$ и $k_2 = 8,22 \cdot 10^4$ — коэффициенты регрессионной модели; A_1 и A_2 — интенсивности звуковых колебаний на частотах 2 кГц и 4 кГц.

На рисунке 1, г представлены две кривые: первая, полученная в результате регрессионного моделирования и кривая с двумя уровнями скорости v_1 и v_2 ; вторая, полученная на основе линейных уравнений аппроксимации экспериментальных данных. Коэффициент детерминации и стандартное отклонение отсчетов второй кривой относительно первой составляют 0,98 и 0,15 мкм/мин соответственно. Общий закономерный характер кривых свидетельствует о том, что изменение стадии процесса ПЭО и скорость роста покрытия можно идентифицировать по акустическим характеристикам.

Выводы

Проведены экспериментальные исследования технически чистого алюминия в

Список литературы

1. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S.J. Plasma Electrolysis for Surface Engineering. Review // Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 122. P. 73–79.
2. Yerokhin A.L., Snizhko L.O., Gurevina N.L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A. Spatial Characteristics of Discharge Phenomena in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum alloy // Surface and Coatings Technology. 2004. Vol. 177–178. P. 779–783.
3. Gebarowski W., Pietrzyk S. Influence of the Cathodic Pulse on the Formation and Morphology of Oxide Coatings on Aluminium Produced by Plasma Electrolytic Oxidation // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58 (1). P. 241–245.
4. Парфенов Е.В., Лазарев Д.М., Фаткуллин А.Р., Ерохин А.Л. Идентификация технологического процесса плазменно электролитического оксидирования // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 4. С. 6–13.
5. Горбатков М.В., Парфенов Е.В., Мукаева В.Р., Жернаков С.В., Ерохин А.Л. Измерение толщины покрытия в ходе процесса плазменно-электролитического оксидирования по оптическим спектрам // Датчики и системы. 2018. № 1. С. 36–39.
6. Пат. 2360045 РФ, МПК С 25 F 5/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Парфенов Е.В., Невьянцева Р.Р., Быбин А.А. 2007137307/02; Заявлено 08.10.07; Опубл. 27.06.09, Бюл. № 18.
7. Slonova A.I., Tereleeva O.P. Morphology, Structure, and Phase Composition of Microplasma Coatings Formed on Al-Cu-Mg Alloy // Protection of Metals. 2011. Vol. 44 (1). P. 65–75.
8. Matykina E., Arrabal R., Scurr D.J., Baron A., Skeldon P., Thompson G.E. Investigation of the Mechanism of Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium Using ^{18}O Tracer // Corrosion Science. 2010. Vol. 52 (3). P. 1070–1076.

режиме «мягкого искрения» (soft sparking) при биполярном напряжении со стабилизацией напряжения. После 30 мин обработки достигнута толщина покрытия 25 мкм. Выявлены стадии технологического процесса с характерной средней плотностью тока, скоростью роста покрытия, микрорельефом поверхности, акустическим спектром и видом микрозарядов.

Проведена аппроксимация экспериментальных данных для определения скорости роста покрытия на каждой стадии. Коэффициент детерминации данных относительно аппроксимационных моделей 0,97. Определены информативные параметры акустического излучения (интенсивность колебаний на 1-ой и 2-ой гармонике импульсов рабочего напряжения), на основе которых построена регрессионная модель для определения скорости роста покрытия.

Работа подготовлена в рамках гранта РФФИ 16-38-60062. Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Nanotech» ФГБОУ ВО «УГАТУ» <http://nanotech.ugatu.ac.ru>.

9. Boinet M., Verdier S., Maximovitch S., Dalard F. Plasma Electrolytic Oxidation of AM60 Magnesium Alloy: Monitoring by Acoustic Emission Technique. *Electrochemical Properties of Coatings // Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 199. P. 141–149.

10. Wang J.-H., Du M.-H., Han F.-Z., Yang J. Effects of the Ratio of Anodic and Cathodic Currents on the Characteristics of Micro-Arc Oxidation Ceramic Coatings on Al Alloys // *Applied Surface Science*. 2014. No. 292. P. 658–664.

11. Fatkullin A.R., Parfenov E.V., Yerokhin A., Lazarev D.M., Matthews A. Effect of Positive and Negative Pulse Voltages on Surface Properties and Equivalent Circuit of Plasma Electrolytic Oxidation Process // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 284. P. 427–437.

12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

References

1. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S.J. Plasma Electrolysis for Surface Engineering. Review. *Surface and Coatings Technology*, 1999, Vol. 122, pp. 73–79.

2. Yerokhin A.L., Snizhko L.O., Gurevina N.L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A. Spatial Characteristics of Discharge Phenomena in Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum Alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2004, Vol. 177–178, P. 779–783. [in Russian].

3. Gebarowski W., Pietrzyk S. Influence of the Cathodic Pulse on the Formation and Morphology of Oxide Coatings on Aluminium Produced by Plasma Electrolytic Oxidation. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, Vol. 58 (1). pp. 241–245. [in Russian].

4. Parfenov E.V., Lazarev D.M., Fatkullin A.R., Erohin A.L. Process Identification of Plasma Electrolytic Oxidation. *Automation and Modern Technologies*, 2011, No. 4, pp. 6–13. [in Russian].

5. Gorbakov M.V., Parfenov E.V., Mukaveva V.R., Zhernakov S.V., Erohin A.L. A Coating Thickness Measuring Technique During Plasma Electrolytic Oxidation Based on Optical Emission Spectra. *Sensors and Systems*, 2018, No. 1, pp. 36–39. [in Russian].

6. Parfenov E.V., Nevyantseva R.R., Bybin A.A. *The Method for Determining the End of the Process of Electrolytic-Plasma Removal of the Coating*. Patent RF, No. 2360045, 2009. [in Russian].

7. Slonova A.I., Tereleeva O.P. Morphology, Structure, and Phase Composition of Microplasma Coatings Formed on Al-Cu-Mg Alloy. *Protection of Metals*, 2011, Vol. 44 (1), pp. 65–75.

8. Matykina E., Arrabal R., Scurr D.J., Baron A., Skeldon P., Thompson G.E. Investigation of the Mechanism of Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminium Using ^{18}O Tracer. *Corrosion Science*, 2010, Vol. 52 (3), pp. 1070–1076.

9. Boinet M., Verdier S., Maximovitch S., Dalard F. Plasma Electrolytic Oxidation of AM60 Magnesium Alloy: Monitoring by Acoustic Emission technique. *Electrochemical Properties of Coatings. Surface and Coatings Technology*, 2005, Vol. 199, P. 141–149.

10. Wang J.-H., Du M.-H., Han F.-Z., Yang J. Effects of the Ratio of Anodic and Cathodic Currents on the Characteristics of Micro-Arc Oxidation Ceramic Coatings on Al Alloys. *Applied Surface Science*, 2014, No. 292, pp. 658–664.

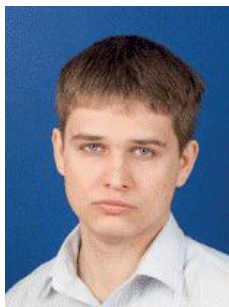
11. Fatkullin A.R., Parfenov E.V., Yerokhin A., Lazarev D.M., Matthews A. Effect of Positive and Negative Pulse Voltages on Surface Properties and Equivalent Circuit of Plasma Electrolytic Oxidation Process. *Surface and Coatings Technology*, 2015, Vol. 284, pp. 427–437.

12. Сергиенко А.Б. *Digital Signal Processing*. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2002. 608 p. [in Russian].



Султанов А. Х.
Sultanov A. Kh.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Мешиков И. К.
Meshkov I. K.

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Ишмиyarов А. А.
Ishmiyarov A. A.

младший научный сотрудник кафедры телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.391

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА В СИСТЕМАХ OFDM, ОСНОВАННЫЙ НА ПРЕДКОДИРОВАНИИ ПОДНЕСУЩИХ

В статье предложен метод снижения пик-фактора для систем, работающих по технологии OFDM, основанный на обработке поднесущих частот группового спектра. Оценены такие параметры OFDM-системы, как мгновенное значение пик-фактора, битовая вероятность ошибки при приеме сигнала, выборочная (эмпирическая) функция распределения значений пик-фактора в зависимости от используемых функций предкодирования. Проведено имитационное моделирование, подтверждающее эффективность предложенного метода. Теоретическая значимость работы заключается в использовании дискретных функций для предкодирования и при одновременном преобразовании сигнала на каждой поднесущей.

Практическая новизна работы состоит в возможности использования разработанного метода уменьшения пик-фактора в системах цифрового телевидения стандарта DVB-T2. Применение данного метода позволит более полно использовать рабочий диапазон усилителей мощности и избежать нелинейных искажений при передаче сигнала по каналу связи.

Ключевые слова: ортогональное частотное мультиплексирование, пик-фактор, предварительное кодирование, нелинейные искажения, поворот сигнального созвездия, дискретные функции, функция распределения, битовая вероятность ошибки, энергетическая эффективность, помехоустойчивость.

OFDM SYSTEM PEAK-FACTOR DECREASE METHOD BASED ON PRECODING SUBCARRIERS

In this work the peak-factor decreasing method for the OFDM systems is proposed, based on the group spectrum subcarriers processing. Such parameters of the OFDM system as the instantaneous value of the peak-factor, the bit error probability of the receiving signal, the selective (empirical) distribution function of the peak-factor values depending on the precoding functions are estimated. An experimental research confirming the effectiveness of the proposed method was carried out. Theoretical work significance consists in discrete functions using for precoding and simultaneous signal conversion on each subcarrier. Practical novelty consists in the possibility of using the developed method of reducing the peak factor in the DVB-T2 standard

digital television systems. The application of the proposed method will make possible the fully use of the power amplifiers operation range and to avoid nonlinear signal distortions.

Key words: OFDM, PAPR, precoding, nonlinear distortion, rotation of signal constellation, discrete functions, distribution function, BER, energy efficiency, noise immunity.

Сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) широко применяются в современных сетях широкополосного беспроводного доступа. Возросший поток данных требует увеличения скорости передачи в канале и повышения спектральной эффективности сигналов. Технология OFDM была включена в проводных приложениях, таких как передача данных по линиям электропередачи (PLC), цифровые абонентские линии (DSL); в беспроводных широкополосных приложениях: цифровое аудиовещание (DAB) и цифровое телевизионное вещание (DVB). Кроме того, данная технология широко реализована в беспроводных локальных сетях (WLAN); в стандартах IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16d/e, ETSI HIPERLAN/2; в беспроводных системах стандартов LTE и LTE-A и сверхширокополосных (UWB) системах передачи данных. В настоящее время она рассматривается в качестве кандидата для поддержки будущих систем связи пятого поколения (5G) [1–3].

Технология OFDM предполагает эффективное использование спектра за счёт передачи данных параллельно, по множеству близко расположенных друг к другу узкополосных частотных подканалов [4, 5]. Следствием многоканальности системы являются ее преимущества: способность противостоять многолучевому распространению, устойчивость к узкополосным помехам и частотно-селективным замираниям, увеличение битовой скорости передачи данных с помощью использования различных схем модуляции.

Несмотря на преимущества, которые дает передача сигнала на множестве поднесущих, существуют также недостатки, связанные, в первую очередь, с неравномерным распределением мощности на поднесущих за счет использования нулевых поднесущих, пилот-сигналов и информационных несущих. В связи с этим различаются средняя мощность

полосы пропускания сигнала и пиковая мощность на выборке, состоящей из всех поднесущих, следствием чего становится высокое значение пик-фактора сигнала в системах, использующих OFDM. Пик-фактором (PAPR — Peak-to-Average Power Ratio) сигнала называется отношение его пиковой мощности к средней в полосе пропускания сигнала $s(t)$ [6–9]:

$$PAPR[s(t)] = \frac{\max(|s(t)|^2)}{E(|s(t)|^2)}.$$

Нелинейные искажения, вызванные высоким пик-фактором, приводят к нарушению ортогональности поднесущих, что приводит к увеличению вероятности появления битовой ошибки принимаемого сигнала. Высокий пик-фактор требует производства выходного усилителя мощности с достаточно большим динамическим диапазоном усиления, что приводит к снижению КПД передатчика. Также за счет выбросов на пиках поднесущих повышается выходная мощность усилителя, что ведет к снижению энергоэффективности системы, которая определяется коэффициентом использования мощности сигнала при заданной спектральной плотности мощности помехи [4, 5]. Из-за проблемы с высокой пиковой мощностью OFDM при использовании нелинейных усилителей нарушается спектральная сетка OFDM сигнала, что приводит к увеличению коэффициента битовой ошибки при приеме полезного сигнала. Также высокий пик-фактор приводит к ухудшению эффективности усиления сигнала в передатчике. Данный недостаток значительно ограничивает область применения сигналов с OFDM и накладывает ограничения на скорость передачи данных и достоверность приема. Таким образом, разработка методов и способов уменьшения значения пик-фактора является актуальной научно-технической задачей для современных и перспективных систем беспроводной связи, использующих OFDM.

В современных сетях беспроводной связи существует несколько методов уменьшения пик-фактора, такие как использование формирующих фильтров [9–12], ограничение сигнала по уровню [10, 13], селективное распределение [14], добавление поднесущих [15], предварительное кодирование [16–18].

В ходе анализа современных исследований в данной области выяснено, что метод предварительного кодирования имеет преимущество по сравнению с остальными методами в виде меньшего уровня внеполосного излучения за счет нелинейного преобразования сигнала. Это простой линейный метод с приемлемой сложностью реализации, поскольку используется предопределенная матрица предварительного кодирования и, таким образом, не требуется подтверждения связи между передатчиком и приемником. Наличие одной и той же матрицы предварительного кодирования для всех блоков OFDM позволяет избежать всей обработки, необходимой для методов блочной оптимизации. Метод работает с произвольным числом поднесущих и любым типом используемой модуляции полосы частот [16]. Основной сложностью данного метода является выбор функций предкодирования, так как необходимо найти оптимальную функцию предкодирования в зависимости от типа входного сигнала с точки зрения минимизации пик-фактора этого сигнала.

Таким образом, представляется необходимым разработку математической модели OFDM-передатчика на основе совместного применения предкодирования и поворота

сигнального созвездия. Упрощенная структура OFDM-передатчика представлена на рисунке 1.

В передающей части OFDM-системы входной поток данных разделяется на N параллельных низкоскоростных потоков данных по числу поднесущих. Модулированный символ k -й поднесущей представлен в виде X_k , с интервалом символа T_s . Принципиальное отличие данной схемы состоит во введении так называемой матрицы предкодирования для уменьшения пик-фактора. Используется матрица P размером $N \times N$ перед блоком ОБПФ. Матрица предварительного кодирования P может быть записана как:

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & K & P_{0(N-1)} \\ P_{10} & L & P_{0(N-1)} \\ M & O & M \\ P_{0(N-1)} & L & P_{(N-1)(N-1)} \end{pmatrix}$$

Комплексный OFDM-сигнал в основной полосе частот с N поднесущими может быть записан как:

$$x_m(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} P X_k e^{j2\pi k \Delta f t} \quad 0 \leq t \leq N T_s,$$

где Δf — частотный сдвиг, обусловленный неточностью генератора несущей частоты.

Считается, что в системе OFDM с применением QPSK-модуляции $E\{|X_k|^2\} = 1$, и символы не коррелируют между собой в каждом блоке. Тогда максимальный PAPR сигнала OFDM с предкодированием задается следующим образом:

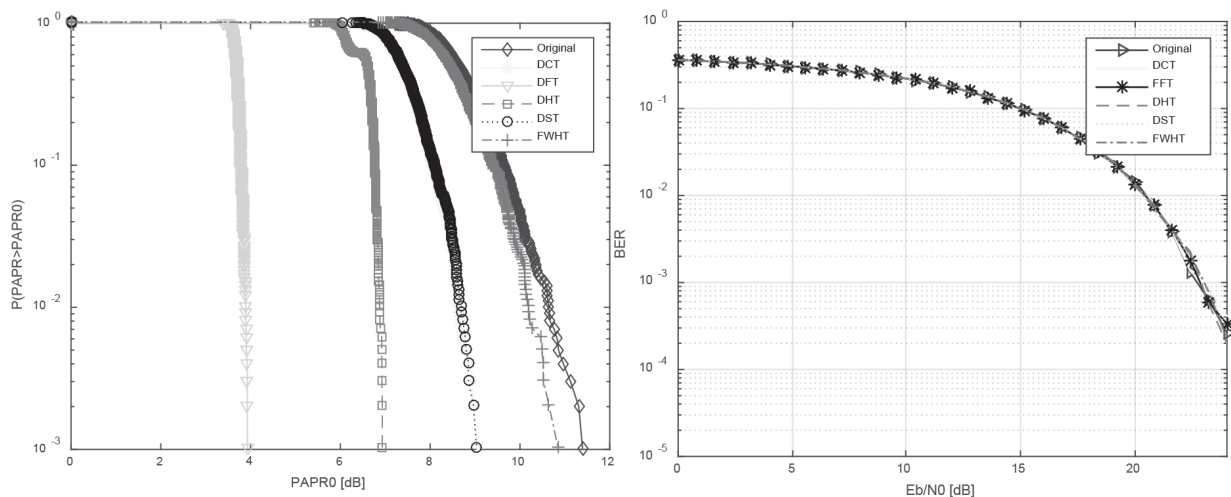


Рисунок 1. Структурная схема передающего устройства

$$PAPR = \frac{1}{N} \max_{0 \leq t \leq T} \left(\sum_{k=0}^{N-1} |P_k(e^{j\omega}) e^{j2\pi kt/T}| \right)^2.$$

Для того, чтобы сохранить ортогональность поднесущих и избежать межсимвольной интерференции, необходимо, чтобы функция предварительного кодирования P_k удовлетворяла следующему условию:

$$\begin{cases} p_k(t) = 0 & \left| t - \frac{T}{2} \right| > \frac{T}{2} \\ P_k\left(f - \frac{k}{T}\right) \approx 0 & \left| t - \frac{1}{2T_s} \right| > \frac{1}{2T_s} + \frac{\beta}{2T_s} \end{cases}.$$

Минимальная пропускная способность функции предкодирования должна быть сравнима с полосой пропускания сигнала OFDM, который равен $1/T_s$. Также β является расчетным показателем, который представляет из себя коэффициент сглаживания.

Для уменьшения PAPR в передаваемом OFDM сигнале функция предкодирования должна быть разработана таким образом, чтобы пики не появлялись в одно и то же время. Один из способов заключается в выборе различных функций для каждой поднесущей. Этот способ может быть относительно сложным. Более простой подход заключается в разработке одной основной части функции, остальная часть будет порождаться циклическими сдвигами излучения в интервале времени $0 \leq t < T$. Частотная характеристика основной функции обозначается $P_0(e^{j\omega})$, а затем преобразовывается по закону:

$$P_k(e^{j\omega}) = P_0(e^{j\omega}) e^{-j\omega k}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

где $P_0(e^{j\omega})$ — частотная характеристика идеальных импульсов (например прямоугольного импульса, импульса приподнятого косинуса или импульс квадратного корня из приподнятого косинуса). При практической реализации вместо того, чтобы выбирать идеальные фильтры для построения функции предкодирования, следует произвести усечение с последующим дискретизированием:

$$P_{i,k} = P_{i,0} e^{-j2\pi \frac{ik}{N}},$$

где $i = 0, 1, \dots, L-1$; $L = (1 + \beta)N$; $k = 0, 1, \dots, N-1$.

Требованиям удовлетворяют функции вида:

$$P(e^{j\omega}) = A(\omega) e^{-j\omega},$$

где амплитудная характеристика задается как

$$A(\omega) = \sum_{k=0}^r h_k \cos(\omega) = h^T e(\omega).$$

Из семейства дискретных функций данного вида выбраны 5 различных функций для оценки эффективности снижения значения пик-фактора.

1. DHT (Discrete Hartley Transform) — дискретное преобразование Хартли, которое может быть определено следующим образом:

$$H_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left[\cos \frac{2\pi k n}{N} + \sin \frac{2\pi k n}{N} \right].$$

2. DCT (Discrete Cosine Transform) — дискретное косинусное преобразование. DCT может быть определено следующим образом:

$$C_k = w(k) \sum_{n=1}^N x_n \left[\cos \frac{\pi}{2N} (2n-1)(k-1) \right],$$

где

$$w(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & k = 1 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & 2 \leq k \leq N \end{cases}.$$

3. DST (Discrete Sine Transform) — дискретное синусное преобразование. DST определяется как:

$$S_k = \sum_{n=1}^N x_n \sin \left(\frac{\pi k n}{N+1} \right).$$

4. FWHT (Fast Walsh — Hadamard Transform) — быстрое преобразование Уолша-Адамара. FWHT определяется как:

$$W_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \text{WAL}(n, k),$$

где $\text{WAL}(n, i)$ — функции Уолша.

5. DFT (Discrete Fourier Transform) — дискретное преобразование Фурье. DFT последовательность может быть определена как:

$$F_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}.$$

Приводится описание имитационной модели, разработанной в среде программирования MatLab, с помощью которой оцениваются такие параметры OFDM-системы, как мгновенное значение пик-фактора, битовая вероятность ошибки при приеме сигнала,

выборочная (эмпирическая) функция распределения CCDF, показывающая вероятность того, что величина PAPR примет значение, большее произвольного числа $PAPR_0$. В качестве входных параметров в модели заданы: количество поднесущих, вид и кратность модуляции, тип функции предкодирования,

длина защитного интервала и др. Результаты работы имитационной модели для различных типов функций предкодирования при использовании 16-QAM модуляции на 128 поднесущих приведены на рисунке 2. Длина защитного интервала $T_3=0,25T_s$.

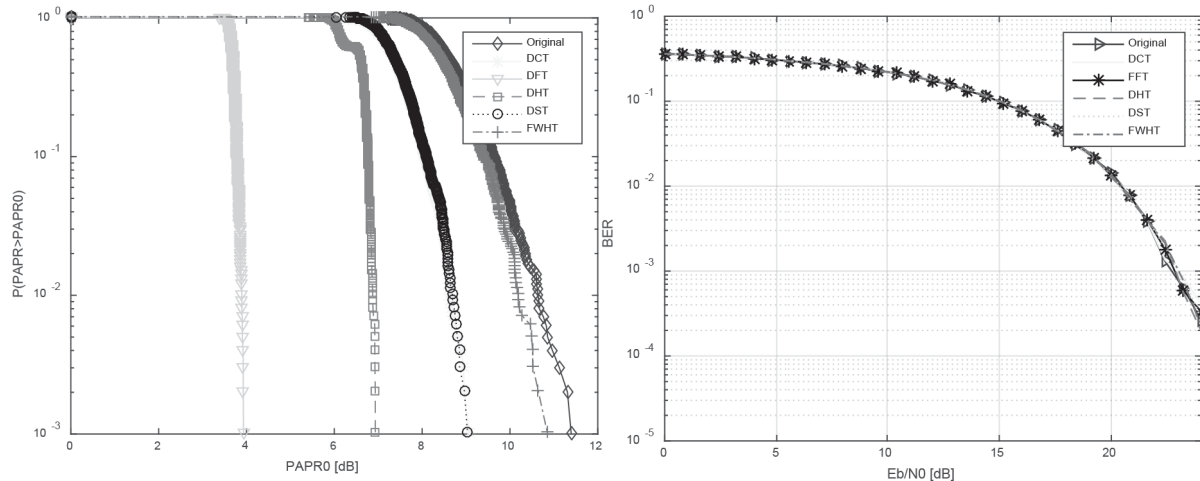


Рисунок 2. CCDF и зависимость BER от E_b/N_0

Как видно из рисунка 2, значение пик-фактора сигнала снижается на величину от 0,5 до 7,5 дБ в зависимости от использованной функции предкодирования, а вероятность битовой ошибки для различных типов функции предкодирования не изменяется, следовательно, ортогональность поднесущих не нарушается.

Таким образом, показана эффективность данного метода, позволяющего уменьшить пик-фактор сигнала, не затрагивая ортогональность поднесущих.

Был проведен ряд экспериментов для различного числа поднесущих, вида модуляции, типа используемых функций предкодирования. Анализ полученных данных показывает, что при увеличении числа поднесущих от 128 до 1024 пик-фактор передаваемого сигнала увеличивается в среднем на 1 дБ на каждое удвоение числа поднесущих. Использование многопозиционных видов модуляции также увеличивает пик-фактор. Так, при использовании вида модуляции 256-QAM пик-фактор возрастает на 4 дБ в сравнении с модуляцией QPSK. Использование предкоди-

рования эффективно уменьшает пик-фактор сигнала во всех рассмотренных случаях. Максимальные значения уменьшения пик-фактора (7,5 дБ) были получены для 16-QAM модуляции на 128 поднесущих при использовании функции предкодирования DFT. С ростом числа поднесущих до 1024, т.е. для режима передачи 1К в стандарте DVB-T2 уменьшение пик-фактора достигает величины 3 дБ для функции DHT.

Вывод

Показано, что использование предкодирования является эффективным средством для повышения энергетической эффективности систем связи, использующих OFDM. Предкодирование позволяет более полно использовать рабочий диапазон усилителей мощности и избежать нелинейных искажений при передаче сигнала по каналу связи.

Таким образом, использование данного метода повышает помехоустойчивость систем связи, использующих OFDM.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00123).

Список литературы

1. Farhang-Boroujeny B., Moradi H. OFDM Inspired Waveforms for 5G // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18. No. 4. P. 2474–2492.
2. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective / Ed.by Dr. Fei Hu. CRC Press, 2016. 556 p.
3. Schaich F., Wild T., Chen Y. Waveform Contenders for 5G — Suitability for Short Packet and Low Latency Transmissions // *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE 79th. 2014.
4. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.: ил.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Изд. дом «Вильямс», 2007. 1104 с.
6. Ochiai H., Imai K. On the Distribution of the Peak-to-Average Power Ratio in OFDM Signals // *IEEE Trans. Commun.* 2001, Vol. 49. No. 2. P. 282–289.
7. Slimane S.B. Reducing the Peak-to-Average Power Ratio of OFDM Signals through Precoding // *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2007. Vol. 56, No. 2. P. 686–695.
8. Falconer D. Linear Precoding of OFDMA Signals to Minimize Their Instantaneous Power Variance // *IEEE Trans. on Commun.* 2011. Vol. 59. No. 4. P. 1154–1162.
9. Reine R., Zang Z. Pulse Shaping Approach to PAPR Reduction for Multiuser OFDM Systems // *11th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2016. P. 2076–2080.
10. Ochiai H., Imai K. On Clipping for Peak Power Reduction of OFDM Signals // *IEEE GTC*. 2000. Vol. 2. P. 731–735.
11. Slimane S.B. Peak-To-Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals Using Pulse Shaping // *IEEE Globecom*. 2000. Vol. 3. P. 1412–1416.
12. Slimane S.B. Peak-To-Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals Using Broadband Pulse Shaping // *Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf.* 2002. Vol. 2. P. 889–893.
13. Armstrong J. Peak-To-Average Power Reduction for OFDM by Repeated Clipping and Frequency Domain Filtering // *IEEE Electronics Lett.* 2002. Vol. 38. No. 5. P. 246–247.
14. Yong Soo Cho, Jaekwon Kim Won, Young Yang Chung, G. Kang. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. IEEE Press John Wiley & Sons, 2010. P. 111–135.
15. Малышев Н. Технологии связи LTE. OFDM-сигналы. Снижение пик-фактора (PAPR) OFDM-сигналов [Электронный ресурс]. URL: <http://nikellanjilo.ru/?p=1856> (дата обращения 01.08.2018).
16. Slimane S.B. Reducing the Peak-To-Average Power Ratio of OFDM Signals Through Precoding // *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2007. Vol. 56. No. 2. P. 686–695.
17. Aboul-Dahab M.A., Nagraas E.A., Elhaseeb A.A. PAPR Reduction Based on DFT Precoding for OFDM Signals // *International Journal of Future Computer and Communication*. 2013. Vol. 2. No. 4. P. 325–328.
18. Sivaram A.V., Rao R.S. PAPR Reduction of DHT and WHT-Precoded OFDM System for M-QAM // *ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering*. 2013. Vol. 1. P. 113–117.

References

1. Farhang-Boroujeny B., Moradi H. OFDM Inspired Waveforms for 5G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, Vol. 18, No. 4, pp. 2474–2492.
2. *Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective* / Ed.by Dr. Fei Hu. CRC Press, 2016. 556 p.
3. Schaich F., Wild T., Chen Y. *Waveform Transformation Conferences and Voltage Transition Systems (VTC Spring)*. IEEE 79th. 2014
4. Prokis J. *Digital Communication: Trans. from English* / Ed. D.D. Klovsky. Moscow, Radio and Communications Publ., 2000. 800 p. [in Russian].
5. Sklar B. *Digital Communication. Theoretical Foundations and Practical Application*. Moscow, Izd. Williams House, 2007. 1104 p.
6. Ochiai H., Imai K. On the Distribution of the Average-Power-Ratio in OFDM Signals. *IEEE Trans. Commun.* 2001, Vol. 49, No. 2, pp. 282–289.
7. Slimane S.B. Reducing the Ratio of OFDM Signals through Precoding Patch-to-Average Ratio. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2007, Vol. 56, No. 2, pp. 686–695.

8. Falconer D. Linear Precoding OFDMA Signals to Minimize Their Instantaneous Power Transition. *IEEE Trans. on Commun.*, 2011, Vol. 59, No. 4, pp. 1154–1162.
9. Reine R., Zang Z. Pulse Shaping Approach to PAPR Reduction for Multi-user OFDM Systems. *11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2016, pp. 2076–2080.
10. Ochiai H., Imai K. On Clipping for Peak Power Reduction of OFDM Signals. *IEEE GTC*, 2000, Vol. 2, pp. 731–735.
11. Slimane S.B. Peak-To-Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals Using Pulse Shaping. *IEEE Globecom.*, 2000, Vol. 3, pp. 1412–1416.
12. Slimane S.B. Power-to-Average Ratio Reduction of OFDM Signals Using Broadband Pulse Shaping. *Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf.*, 2002, Vol. 2, pp. 889–893.
13. Armstrong J. Peak-To-Average Power Reduction for OFDM by Repeated Clipping and Frequency Domain Filtering. *IEEE Electronics Lett.*, 2002, Vol. 38, No. 5, pp. 246–247.
14. Yong Soo Cho, Jaekwon Kim Won, Young Yang Chung, G. Kang. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. IEEE Press John Wiley & Sons, 2010, pp. 111–135.
15. Malyshev N. LTE *Communication Technologies. OFDM Signals. Reduction of Peak Factor (PAPR) OFDM Signals* [Electronic Resource]. URL: <http://nikellanjilo.ru/?p=1856> (request date 01.08.2018).
16. Slimane S.B. Reducing the Ratio of OFDM Signals Through Precoding Peak-To-Average. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2007, Vol. 56, No. 2, pp. 686–695.
17. Aboul-Dahab M.A., Hagrass E.A. A.A., Elhaseeb A.A. PAPR Precoding Based on DFT Precoding for OFDM Signals. *International Journal of Future Computer and Communication*, 2013, Vol. 2, No. 4, pp. 325–328.
18. Sivaram A.V., Rao R.S. PAPR Reduction of DHT and WHT-Precoded OFDM System for M-QAM. *ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, 2013, Vol. 1, pp. 113–117.



Киреева Н. А.
Kireeva N. A.

кандидат исторических наук, доцент кафедры
«Общественные дисциплины»,
Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет» в г. Салавате,
г. Салават, Российская Федерация



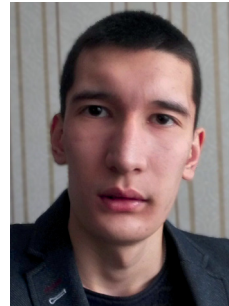
Родионов А. С.
Rodionov A. S.

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Общественные дисциплины»,
Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет» в г. Салавате,
г. Салават, Российская Федерация



Фархутдинов Р. И.
Farkhutdinov R. I.

студент кафедры «Общественные
дисциплины», Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет» в г. Салавате,
г. Салават, Российская Федерация



Хусаинов И. Р.
Khusainov I. R.

студент кафедры «Общественные
дисциплины», Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет» в г. Салавате,
г. Салават, Российская Федерация

УДК 004.89

РАЗРАБОТКА ЧАТ-БОТА ПО ИСТОРИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВУЗЕ

В статье рассматриваются виды чат-ботов, текущее состояние их развития и перспективы использования в области образовательного процесса. Проведен сравнительный анализ чат-ботов, применяемых для изучения различных дисциплин, по результатам которого выяснено, что количество учебных ассистентов для преподавания истории существенно отстаёт от количества чат-ботов по иным дисциплинам, а, следовательно, разработка чат-бота, имитирующего историческую личность, актуальна.

Указывается, что популярность чат-ботов объясняется многими факторами. Ими являются: массовая поддержка среди разработчиков различных социальных сетей и мессенджеров посредством предоставления для использования собственных платформ; стремление пользователей получить удобный интерактивный инструмент для контроля, редактирования и получения требуемой информации; желание пользователей получать информацию в оперативной и конкретной форме; умение чат-ботов выполнять рутинную и повторяющуюся работу.

Выделяются положительные стороны применения чат-ботов в сфере образования. Благодаря разработанному интерактивному инструменту, может уменьшиться нагрузка на преподавательский состав при осуществлении учебного процесса по социально-гуманитар-

ным дисциплинам, например по дисциплине «История». Появится возможность устранить лишние временные отрезки, призванные разложить неувоенный учебный материал по наиболее распространенным пробелам в знаниях среди учащихся. Создается условие повышения уровня усвоения предлагаемого преподавателем материала через беседу с чат-ботом и прохождение обучающимся тестирования. Диалог с разработанным чат-ботом, имитирующим историческую личность, способен погрузить студента в рассматриваемую эпоху. Описанные достоинства создают предпосылку для использования чат-бота в образовательном процессе по дисциплине «История».

Для разработки чат-бота взята платформа VK API от «ВКонтакте». Коммуникационная деятельность проводится через сбор и анализ сообщений, отправленных пользователями. Основу алгоритма составляют приходящие отчеты, запрашиваемые у серверов «ВКонтакте», и отправляемые запросы. В результате отделения полезных данных из отчета чат-бот понимает, какую операцию требуется выполнить. После нахождения подходящего ответа из базы данных чат-бот отправляет собеседнику ответное сообщение.

Ключевые слова: чат-бот, образование, история, автоматизация, мессенджер, учебные материалы, база данных, машинное обучение, тестирование.

DEVELOPMENT OF A CHATBOT ON HISTORY FOR USE IN A TECHNICAL UNIVERSITY

The article deals with the types of chatbots, the current state of their development and the prospects for using them in the field of the educational process. A comparative analysis of chatbots used to study various disciplines was conducted, and it was found that the number of teaching assistants for teaching history lags far behind the amount of chatbots in other disciplines, and, consequently, the development of a chatbot imitating a historical personality, is relevant.

It is pointed out that the popularity of chatbots is explained by many factors. They are: mass support among developers of various social networks and messengers through the provision of their own platforms; the desire of users to obtain a convenient interactive tool for monitoring, editing and obtaining the required information; the desire of users to receive information in an operational and specific form; the ability of chatbots to perform routine and repetitive work.

The positive aspects of using chatbots in the field of education are highlighted. Thanks to the developed interactive tool, the load on the teaching staff in the implementation of the educational process in social and humanitarian disciplines, for example, in the discipline «History», can be reduced. There will be an opportunity to eliminate unnecessary time intervals, designed to decompose the undeveloped educational material on the most common gaps in knowledge among students. A condition is created to increase the level of mastering the material offered by the teacher through chatting with the chatbot and passing the testing to the students. Dialogue with a developed chatbot, imitating a historical personality, is capable of immersing a student in the epoch in question. The described advantages create a prerequisite for using the chatbot in the educational process in the discipline «History».

To develop a chatbot, the platform VK API from VKontakte is taken. Communication activities are conducted through the collection and analysis of messages sent by users. The basis of the algorithm is incoming reports requested from VKontakte servers, and sent requests. As a result of separating the payload from the report, the chatbot understands which operation is required. After finding a suitable answer from the database, the chatbot sends a reply message to the interlocutor.

Key words: chatbot, education, history, automation, messenger, training materials, database, machine learning, testing.

Чат-бот — это программа-собеседник, разрабатываемая на основе технологий машинного обучения и нейросетей с целью имитации человеческого общения. Подобная программа стремится оперативно предоставлять пользователю информацию по поставленному вопросу и отвечать в зависи-

мости от содержания сказанных человеком слов, размера базы данных, функционала. Возможности чат-бота предполагают не только автоматизацию определенных процессов, но и налаживание персонализированного общения с пользователем через мессенджеры [1].

Чат-боты могут решать ряд задач: выполнение стандартных повторяющихся задач, поиск и аккумуляция данных (сбор материалов для последующей аналитики), техническая поддержка.

В настоящее время зарождается рынок чат-ботов для системы образования, который является перспективным. Такое свойство, как машинное обучение, делает чат-ботов многообещающей технологией в области образования [2]. При условии их активного использования база знаний будет увеличиваться, тем самым повышая качество предоставляемой информации. Поскольку в современном мире чат-боты внедряются во многие сферы жизни, не исключена возможность их использования и во всемирных библиотеках в качестве инструмента, извлекающего информацию из огромного количества литературы.

Рассмотрим несколько аналогичных чат-ботов, применяемых для изучения различных дисциплин [3].

AndyRobot — один из самых популярных чат-ботов по английскому языку, который в доступной форме поможет выучить язык с нуля или улучшить его до необходимого уровня. AndyRobot отличается способностью вести «осмысленный», продолжительный разговор на серьезные темы, подбирать для пользователей тесты и игры.

В качестве учебного ассистента по английской фонетике, способного также обучать

произношению слов на 83 языках мира, применяют PronunciationBot.

Рассмотрение чат-бота по грамматике Grammarnazibot показало, что он обладает функцией общения нескольких людей в одном чате. Бот будет указывать на совершенные ошибки и озвучивать их.

Следующий чат-бот специализирован под изучение идиом. TeflBot ежедневно присылает иллюстрации к популярным англоязычным идиомам. Благодаря игровой форме подачи информации, материал имеет повышенную усваиваемость.

Известен чат-бот Japandictbot, специализированный под изучение японского языка. Его особенность в том, что он позволяет не только переводить с транскрипцией, но может писать иероглифами.

К наиболее популярным чат-ботам, используемым в сфере образования, также можно отнести: Ucheba_bot, Mybookbot, Ias16bot, Wikipedia_voice_bot.

Среди чат-ботов, применяемых в сфере образования для изучения исторической тематики, заметно выделяется Ru_history_bot. Однако он имеет недостаток — ограниченность функционала, выраженная в виде выдачи событий на основе конкретной даты. Узкая направленность данного бота представляет собой умение осуществлять деятельность в форме обычной шпаргалки.

Сравним чат-боты, применяемые в сфере образования, по ряду критериев (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение чат-ботов

Название чат-бота	Критерий сравнения			
	Есть функция шпаргалки	Умеет проводить контроль знаний	Умеет вести разговор	Имеет потенциал внедрения в общую образовательную систему
Разрабатываемое программное обеспечение	+	+	+	+
Ru_history_bot	+	-	-	±
AndyRobot	+	+	+	+
PronunciationBot	+	+	-	+
Grammarnazibot	-	+	±	+
TeflBot	-	+	-	-
Japandictbot	+	+	-	±
Ucheba_bot	+	-	-	-
Ias16bot	+	+	-	±
Wikipedia_voice_bot	+	-	-	-
Mybookbot	-	-	-	±

Анализ чат-ботов, применяемых в сфере образования, показал, что в основном они представляют собой учебных консультантов (в виде бота) и используются для изучения иностранного языка.

В настоящее время для изучения дисциплины «История» не имеется достаточного количества учебных ассистентов с широкими функциональными возможностями [4], что делает актуальной разработку чат-бота, имитирующего историческую личность [5].

Виртуальный собеседник позволит: осуществлять быстрый поиск информации по заданным параметрам; составлять объективную картину об историческом событии, явлении, процессе, благодаря применению разных подходов; давать историографиче-

ский обзор исторических фактов; контролировать полученные знания.

В рамках работы чат-бота выбрана платформа «ВКонтакте» [6]. Коммуникационная деятельность осуществляется посредством сбора и анализа сообщений, отправленных подписчиками в сообщество (группу). Основу алгоритма составляют приходящие отчеты, запрашиваемые у серверов «ВКонтакте», и отправляемые запросы. В ходе вычисления полезных данных из отчета чат-бот понимает, какой собеседник ведет с ним разговор, и какую операцию требуется выполнить. После нахождения подходящего ответа из базы данных чат-бот отправляет собеседнику ответное сообщение. Данный алгоритм продемонстрирован на рисунке 1.

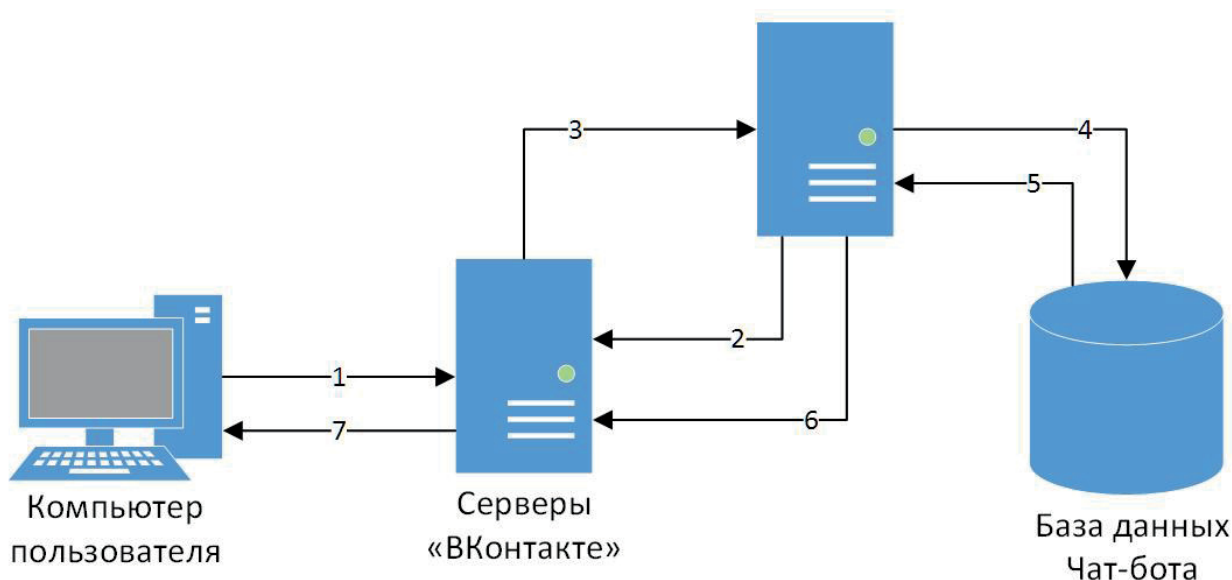


Рисунок 1. Алгоритм работы чат-бота

Алгоритм работы чат-бота состоит из нескольких этапов:

- 1) отправка пользователем сообщения;
- 2) проверка сервером чат-бота на наличие непрочитанных сообщений;
- 3) загрузка информации с серверов «ВКонтакте»;
- 4) обработка полученной информации из отчета и обращение к базе данных чат-бота;
- 5) выгрузка подобранной информации из базы данных;
- 6) обращение к серверам «ВКонтакте», чтобы отправить сообщение для пользователя;

- 7) просмотр пользователем получившегося сообщения.

Нами разработан чат-бот, имитирующий представителя крестьянского сословия, который ведет диалог с обучающимся. Диалоговое общение пользователя с чат-ботом продемонстрировано на рисунке 2.

Диалог с чат-ботом может также сопровождаться тестированием пользователя [7–9]. На рисунке 3 представлен пример прохождения теста, в котором прописаны два вопроса и соответствующие варианты ответов к ним. При выборе правильного ответа пользователю начисляется один балл, в ином случае — ноль.

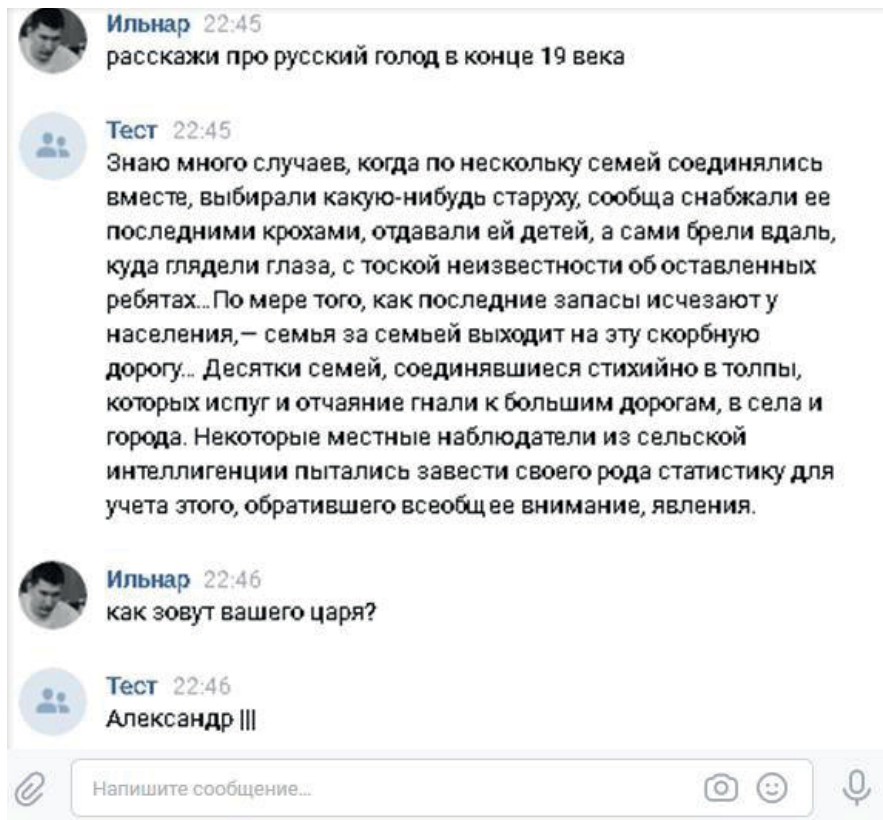


Рисунок 2. Пример общения с чат-ботом

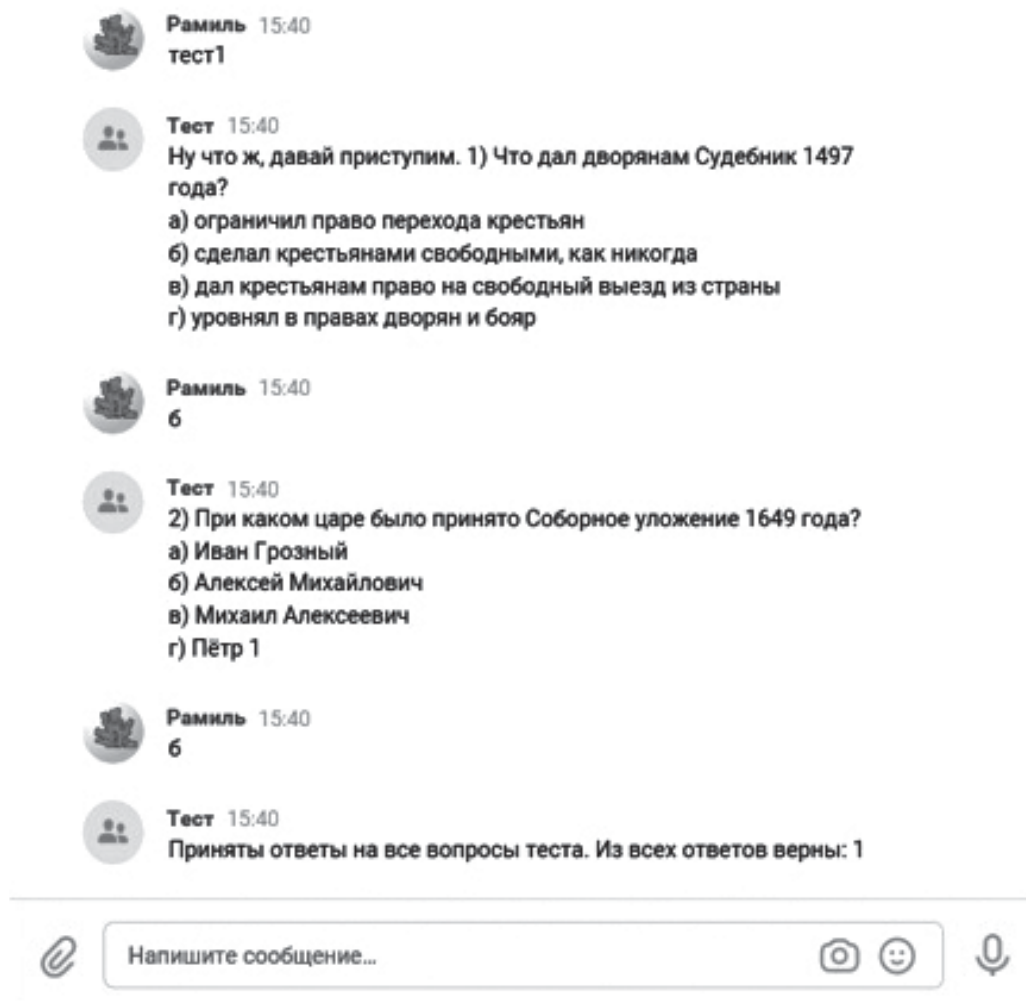


Рисунок 3. Пример тестирования чат-ботом

Вывод

Чат-боты, применяемые в настоящее время в сфере образования, в основном выполняют роль справочной системы, что является лишь малой частью их потенциальных возможностей. Данный факт свидетельствует о необходимости их доработки.

Список литературы

1. Киреева Н.А., Родионов А.С., Фархутдинов Р.И., Хусаинов И.Р. Чат-бот как новое средство интерактивного обучения // Матер. 45-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов: в 2-х т. / отв. ред. В.Ш. Мухаметшин. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. Т. 2. С. 149–150.
2. Ахметова О.В., Левина Т.М., Родионов А.С. Экспертные системы: учебное пособие. Уфа: УГНТУ, 2014. 58 с.
3. 10 образовательных чат-ботов для школьников и взрослых [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ucheba.ru/article/3411> (дата обращения 02.06.2018).
4. Покало Ю.Д., Киреева Н.А. Электронное учебное пособие по дисциплине «История» // Информационные технологии. Проблемы и решения: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. Уфа: Изд-во «Восточная печать», 2015. С. 238–242.
5. Киреева Н.А., Родионов А.С., Фархутдинов Р.И., Хусаинов И.Р. Разработка чат-бота для имитации исторической личности // Информационные технологии. Проблемы и решения. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. Т. 1(5). С. 171–175.
6. Киреева Н.А., Родионов А.С., Фархутдинов Р.И., Хусаинов И.Р. Разработка чат-бота для применения в вузе // Наука. Технология. Производство — 2017. Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств: матер. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. дню Химика и 40-летию кафедры химико-технологич. процессов филиала УГНТУ в г. Салавате / редкол.: Н.Г. Евдокимова и др. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. С. 438–441.
7. Киреева Н.А., Покало Ю.Д. Применение информационных технологий в образовательном процессе // Информационные технологии. Проблемы и решения: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа:

Разработка виртуального собеседника, имитирующего историческую личность или участников исторического процесса, позволит создать у студентов более полное представление об исторических событиях, процессах и явлениях, повысить их заинтересованность в процессе обучения.

Изд-во «Восточная печать», 2014. С. 133–137.

8. Киреева Н.А., Покало Ю.Д. Возможности применения 3D-технологий в образовательном процессе // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля — 2016: матер. Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 60-летию филиала Уфимского гос. нефтяного технического ун-та в г. Салавате. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. С. 43–44.

9. Kireeva N. Technology of Problem Educating is in Process Teaching of History // Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach. 5th Edition. Vol. 2. Humanities and Social Sciences: Research Articles, B&M Publishing, San Francisco, California, 2015. P. 97–99.

References

1. Kireeva, N.A., Rodionov, A.S., Farhutdinov, R.I., Khusainov, I.R. Chatbot as a New Interactive Learning Tool. *Materials of the 45th International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students: in 2 vol.* Ufa: USPTU Publ., 2018, Vol. 2, pp. 149–150. [in Russian].
2. Akhmetova O.V., Levina T.M., Rodionov A.S. *Expert Systems: Tutorial.* Ufa, Publisher USPTU, 2014. 58 p. [in Russian].
3. 10 Educational Chat-Bots for Schoolchildren and Adults [Electronic Resource]. URL: <https://www.ucheba.ru/article/3411> (assessed 02.06.2018). [in Russian].
4. Pokalo Y.D., Kireeva N.A. Electronic Textbooks on the Subject «History». *Materials of International Scientific and Practical Conference «Information Technology. Problems and Solutions».* 2015. Ufa, Vostochnaya pechat' Publ., 2015, Vol. 1, pp. 238-242. [in Russian].
5. Kireeva N.A., Rodionov A.S., Farhutdinov R.I., Khusainov I.R. Development of

Chatbot for Imitation of the Historical Person. *Information Technology. Problems and Solutions*, Ufa, USPTU Publ., 2018, Vol. 1 (5), pp. 171–175. [in Russian].

6. Kireeva N.A., Rodionov A.S., Far-khutdinov R.I., Khusainov I.R. Development of Chatbots for Application in Higher Education. *Materials of International Scientific and Technical Conference «The Science. Technology. Production — 2017. Applied Science as a Tool for the Development of Petrochemical Industries»*, Dedicated to Chemist Day and 40 Anniversary of the Department of Chemical Technology Processes of the Branch of the USPTU in Salavat. Ufa, USPTU Publ., 2017, pp. 438–441. [in Russian].

7. Pokalo Y.D., Kireeva N.A. Application of Information Technologies in Educational Process. *Materials of International Scientific and Practical Conference «Information Technology. Problems and Solutions»*. Ufa, Vostochnaya pechat' Publ., 2014, pp. 133–137. [in Russian].

naya pechat' Publ., 2014, pp. 133–137. [in Russian].

8. Kireeva N.A., Pokalo Y.D. Possibilities of Application of 3d Technologies in the Educational Process. *Materials of International Scientific and Methodical Conference «Integration of Science and Education in Universities of Oil and Gas Industry — 2016»*, Dedicated to the 60th Anniversary of the Branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Salavat. Ufa, USPTU Publ., 2016, pp. 43–44. [in Russian].

9. Kireeva N. *Technology of Problem Educating is in Process Teaching of History. Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach*. 5th Edition. Vol. 2. Humanities and Social Sciences: Research Articles, B&M Publishing, San Francisco, California, 2015, pp. 97–99. [in Russian].



Абдрахманов В. Х.
Abdrakhmanov V. Kh.
кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Инфокоммуникационные
технологии и
наноэлектроника»,
ФГБОУ ВО «Бакирский
государственный
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Важдаев К. В.
Vazhdaev K. V.
кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Водоснабжение
и водоотведение»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
доцент кафедры
«Инфокоммуникационные
технологии и
наноэлектроника»,
ФГБОУ ВО «Бакирский
государственный
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Салихов Р. Б.
Salikhov R. B.
доктор физико-
математических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
«Инфокоммуникационные
технологии и
наноэлектроника»,
ФГБОУ ВО «Бакирский
государственный
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация

УДК 681.518.3

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ STM32 ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В сельском хозяйстве в настоящее время достаточно широко применяются автоматизированные системы и комплексы, позволяющие значительно снизить себестоимость выпускаемой продукции и трудозатраты (птицефабрики, животноводческие фермы и т. д.), но автоматизация в области пчеловодства достаточно мало распространена. По нашему мнению, это в основном связано с тем, что основная масса пчеловодческих хозяйств в нашей стране – небольшие частные пасеки, и пчеловоды обычно отличаются большим консерватизмом во взглядах на методы ведения хозяйства, в большинстве своем это пенсионеры, которые мало знакомы с современными электронными технологиями.

Автоматизация в пчеловодстве помогла бы решить сразу несколько проблем. Рассмотрим основные относительно легко решаемые технические проблемы, в частности диагностику состояния пчелосемей по звукам, издаваемым пчелиным ульем. В летний период можно определить различные этапы в жизни улья: спокойное состояние, вентиляция, пение матки, выход роя, облет пчел и др. Особо важной является возможность распознавать пение матки, выход роя, т.к. в период роения велика вероятность потерь пчел, и пчеловоды в этот период вынуждены постоянно следить за пасекой, не имея возможности куда-то ненадолго отлучиться. Кроме того, многие опытные пчеловоды проводят различные мероприятия для устранения роения (делают так называемые отводки и др.), что может быть довольно трудозатратно. В период зимовки также по звукам можно определить состояние пчелосе-

мы—например, определить ситуации недостатка корма, болезни пчел, нарушение температурного режима в зимовнике, повышенная влажность и др., требующих вмешательства пчеловода. Для мониторинга состояния пчелосемьи кроме звуковых сигналов улья также целесообразно снятие температуры в улье, т.к. повышенная температура при зимовке сигнализирует о беспокойстве пчел. Кроме того, имеет значение влажность в улье—изменение влажности может быть тревожным сигналом.

В статье проведен анализ основных тенденций развития автоматизации в области пчеловодства, в особенности использования современных сетевых технологий, технологий распознавания звука для мониторинга состояния пчелосемей. Рассмотрены основные существующие технологии распознавания, требования к аппаратной части систем мониторинга, а также возможность реализации прототипа на базе платформы Arduino с Wi-Fi-модулями ESP8266, микрофонного модуля, Micro SD-карты необходимой для хранения сэмплов. Рассмотрены возможности распознавания характерных звуков пчелосемьи с помощью алгоритмов искусственных нейронных сетей (neuronet) с предварительным разложением частотного спектра с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (FFT). Рассмотрены достоинства и недостатки такого решения, и в результате сделан вывод о целесообразности использования 32-разрядных микроконтроллеров STM32 с ядром ARM Cortex-M4, а для разработки прототипа устройства — отладочной платы STM32F4DISCOVERY. Также рассмотрены особенности разработки проектов на STM32, выбор программного обеспечения для разработки.

Ключевые слова: мониторинг состояния пчелосемей, алгоритмы искусственных нейронных сетей (нейросеть (neuronet)), алгоритмы быстрого преобразования Фурье (FFT), технологии распознавания речи, Arduino Due, «Интернет вещей» (IoT), ARM Cortex-M4, STM32F4DISCOVERY, STM32Cube, CoCoX IDE.

THE DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR THE DETECTION OF SOUND RANGE INFORMATION SIGNALS USING THE STM32 MICROCONTROLLER TO MONITOR BIOLOGICAL OBJECTS STATE

In agriculture, currently widely used automated systems and complexes that can significantly reduce the cost of production and labor costs (poultry farms, livestock farms, etc.), but automation in the field of beekeeping is quite common. In our opinion, this is mainly due to the fact that the majority of beekeeping farms in our country are small private apiaries, and beekeepers usually have a great conservatism in their views on farming methods, most of them are pensioners who are not familiar with modern electronic technologies.

Automation in beekeeping would solve several problems at once. Let us consider the main relatively easily technically solvable problems. Diagnostics of state of bee colonies on the sounds of the bee hive. In the summer you can define different stages in the life of the hive: a relaxed condition, ventilation, singing of the uterus, the release of swarm, the flight of bees, etc. Particularly important is the ability to recognize the singing of the uterus, the output of the swarm, because in the period of swarming, the probability of the loss of bees and beekeepers in this period are forced to constantly monitor the apiary, not having somewhere to go. Besides, many skilled beekeepers carry out various actions for elimination of swarming (do so-called layering, etc.) that can be quite labor-intensive. During the wintering period, it is also possible to determine the state of the bee family by sounds—for example, to determine the situation of lack of food, bee disease, violation of temperature in the winter hut, high humidity, etc., requiring the intervention of a beekeeper. To monitor the state of the bee family in addition to the beehive beeps, it is also advisable to remove the temperature in the beehive, because the increased temperature during the winter indicates the concern of bees. Humidity in the hive is also important—changing humidity can also be an alarm.

In the article the analysis of main tendencies in the development of automation in the field of beekeeping, in particular the use of modern network technology, the technology of sound recognition to monitor the status of bee colonies. The main existing recognition technologies and requirements to the hardware of monitoring systems are considered. Considered the possibility of implementing a prototype based on the platform Arduino with wifi -ESP8266 modules, microphone

module, Micro SD card required for storage of samples. The possibilities of recognition of the characteristic sounds of the bee family using artificial neural network (neuronet) algorithms with a preliminary decomposition of the frequency spectrum using fast Fourier transform (FFT) algorithms are considered. The advantages and disadvantages of this solution are considered, and as a result, it is concluded that it is advisable to use 32-bit STM32 microcontrollers with ARM Cortex-M4 core, and for the development of a prototype device — the STM32F4DISCOVERY evaluation tool. Also the features of development of projects on STM32, the choice of software for development are considered.

Key words: monitoring the state of bee families, algorithms for artificial neural networks (neuronet), algorithms for fast Fourier transform (FFT), speech recognition technology, Arduino Due, IoT, ARM Cortex-M4, STM32F4DISCOVERY, STM32Cube, CooCox IDE.

1. Обзор существующих решений

Судя по публикациям в сети, можно заметить, что в странах Европы достаточно широко внедряется автоматизация в области пчеловодства. Это обусловлено тем, что пчеловодство развивается в основном не только ради продуктов пчеловодства, но из-за необходимости опыления сельскохозяйственных растений, кроме того, пчелы играют важную роль в поддержании устойчивости всей биосферы. Известны зарубежные разработки систем мониторинга пчелосемей: например, Aris — разработка португальских пчеловодов [1], которая позволяет отслеживать состояние ульев удаленно, прямо со смартфона. Эта система сможет существенно облегчить жизнь как начинающему пчеловоду, так и профессионалу, а главное значительно уменьшить физическое вмешательство в жизнь самих пчел. Система мониторинга Aris стремится сделать из каждого улья «умный улей» со встроенными датчиками температуры и влажности, счетчиком пчел и весами. Все важные статистические данные отправляются на компьютер, смартфон или планшет. Кроме того, в Европейском Союзе завершается разработка прибора дистанционного контроля самочувствия пчел путем мониторинга звуков, издаваемых ими в улье. Инициаторами этого проекта выступили Университет Трента (Великобритания) и Ассоциация фермеров Великобритании (BFA). На реализацию проекта из бюджета ЕС выделено 1,4 млн евро [2].

Известны также отечественные разработки [3], где предлагается наряду с мониторингом, реализовать еще и регулировку температуры и влажности в улье (путем установки электрообогревателя в отверстие нижнего

летка) при зимовке, а также и в весенне-летний период до начала июня (момента, когда устанавливается стабильная теплая погода в средней полосе России), когда наблюдается резкий перепад температур, требующий от пчелосемьи больших энергетических затрат. Основным элементом устройства контроля и диагностики является микроконтроллер фирмы Atmel. К нему подключены цифровые датчики температуры DS1620, влажности HIH4000 и электретный микрофон SG72.

Для диагностики состояния пчелосемей по звукам можно использовать известные и широко применяемые технологии распознавания речи, причем есть два принципиально разных метода распознавания: T2SI (text-to-speaker-independent, «человеко-независимый», говорящим может быть кто угодно) и SD (speaker-dependent, говорить должен тот, кто обучал систему). Очевидно, что в нашем устройстве более подходящим будет более простой в реализации метод SD. Рассматривалась возможность использования бесплатного сервиса распознавания речи от Google серверов типа Google ASR или Яндекс SpeechKit [4], но это требует необходимости постоянного подключения к сети, что для батарейного устройства с Wi-Fi-модулями ESP8266 [5], известными своим большим энергопотреблением, недопустимо. Кроме того, нужно сказать, что в этих программах использован более сложный «человеконезависимый» метод T2SI, тогда как в нашем случае достаточно SD (speaker-dependent). Таким образом, понятно, что сервисы распознавания речи Google ASR или Яндекс SpeechKit не могут быть приспособлены для распознавания звуков пчел, и нужно было бы разработать свой сервис со

своим сервером. Существует возможность отказаться от передачи всех данных на сервер — операционная система для мобильных устройств Android 4.1 это позволяет, т.к. есть система offline, когда распознавания речи, доступа в Интернет не требуется, причем, конечно же, качество распознавания снижается. Но использовать в нашем случае Android-устройство будет избыточно и дорого, а любой избыточности желательно в данном случае избегать, т.к., прежде всего, нужно минимизировать энергопотребление.

Рассматривалась также возможность использования специализированной платы для распознавания речи EasyVR Shield 3.0 [6] (приведена на рисунке 1), но это слишком дорогое решение для пчеловодства (цена 50 евро).

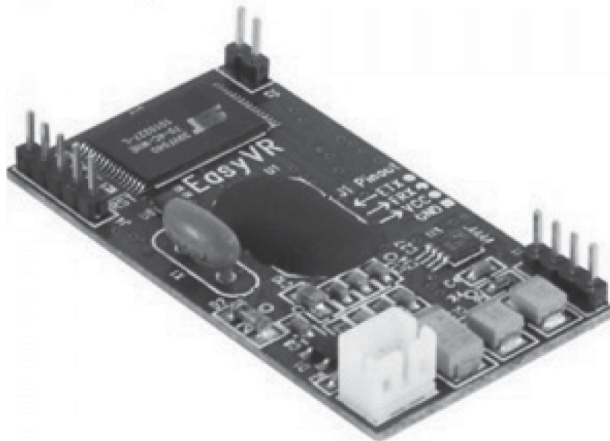


Рисунок 1. EasyVR Shield 3.0

2. Предлагаемые идеи по разработке

После проведенного анализа состояния проблемы можно предложить достаточно бюджетное решение с использованием платформы Arduino, с подключением Wi-Fi-модуля ESP8266 [5], микрофонного модуля [7], Micro SD-карты [8], необходимой для хранения сэмплов (приведены на рисунке 2), цифрового датчика температуры DS18B20. Частота дискретизации для звукового сигнала обычно берется 48 кГц, но для звуков улья достаточно принять полосу частот 70–600 Гц [9], и тогда, очевидно, что требования по полосе пропускания микрофонного модуля невысокие — у используемого в микрофонном модуле [7] электретном конденсаторном микрофоне CZN-15E полоса 20-14000 Гц. Также и частоту дискретизации

сигнала можно уменьшить, что снизит требования к объему памяти и быстродействию контроллера по сравнению с известной задачей распознавания речи, например.

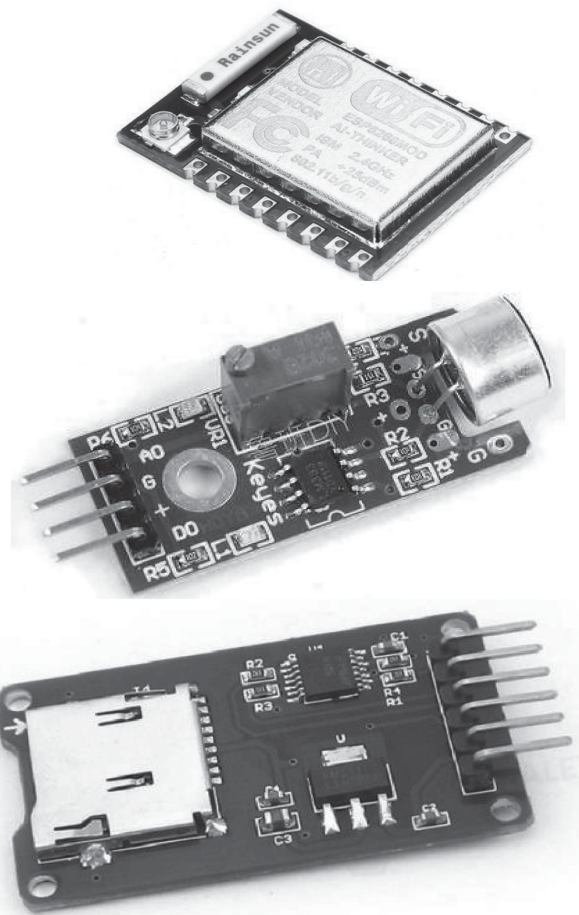


Рисунок 2. Wi-Fi модуль ESP8266-07, микрофонный модуль, SPI-модуль считывателя для micro SD-карты

Таким образом, предлагаем реализовать мониторинг по звукам пчелосемьи и показаниям температуры в улье. Считаем, что реализация регулирования температуры и влажности в весенне-летний период будет слишком трудоемка (необходимо тянуть провода через всю пасеку) для широкого внедрения, а вот возможность определения состояния роя (так называемого пения матки) будет востребована пчеловодами — после роевого периода модули можно будет отключить и вовсе удалить из пасеки. Также считаем излишним и трудоемким контроль веса улья.

Для распознавания предлагается использовать алгоритмы искусственных нейронных сетей (ИНС, нейросеть (neuronet)) [10], причем предварительно провести разложе-

ние частотного спектра, для чего использовать алгоритмы быстрого преобразования Фурье (FFT), имеются например библиотеки 8-битного преобразования [11]. Таким образом, предлагаем реализовать мониторинг по звукам пчелосемьи и показаниям температуры в улье. Предлагается периодически небольшими кусками делать выборки сигнала с микрофонного модуля, оцифровывать с помощью платы Arduino, и только в случае обнаружения изменения состояния пчелосемьи (например зафиксировалось пение матки) включать Wi-Fi-модуль. Это позволит свести к минимуму энергопотребление устройства, что особенно важно ввиду использования автономного питания. Ввиду того, что требуются большие объемы ОЗУ для выборок, высокая скорость обработки, предлагается использовать Arduino Due [12] на базе 32-битного МК ARM Cortex-M3 86МГц, 512K flash + 96K RAM. Клоны Arduino Due от китайских производителей могут стоить относительно недорого — от 15 USD. Использование платформы Arduino обычно обусловлено дешевизной и большим количеством готовых модулей с библиотеками для их подключения. Кроме того, можно легко найти много информации по уже реализованным на этой базе устройствам. Отсутствие аппаратной поддержки для цифровой обработки сигналов, поддержки операций для чисел с плавающей точкой, необходимость большой вычислительной мощности при малом энергопотреблении приводят к решению о целесообразности использования 32-разрядных микроконтроллеров с ядром ARM Cortex-M4.

Появление и широкое распространение достаточно бюджетных 32-разрядных микроконтроллеров STM32 с ядром ARM Cortex-M4, которое отличается встроенными инструкциями для цифровой обработки сигналов Digital Signal Processing (DSP) и блоком операций для чисел с плавающей точкой Floating Point Unit (FPU), позволяют их использовать для нашей разработки. Причем, несмотря на большую вычислительную мощность и скорость работы благодаря особенностям системы тактирования в

микроконтроллерах ARM удается значительно снизить энергопотребление. Особенно удобной для разработки прототипа устройства является плата STM32F4DISCOVERY [13] (приведена на рисунке 2) на базе микроконтроллера STM32F407VGT6 [14] (Cortex M4, 168МГц, flash 1Мб, RAM 192Кб). Конечно, особенно ценно наличие DSP и FPU, что ускорит операции обработки звука, но также важна значительно более высокая тактовая частота, большой объем ОЗУ, а также наличие на плате всенаправленного цифрового микрофона (датчик звука ST MEMS MP45DT02). Кроме того, есть аудио ЦАП с усилителем класса D, которые можно попробовать использовать для воспроизведения предварительно записанных в память сэмплов звуков матки в спокойном состоянии в целях успокоения, при роении например. Таким образом, появляется возможность провести исследования влияния на поведение пчел с помощью стандартных звуков матки, что могло бы остановить роение или замедлить его. Также можно использовать имеющийся на плате датчик движения ST MEMS LIS302DL и выходы цифрового акселерометра по трем осям для регистрации изменения положения улья в пространстве, каких-то вибраций и ударных нагрузок. Это может быть полезно для регистрации падения или наклона улья при столкновении с крупными животными, что может случиться, например, при летней кочевке, а также для регистрации попыток проникновения в улей грызунов, что может происходить зимой при нахождении улья в зимовнике. Также важно, что в контроллере есть модуль контроллера 10/100 Ethernet MAC, что позволит подключаться к глобальной сети Интернет и выводить туда всю текущую информацию — на смартфон пчеловода, например. Это подключение хорошо использовать при работе модуля в зимовнике, а для работы в летних условиях, конечно же, удобнее беспроводное соединение с помощью Wi-Fi-модулей ESP8266 [5], широко используемых в системах «Интернет вещей» (IoT) и «Умный дом» [15–18].

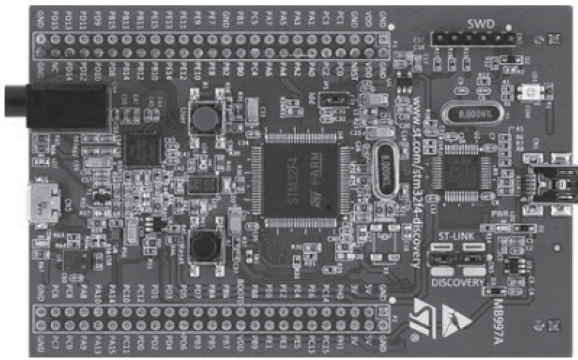


Рисунок 2. STM32F4DISCOVERY

При выборе микроконтроллера для разработки часто руководствуются имеющимся опытом предыдущих разработок на широко распространенных 8-разрядных AVR и PIC или платформе Arduino [19]. При этом, для разработки программного обеспечения начинающим знакомство с семейством STM32 удобно использовать недавно появившуюся программу — генератор кодов инициализации CubeMX [20] от фирмы-изготовителя STMicroelectronics для настройки (инициализации) ядра и периферии, подключения библиотек, генерации пустого проекта. После генерации проекта можно перенести его в удобную среду разработки CoCo IDE [21]. Таким образом, можно относительно легко ознакомиться и начать работать с STM32.

Список литературы

1. Apis—система мониторинга здоровья и активности ваших пчел. [Online]. Available at: <http://rodovid.me/pchelovodstvo/apis-sistema-monitoringa-zdorovya-i-aktivnosti-vashih-pchel.html>.
2. Контроль самочувствия пчел на расстоянии!? Это уже грядет! [Online]. Available at: <http://bashkirskimed.ru/medovi-spravochnik/428-kontrol-samochuvstviya-pchel-narasstoyanii-eto-uzhe-gryadet.html>.
3. Семенов В.В., Ганеев А.Р. Автоматический мониторинг и управление состоянием семьи // Пчеловодство. 2011. № 9. С. 50.
4. Речевые технологии SpeechKit: распознавание речи и синтез речи. [Online]. Available at: <https://tech.yandex.ru/speechkit>.
5. ESP8266 Module WIFI for Arduino. [Online]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/ESP8266-Receive-AP-STA-Hot-Wireless-Send-Transceiver-Module-WIFI-For-Arduino>.

Выводы

Выполнен анализ основных тенденций развития автоматизации в области пчеловодства, в особенности использования современных сетевых технологий, технологий распознавания звука для мониторинга состояния пчелосемей.

Рассмотрены основные существующие технологии распознавания, требования к аппаратной части систем мониторинга, а также возможность реализации прототипа на базе платформы Arduino с Wi-Fi-модулями ESP8266, микрофонного модуля, Micro SD-карты, необходимой для хранения сэмплов.

Рассмотрены возможности распознавания характерных звуков пчелосемьи с помощью алгоритмов искусственных нейронных сетей с предварительным разложением частотного спектра с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

Обоснован вывод о целесообразности использования 32-разрядных микроконтроллеров STM32 с ядром ARM Cortex-M4, а для разработки прототипа устройства — отладочной платы STM32F4DISCOVERY. Представлены особенности разработки проектов на STM32 и выбор программного обеспечения для разработки.

6. EasyVR Shield 3.0 per Arduino Modulo Riconoscimento Vocale — Speech Recognition. URL:http://www.ebay.com/itm/EasyVR-Shield-3-0-per-Arduino-Modulo-Riconoscimento-Vocale-Speech-recognition-/121925584067?_ul=RU.
7. Microphone Sensor AVR PIC High Sensitivity Sound Detection Module for Arduino. [Online]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/201414878181>.
8. Micro SD Storage Board. [Online]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/Micro-SD-Storage-Board-Micro-SD-TF-Card-Memory-Shield-Module-SPI-For-Arduino-UR>.
9. Звуки пчёл. [Online]. Available at: <http://ep-z.ru/stroitelstvo/paseka/zvuki-pchyo1>.
10. Искусственные нейронные сети. [Online]. Available at: <http://robocraft.ru/blog/algorithm/558.html>.

11. Modified 8bit FFT. [Online]. Available at: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=38153.msg282965#msg282965>.

12. Arduino Due. [Online]. Available at: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>.

13. STM32F407VG. High-Performance Foundation Line, ARM Cortex-M4 Core with DSP and FPU, 1 Mbyte Flash, 168 MHz CPU, ART Accelerator, Ethernet, FSMC. [Online]. Available at: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f407vg.html>.

14. STM32F4DISCOVERY. [Online]. Available at: <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>.

15. Абдрахманов В.Х., Важдаев К.В., Салихов Р.Б. Разработка средств автоматизации с использованием WI-FI-модулей ESP8266 и LPWAN-технологий // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2017. Т. 13. № 4. С. 98–108.

16. Salikhov R.B., Abdrakhmanov V.K., Vazhdaev K.V. System of Monitoring and Remote Control of Temperature Conditions, Climate and Heat Consumption // *Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 13th International Scientific-Technical Conference. 2016. Vol. 3. P. 171–174.

17. Важдаев К.В., Абдрахманов В.Х., Салихов Р.Б. Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2016. № 2. Т. 12. С. 70–75.

18. Абдрахманов В.Х., Важдаев К.В., Салихов Р.Б. Исследование возможности применения информационно-измерительных технологий и интернета вещей в агропромышленном комплексе // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2017. Т. 13. № 2. С. 85-95.

19. Abdrakhmanov V.K., Bikbaev N.N., Salikhov R.B. Development of Low-Cost Electronic Training Boards Based on Universal Microcontroller // *Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 13th International Scientific-Technical Conference. 2016. Vol. 3. P. 319–325).

20. STM32 Cube Initialization Code Generator. URL: <http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>.

21. CooCox IDE. Free/Open ARM Cortex-M Development Tool-Chain. [Online]. Available at: <http://www.coocox.org>.

References

1. *Apis — a System for Monitoring the Health and Activity of Your Bees*. [Online]. Available at: <http://rodovid.me/pchelovodstvo/apis-sistema-monitoringa-zdorovya-i-aktivnosti-vashih-pchel.html>. [in Russian].

2. *Control the Bees Health State at a Distance!? It is Already Coming!* [Online]. Available at: <http://bashkirskimed.ru/medovispravochnik/428-kontrol-samochuvstviya-pchel-na-rasstoyanii-eto-uzhe-gryadet.html>. [in Russian].

3. Semenov V.V., Ganeev A.R. Automatic Monitoring and Management of Family Health. *Beekeeping*, 2011, No. 9, pp. 50. [in Russian].

4. *SpeechKit Speech Technology: Speech Recognition and Speech Synthesis*. [Online]. Available at: <https://tech.yandex.ru/speechkit/>. [in Russian].

5. *ESP8266 Module WIFI for Arduino*. [Online]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/ESP8266-Receive-AP-STA-Hot-Wireless-Send-Transceiver-Module-WIFI-For-Arduino>.

6. *EasyVR Shield 3.0 per Arduino Modulo Riconoscimento Vocale — Speech Recognition*. URL: http://www.ebay.com/itm/EasyVR-Shield-3-0-per-Arduino-Modulo-Riconoscimento-Vocale-Speech-recognition-/121925584067?_UI=RU.

7. *Microphone Sensor AVR PIC High Sensitivity Sound Detection Module for Arduino*. [Online]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/201414878181>.

8. *Micro SD Storage Board*. [Online]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/Micro-SD-Storage-Board-Micro-SD-TF-Card-Memory-Shield-Module-SPI-For-Arduino-UR>.

9. *Sounds of Bees*. [Online]. Available at: <http://ep-z.ru/stroitelstvo/paseka/zvuki-pchylol>. [in Russian].

10. *Artificial Neural Networks*. [Online]. Available at: <http://robocraft.ru/blog/algorithm/558.html>. [in Russian].

11. *Modified 8bit FFT*. [Online]. Available at: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=38153.msg282965#msg282965>.

12. *Arduino Due*. [Online]. Available at: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>.
13. *STM32F407VG. High-Performance Foundation Line, ARM Cortex-M4 Core with DSP and FPU, 1 Mbyte Flash, 168 MHz CPU, ART Accelerator, Ethernet, FSMC*. [Online]. Available at: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f407vg.html>.
14. *STM32F4DISCOVERY*. [Online]. Available at: <http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>.
15. Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B. Development of Automation Facilities using Wi-Fi Modules Esp8266 and Lpwan Technologies. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 4, pp. 98–108. [in Russian].
16. Salikhov R.B., Abdrakhmanov V.K., Vazhdaev K.V. System of Monitoring and Remote Control of Temperature Conditions, Climate and Heat Consumption. *Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 13th International Scientific-Technical Conference*. 2016, Vol. 3, pp. 171–174. [in Russian].
17. Vazhdaev K.V., Abdrakhmanov V.Kh., Salikhov R.B. Intellectual System of Residential Areas Based on Information-Measuring Control Systems. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2016, No. 2, Vol. 12, pp. 70–75. [in Russian].
18. Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B. Study of the Possibility of Application of Information-Measuring Technologies and the Internet of Things in the Agro-Industrial Complex. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, Vol. 13, No. 2, pp. 85–95. [in Russian].
19. Abdrakhmanov V.K., Bikbaev N.N., Salikhov R.B. Development of Low-Cost Electronic Training on Electronic Microcontroller. *Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 13th International Scientific-Technical Conference*. 2016, Vol. 3, pp. 319–325. [in Russian].
20. *STM32 Cube Initialization Code Generator*. URL: <http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>.
21. *CooCox IDE. Free / Open ARM Cortex-M Development Tool-Chain*. [Online]. Available at: <http://www.coocox.org>.



Ефанов В. Н.
Efanov V. N.

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



Саянова Л. Р.
Sayarova L. R

*аспирант кафедры «Электроника
и биомедицинские технологии»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 681.5

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В статье рассмотрены вопросы исследования метрологических характеристик информационно-измерительной системы позиционирования транспортных средств. Проведен анализ основных источников ошибок, влияющих на точность навигационных вычислений, к которым относятся погрешности эфемеридного и частотно-временного обеспечения навигационных космических аппаратов, погрешности измерений, вызываемые атмосферой Земли, и погрешности, вносимые аппаратно-программным комплексом потребителя. Рассмотрены основные способы повышения точности позиционирования, которые предусматривают использование избыточных навигационных измерений и различных способов дифференциальной навигации. Для оценки эффективности рассмотренных способов повышения точности позиционирования предложено использовать специально разработанный программный модуль «Спутник». Программный модуль «Спутник» моделирует радионавигационное поле орбитальной группировки ГЛОНАСС, включающей в себя три сегмента: космический сегмент; сегмент управления — наземный комплекс управления (НКУ) орбитальной группировкой навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ); сегмент НАП — аппаратуры пользователей. С помощью этого программного модуля были смоделированы три сценария работы системы позиционирования транспортных средств: на основе концепции «все в небе», с использованием дифференциальных поправок, поступающих от опорной станции спутниковой навигационной системы (СНС), и с использованием наземной инфраструктуры на основе «псевдоспутников». Сделано заключение о преимуществе способа позиционирования, основанного на использовании локального радионавигационного поля. Приведены рекомендации, позволяющие использовать в качестве псевдоспутников базовые станции сотовой связи, что позволит оптимизировать работу системы локальной навигации и улучшить зону её покрытия.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система, информационно-измерительная система, глобальная навигационная спутниковая система, метрологические характеристики, погрешность измерения.

INFORMATION AND MEASURING SYSTEM METROLOGICAL CHARACTERISTICS RESEARCH FOR VEHICLES POSITIONING

The article deals with the study of the metrological characteristics of the information-measuring system of vehicle positioning. The analysis of the main sources of errors affecting the accu-

racy of navigation calculations, which include errors of the ephemeris and time-frequency support of navigation spacecraft, measurement errors caused by the Earth's atmosphere, and errors introduced by the consumer's hardware-software complex. The main ways of improving the accuracy of positioning, which include the use of redundant navigation measurements and various methods of differential navigation, are considered. To assess the effectiveness of the considered methods for improving the accuracy of positioning, it was proposed to use a specially developed software module «Sputnik». The software module «Sputnik» models the radionavigation field of the GLONASS orbital grouping, which includes three segments: the space segment; the control segment is the ground control complex of the orbital grouping of navigation artificial earth satellites; NAP segment — user equipment. Using this software module, three scenarios of the vehicle positioning system were modeled: based on the «all in the sky» concept, using differential corrections from the satellite navigation system reference station and using ground infrastructure based on «pseudosatellites». The conclusion was made about the advantage of the positioning method based on the use of a local radio navigation field. Recommendations are given that make it possible to use cellular base stations as pseudo-satellites, which will optimize the operation of the local navigation system and improve its coverage area.

Key words: intelligent transport system, information measuring system, global navigation satellite system, metrological characteristics, measurement error.

В целях повышения эффективности управления движением транспорта, уровня безопасности перевозок пассажиров, специальных и опасных грузов в РФ разрабатывается интеллектуальная транспортная система (ИТС), предназначенная для муниципальных и государственных заказчиков, основными задачами которой являются мониторинг и диспетчеризация транспорта различного назначения в масштабах регионов (субъектов Федерации) и муниципальных образований [1–4]. Учитывая важную роль, которую играют интеллектуальные транспортные системы в социально-экономическом развитии ведущих мировых государств, в настоящее время созданы и действуют следующие Международные ассоциации ИТС:

ITS-Europe (ERTICO) — создана в рамках «Концепции интеллектуальной мобильности», принятой Европейским Союзом в 2006 г.;

ITS-America — программа национальной интеллектуальной транспортной системы США принята в 2002 г.;

ITS-Japan — стратегия развития ИТС в Японии, в которой декларируются следующие цели: нулевые потери на дорогах, нулевые задержки на дорогах, нулевые неудобства, была разработана в 2003 г.;

ITS-China — в 2007 г. принята «Стратегия развития ИТС Китая».

В России формирование единой национальной платформы развития рынка ИТС

осуществляется в рамках общественной организации — Некоммерческого партнерства «Интеллектуальные транспортные системы — Россия» (НП «ИТС-Россия»), которое объявило своей миссией объединение профессионального сообщества для поддержки политики и содействия усилиям Правительства в формировании и продвижении в РФ интеллектуальных транспортных систем [5–8].

Однако создание подобных систем требует решения ряда сложных научных проблем, среди которых можно выделить научное обоснование требований к метрологическим характеристикам информационно-измерительной системы позиционирования транспортных средств.

В настоящее время разработка программно-аппаратных средств информационно-измерительных и управляющих комплексов для ИТС ориентируется на использование систем спутниковой навигации, к которым относятся российская глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС и система глобального позиционирования (GPS) Navstar (США) [9, 10]. Кроме того, активно разворачиваются орбитальные группировки европейской системы Galileo и китайской навигационной спутниковой системы Compass. Спутниковые навигационные системы (СНС) определяют и выдают водителю текущие координаты

автомобиля на карте местности, выбирают оптимальный маршрут к заданной цели, помогают водителю следовать этим маршрутом.

Однако несмотря на свои очевидные преимущества, СНС не всегда обеспечивают требуемую точность позиционирования, а в ряде случаев могут оказаться неработоспособными. Основными источниками ошибок, влияющих на точность навигационных вычислений, являются следующие погрешности [11, 12]:

- погрешности эфемеридного и частотно-временного обеспечения навигационных космических аппаратов, в том числе ошибки вычисления орбит, геометрическое расположение спутников;

- погрешности измерений, вызываемые атмосферой Земли, такие как многолучевость распространения сигнала, ионосферные задержки сигнала, тропосферные задержки сигнала;

- погрешности, вносимые аппаратно-программным комплексом потребителя, — инструментальные ошибки приемника.

Используемый в СНС беззапросный квазидальномерный способ измерения накладывает жесткие требования к точности поддержания шкал времени различных космических аппаратов. Несмотря на использование самых современных эталонов частот погрешность, связанная со шкалами времени, может достигать 0,6 м. Геометрия взаимного расположения спутников в рабочем созвездии и положение транспортного средства относительно спутников также вносят значительный вклад в суммарную ошибку позиционирования. Для оценки геометрического фактора используется специальная величина — PDOP (Position Dilution Of Precision). Установлено, что величина PDOP обратно пропорциональна объему пространственной фигуры, вершинами которой служат навигационные спутники и транспортное средство. Таким образом, чем хуже геометрия созвездия спутников, тем больше будет величина PDOP и, следовательно, тем больше величина суммарной ошибки. Приемлемым считается значение PDOP в пределах от 4 до 6.

Специфическая погрешность спутниковых систем заключается в многолучевом распространении сигнала. Навигационные сигналы спутника, отраженные от поверхности земли или других поверхностей, могут накладываться на сигналы, поступающие непосредственно от спутника. Поскольку поляризация отраженного сигнала имеет противоположную фазу, то вследствие эффекта интерференции происходит взаимное подавление полезного и отраженного сигналов. Величина возникающей при этом ошибки зависит от конкретных условий отражения навигационного сигнала, но в среднем она может составлять около 2 м.

При оценке атмосферных погрешностей нужно различать две характерные области, имеющие разную природу воздействия на навигационный сигнал. Этими областями являются ионосфера и тропосфера. Задержка сигнала в ионосфере обусловлена ионизацией атмосферы на высотах в пределах 50–500 км. Наличие свободных электронов приводит к изменению коэффициента преломления и к изменению скорости распространения сигнала спутника. При этом задержка сигнала зависит от концентрации электронов и от частоты радиосигнала. Несмотря на то, что имеющиеся модели распределения заряженных частиц в ионосфере позволяют значительно уменьшить ионосферные погрешности, величина остаточной погрешности приводит к ошибке определения псевдодальности до 10 м. Тропосферные погрешности обусловлены тем, что тропосфера является самым нижним, а, следовательно, и самым загрязненным слоем атмосферы. При этом тропосферные ошибки измерения псевдодальностей составляют около 1 м.

Погрешность, возникающая в аппаратуре потребителя из-за низкого уровня навигационных сигналов, обусловлена тем, что соотношение уровней сигнал/шум приемника оказывает существенное влияние на результат вычисления псевдодальности. Эта ошибка может достигать 1,2 м. Кроме того, необходимо учесть влияние возможных источников непреднамеренных искусственных помех, таких как передача цифровых

данных (пакетное радио), сигналы спутников связи Iridium, Globalstar, любительские и служебные радиорелейные станции, УКВ радиопередатчики, которые не только влияют на точность позиционирования, но и могут нарушить целостность навигационных измерений [13].

При этом необходимо иметь в виду, что описанные источники погрешностей оказывают наибольшее влияние в приземном пространстве. Так, тропосферная рефракция зависит от плотности и неоднородности атмосферы, которые максимальны у поверхности Земли. Что касается погрешности из-за многолучевого распространения сигнала, то в случае, когда отражающая поверхность (земля, стены зданий) находится в непосредственной близости от приемника, мощность отраженного радиосигнала на входе приемника будет сопоставима с мощностью прямого радиосигнала. Возникающие при этом погрешности не поддаются прогнозированию и могут существенно влиять на точность измерений.

В связи с этим возникает задача улучшения метрологических характеристик информационно-измерительной системы позиционирования транспортных средств, обеспечивающих гарантированную целостность навигационных определений и их высокую точность.

Наиболее очевидным способом улучшения метрологических характеристик является выбор оптимальной конфигурации созвездия навигационных спутников, для которой влияние всей совокупности погрешностей измерения на точность вычисления координат объекта оказывается минимальным. Однако поиск такого оптимального созвездия требует чрезвычайно больших временных затрат, поскольку существует несколько десятков тысяч возможных комбинаций. В то же время максимальная продолжительность первого сеанса навигации в многоканальном GPS-приемнике определяется длительностью выполнения следующих операций: поиск и входение в синхронизм слежения за псевдослучайной последовательностью — 5 с; поиск и входение в синхронизм слежения за несущим колебанием

— 2 с; выделение меандра — 1 с; ожидание метки времени — 2 с; выделение цифровой информации — 30 с; итого 40 с. Если же в сеансе навигации проводится обновление альманаха (2,5 мин), то продолжительность каждого сеанса превысит 3 мин.

В связи с этим часто предлагается использовать концепцию «все в небе», т.е. использовать все спутники, находящиеся в зоне радиовидимости потребителя. В этом случае результирующая погрешность, конечно, может оказаться хуже, чем в случае использования оптимального созвездия спутников, но заведомо лучше, чем в случайно выбранной неоптимальной конфигурации. Основная проблема, возникающая при реализации данного подхода, связана с обеспечением совместности переопределенной системы уравнений, составленной относительно искомым координат транспортного средства.

Еще один способ улучшения метрологических характеристик информационно-измерительной системы позиционирования транспортных средств заключается в использовании дифференциального режима навигационных измерений [14]. В основе метода дифференциальной навигации лежит относительное постоянство значительной части погрешностей СНС во времени и в пространстве, что позволяет их компенсировать с помощью специальных поправок, поступающих от контрольно-корректирующих станций СНС или от специальных наземных псевдоспутников [15, 16]. Псевдоспутниками называют наземные станции, образующие локальную радионавигационную систему, которые излучают сигнал, схожий по параметрам с сигналом ГЛОНАСС. За счет геометрически оптимального размещения псевдоспутников, повышенной мощности сигнала, многократно повышающей устойчивость к непреднамеренным искусственным помехам точность позиционирования повышается вплоть до 5–10 см. Однако реализация такого подхода требует значительных затрат на организацию локального радионавигационного поля [17].

В связи с этим возникает задача обоснования наиболее целесообразного способа улучшения метрологических характеристик

информационно-измерительной системы позиционирования транспортных средств.

С этой целью предлагается методика оценки метрологических характеристик информационно-измерительных систем позиционирования транспортных средств, в которой для повышения точности навигационных определений используются избыточные навигационные измерения и различные способы дифференциальной навигации.

Методика исследования базируется на специально разработанном программном модуле «Спутник», который реализует имитационную модель глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС [18]. Программный модуль «Спутник» моделирует радионавигационное поле орбитальной группировки ГЛОНАСС, включающей в себя три сегмента: космический сегмент; сегмент управления — наземный комплекс управления (НКУ) орбитальной группировкой навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ); сегмент НАП — аппаратуры пользователей. В связи с этим имитационная модель системы ГЛОНАСС состоит из моделей ее сегментов и модели случайных факторов, влияющих на погрешность измерений, включая геометрические факторы, факторы распространения радиоволн в атмосфере, факторы, обусловленные качеством навигационных сигналов и несовершенством аппаратуры потребителя.

Помимо моделирования основной функции ГНСС — глобальной оперативной навигации приземных подвижных объектов программный модуль «Спутник» позволяет моделировать локальную высокоточную навигацию наземных подвижных объектов на основе дифференциальных методов навигации с применением стационарных наземных корректирующих станций, а также навигацию на основе наземной инфраструктуры в виде локальных радионавигационных полей.

Имитационная модель воспроизводит процесс приема сигналов ГЛОНАСС аппаратурой пользователей, их обработки, измерения и определения радионавигационных параметров (псевдодальность и приращение псевдодальности или псевдоскорость), вычисления геоцентрических координат транспортного средства и на их основе — геодезических координат в системе координат ПЗ-90.

Пользовательский интерфейс программного модуля «Спутник» обеспечивает дружественное взаимодействие с его программными средствами, которое организуется следующими инструментами: контекстным меню, универсальной панелью инструментов и «актуальными» клавишами, которые обеспечивают простой и оперативный доступ к данным.

На рисунке 1 показано главное окно имитационной модели, которое содержит панель инструментов.

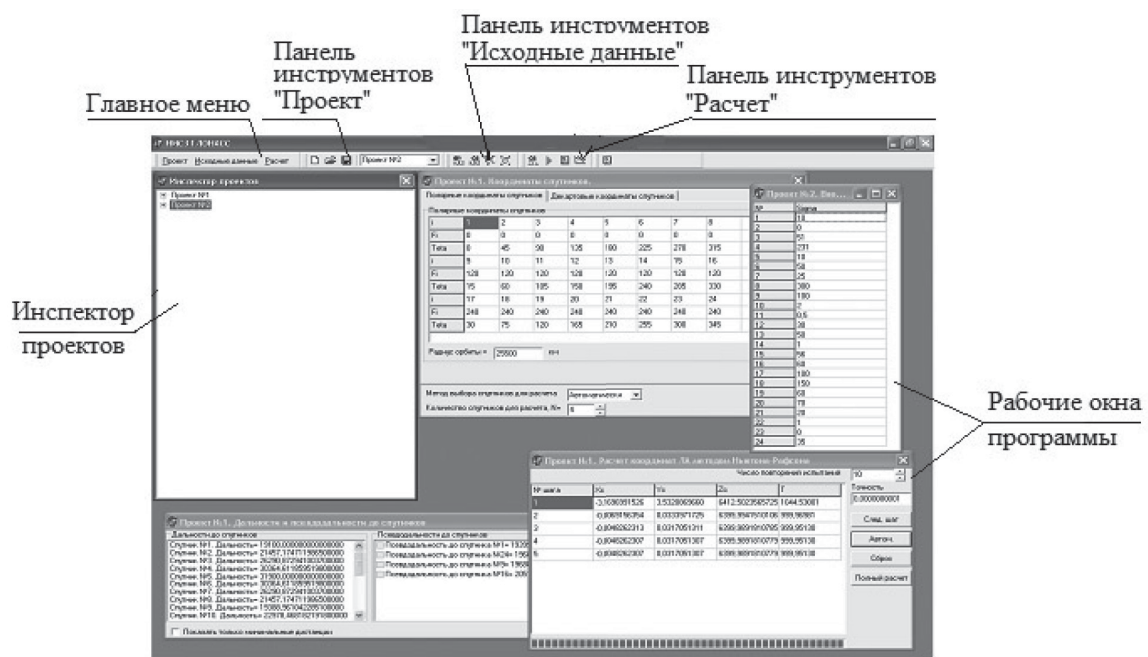


Рисунок 1. Главное окно программного модуля

В свою очередь, панель инструментов включает несколько функциональных панелей. Каждому пункту главного меню программы соответствует своя функциональная клавиша. Совокупность этих клавиш обеспечивает быстрый доступ к наиболее часто используемым командам главного меню.

Функциональная панель «Проект» используется для ускорения работы с файлами проектов. Ее клавиши выполняют следующие операции:

- создание нового проекта с данными о космическом сегменте системы;
- считывание исходных и расчетных (если расчет производился) данных из файла;
- сохранение выбранной группы данных в файл;
- выбор проекта из списка созданных или открытых проектов для работы с ним.

Функциональная панель «Исходные данные» обеспечивает доступ и редактирование данных навигационной задачи, включая координаты спутников, транспортного средства, начальные значения координат и допустимые погрешности расчетов.

Функциональная панель «Расчет» обеспечивает доступ к данным, получаемым в ходе расчета:

- вывод рассчитанных дальностей и псевдодальностей до спутников;
- вывод результатов расчета навигационных параметров методом Ньютона-Рафсона;
- вывод рассчитанных данных по всем проведенным экспериментам;
- графическое представление статистического отчета.

Поле программного модуля «Инспектор проектов» обеспечивает быстрый доступ к заданным группам данных. В каждом проекте, включенном в это окно, содержится описание исходных данных, которые используются при решении соответствующей навигационной задачи. К числу этих данных относятся: местоположение спутников в геоцентрической системе координат; аналогичная информация о транспортном средстве; начальное приближение, используемое при решении навигационной задачи с использованием метода Ньютона-Рафсона; требуемая

точность решения, заданная в виде среднеквадратического отклонения. Чтобы просматривать и редактировать перечисленные данные, им выделено соответствующее диалоговое окно.

При решении навигационной задачи программный модуль выполняет следующие действия:

- рассчитывает действительные дальности до НИСЗ, а также псевдодальности с учетом временного сдвига шкал времени НИСЗ и потребителей;
- находит координаты транспортного средства с использованием метода Ньютона-Рафсона;
- формирует отчет об проделанных вычислениях в форме статистического ряда и его графического представления.

Ход выполнения сценария решения навигационной задачи отображается в диалоговых окнах.

Для имитации погрешностей, возникающих при оценке дальностей до спутников, на точные значения этих дальностей накладываются заданные среднеквадратические отклонения, величина которых зависит от геометрического фактора, ионосферных и тропосферных задержек при прохождении сигналов от спутников, а также от используемого способа решения навигационной задачи, в частности с учетом дифференциальных поправок, данных, полученных от наземной инфраструктуры, и т.д.

Поскольку результаты каждого решения навигационной задачи имеют случайный характер, то в предлагаемой имитационной модели, наряду с однократным расчетом координат транспортного средства, предусматривается и многократное решение этой задачи. Такое решение позволяет провести статистический анализ полученных данных с целью более объективной оценки используемых методов позиционирования.

В связи с этим в диалоговых окнах, предназначенных для отображения результатов расчета координат транспортных средств, используются две конфигурации. Первая соответствует однократному расчету и содержит полный отчет о ходе вычислительного процесса. В случае многократного повторе-

ния экспериментов в рабочем окне указывается также количество экспериментов и требование по точности найденного решения, которая оценивается по характеру изменения скорости сходимости к искомому оптимуму.

После выполнения заданного числа экспериментов автоматически осуществляется статистическая обработка их результатов и графическое представление последних (рисунок 2).

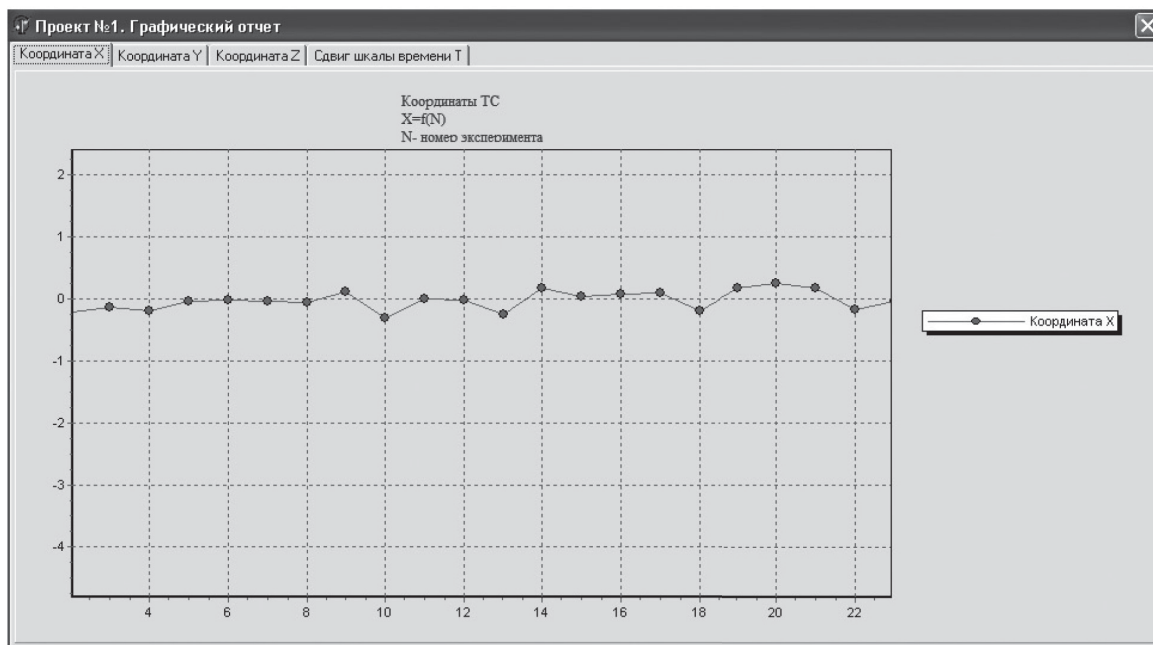


Рисунок 2. Диалоговое окно с графическим отчетом о многократном эксперименте

Для оценки метрологических характеристик информационно-измерительных систем позиционирования транспортных средств, использующих различные механизмы повышения точности навигационных определений, были рассмотрены три характерных сценария.

Первый сценарий направлен на выяснение возможностей практического использования концепции «все в небе». Данная концепция ориентируется только на возможности орбитальной группировки, без использования наземных средств. При этом увеличение числа спутников заведомо приводит к увеличению погрешности из-за неоптимальной геометрии созвездия. Кроме того, приближенный характер решения переопределенной системы алгебраических уравнений относительно искомых координат транспортного средства создает предпосылки для снижения точности позиционирования по мере увеличения размерности задачи. Целью экспериментов, проведенных в этом сценарии, было изучение зависимости точности позиционирования транспортного средства от

количества задействованных спутников. В таблице 1 приведены обобщенные результаты статистических испытаний в виде выборочных средних значений рассчитанных координат транспортного средства и сдвига временной шкалы, а также выборочные среднеквадратические отклонения этих величин соответственно для 4, 8 и 12 спутников.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что принцип позиционирования «все в небе» не во всех случаях обеспечивает высокую точность определения навигационных параметров.

Для оценки эффективности методик повышения точности навигационных определений с использованием дифференциальной навигации были рассмотрены следующие два сценария.

Вначале была проведена оценка метрологических характеристик информационно-измерительных систем с учетом дифференциальных поправок, которые могут передаваться потребителю в формате GPRS/EDGE сообщений от опорных станций. Использование дифференциальных

Таблица 1. Обобщенные результаты статистических испытаний

	X	Y	Z	T
4 НИСЗ				
Средн. знач.	0,10124	-0,04272	6410,22308	1000,69165
СКО	2,76843	1,68975	5,38383	16,88592
8 НИСЗ				
Средн. знач.	-0,44591	-0,15772	6410,35474	1000,94195
СКО	3,09731	1,50084	7,03023	22,41856
12 НИСЗ				
Средн. знач.	0,53010	0,55180	6409,50539	998,49835
СКО	3,65398	1,83876	6,77064	21,58170

поправок позволяет скомпенсировать большинство ионосферных и тропосферных погрешностей при передаче навигационных сообщений, поскольку из-за относительной близости расположения транспортного средства к опорной станции навигационный сигнал претерпевает аналогичные искаже-

ния. Результаты статистических испытаний для этого сценария сведены в таблице 2.

Третий сценарий предусматривает использование наземной инфраструктуры в виде локальных радионавигационных полей, в состав которых входят «псевдоспутники». Результаты моделирования приведены в таблице 3.

Таблица 2. Результаты статистических испытаний для второго сценария

	X	Y	Z	T
4 НИСЗ				
Средн. знач.	0,01765	-0,00162	6410,03091	1000,09838
СКО	0,13689	0,06267	0,27666	0,87173
8 НИСЗ				
Средн. знач.	-0,02106	-0,01732	6409,98878	999,96507
СКО	0,15794	0,09223	0,26979	0,83705
12 НИСЗ				
Средн. знач.	-0,01209	-0,01845	6410,04154	1000,13139
СКО	0,19936	0,09298	0,38640	1,23462

Таблица 3. Результаты моделирования для третьего сценария

	X	Y	Z	T
4 НИСЗ				
Средн. знач.	0,00282	0,00015	6410,00458	1000,01538
СКО	0,01585	0,00479	0,03017	0,10012
8 НИСЗ				
Средн. знач.	0,00102	0,00016	6410,00152	1000,00511
СКО	0,01818	0,00851	0,02455	0,08179
12 НИСЗ				
Средн. знач.	0,00026	-0,00036	6409,99846	999,99477
СКО	0,00477	0,00291	0,01250	0,04115

Согласно полученным данным, точность позиционирования повышается на порядок при использовании дифференциальных поправок и на два порядка — при использовании локального радионавигационного поля.

Что касается влияния числа спутников в используемом созвездии на точность позиционирования, то дифференциальный метод, как и в случае использования орбитальной

группировки, не позволяет полностью компенсировать погрешности, возникающие при увеличении числа спутников. И только в случае использования наземных псевдоспутников увеличение их числа приводит к повышению точности позиционирования, что объясняется сохранением оптимальной конфигурации группировки наземных псевдоспутников по мере их увеличения.

Выводы

Приведена оценка метрологических характеристик информационно-измерительного и управляющего комплексов для интеллектуальных транспортных систем с использованием программного модуля «Спутник», предназначенного для отработки и испытаний систем спутниковой навигации. С этой целью проведен анализ основных источников ошибок, влияющих на точность навигационных вычислений. При этом было установлено, что выявленные источники погрешностей оказывают наибольшее влияние в приземном пространстве, т.е. в зоне работы транспортных средств. Рассмотрены основные способы повышения точности позиционирования в этих условиях, которые предусматривают использование избыточных навигационных измерений и различных способов дифференциальной навигации.

Для оценки эффективности рассмотренных способов повышения точности позиционирования с использованием программного модуля «Спутник» были смоделированы три сценария работы системы позиционирования транспортных средств: на основе концепции «все в небе»; с использованием дифференциальных поправок, поступающих от опорной станции

СНС; и с использованием наземной инфраструктуры на основе «псевдоспутников».

Сравнительный анализ полученных данных свидетельствует о том, что точность позиционирования транспортных средств в первых двух сценариях практически не зависит от числа задействованных спутников. При этом в случае использования наземных псевдоспутников увеличение их числа приводит к повышению точности позиционирования в 10–15 раз, что объясняется сохранением оптимальной конфигурации группировки наземных псевдоспутников по мере их увеличения.

В качестве псевдоспутников можно использовать базовые станции сотовой связи, что позволит оптимизировать работу системы локальной навигации и улучшить зону её покрытия. Базовые станции располагают всеми возможностями для передачи навигационных сигналов. Передача сигналов может осуществляться в диапазоне L1, L2 ГЛОНАСС, поскольку излучение на литерах 8–12 не используется в данное время спутниками ГЛОНАСС. Также может быть организована передача сигналов на любой другой частоте с использованием внешнего конвертора частот.

Список литературы

1. Алексеев О.П., Пронин С.В. Интеллектуализация транспортных систем в задачах развития больших городов // Автомобильный транспорт. 2007. № 21. С. 87–90.
2. Жанказиев С.В. Научные подходы к формированию концепции построения интеллектуальных транспортных систем в России // Вестник ГЛОНАСС. 2012. № 1 (4). С. 27–31.
3. Власов В.М., Жанказиев С.В. Научные подходы к формированию государственной стратегии развития интеллектуальных транспортных систем // Научные аспекты развития транспортно-телематических систем. М.: МАДИ, 2010. С. 46–68.
4. Жанказиев С.В., Иванов А.М., Власов В.М. Научные подходы к формированию концепции построения ИТС в России // Автотранспортное предприятие. 2010. № 4. С. 2–9.
5. Интеллектуальные транспортные системы в автомобильно-дорожном комплексе / Под общ. ред. В.М. Приходько. М.: ООО «Мэйлер», 2011. 487 с.
6. Ефанов В.Н., Саяпова Л.Р. Принципы формирования телематической платформы для интеллектуальных транспортных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. № 12. С. 121–127.
7. Пугачёв И.С. Интеллектуальная транспортная система: будущее в управлении дорожным движением // Технологический прорыв. 2013. № 13. С. 58.
8. Козлов Л.Н., Урличич Ю.М., Циклис Б.Е. О концептуальных подходах формирования и развития интеллектуальных транспортных систем в России // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 3. С. 30–35.
9. Богданов М.Р. Применение GPS/ГЛОНАСС. М.: Интеллект, 2011. 136 с.
10. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. 272 с.

11. Горностаев Ю.М. Перспективы развития спутниковых навигационных систем. М.: Связь и бизнес, 2010. 132 с.

12. Соловьёв Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2011. 270 с.

13. Поваляев А.А. Спутниковые навигационные системы. М.: Вузовская книга, 2012. 188 с.

14. Пронькин А.Н. Псевдоспутники дополняют GPS-навигацию // Власть. 2011. № 4. С. 115–119.

15. Урличич Ю.М. Псевдоспутники в навигационных системах // Новая эра. 2011. № 2. С. 67–72.

16. Терехин С.Н. Методология создания локальной системы позиционирования на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной системы ГЛОНАСС. М.: Вузовская книга, 2012. 458 с.

17. Ефанов В.Н., Саяпова Л.Р. Обеспечение целостности навигационных измерений для транспортных средств за счет использованием локальной радиолокационной системы // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. № 3. С. 37–43.

18. Программный модуль «Спутник» / В.Н. Ефанов, Л.Р. Саяпова, Д.Ф. Муфаззалов. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2011619044. Зарег. 21.11.2011.

References

1. Alekseev O.P., Pronin S.V. Intellectualization of Transport Systems in the Development of Large Cities. *Road Transport*, 2007, No. 21, pp. 87–90. [in Russian].

2. Zhankaziev S.V. Scientific Approaches to the Formation of the Concept of Building Intelligent Transport Systems in Russia. *GLONASS Bulletin*, 2012, No. 1 (4), pp. 27–31. [in Russian].

3. Vlasov V.M., Zhankaziev S.V. Scientific Approaches to the Formation of the State Strategy for the Development of Intelligent Transport Systems. *Scientific Aspects of the Development of Transport and Telematic Systems*. Moscow, MADI, 2010, pp. 46–68. [in Russian].

4. Zhankaziev S.V., Ivanov A.M., Vlasov V.M. Scientific Approaches to the Formation of the Concept of Building ITS in Russia. *Motor Transport Enterprise*, 2010, No. 4, pp. 2–9. [in Russian].

5. Intellectual Transport Systems in the Automobile and Road Complex / Pod obshch.

ed. V.M. Prikhodko. M.: Mayler, 2011. 487 p. [in Russian].

6. Efanov V.N., Sayapova L.R. Principles of Formation of a Telematics Platform for Intelligent Transport Systems. *Information-Measuring and Control Systems*, 2011, No. 12, pp. 121–127. [in Russian].

7. Pugachev I.S. Intellectual Transport System: the Future in Traffic Management. *Technological Breakthrough*, 2013. No. 13. P. 58. [in Russian].

8. Kozlov L.N., Urlichich Yu.M., Tsiklis B.E. On the Conceptual Approaches of the Formation and Development of Intelligent Transport Systems in Russia. *Transport of the Russian Federation*, 2012, No. 3, pp. 30–35. [in Russian].

9. Bogdanov M.R. The Use of GPS / GLO-NASS. Moscow, Intellect Publ., 2011. 136 p.

10. Yatsenkov V.S. *Basics of Satellite Navigation. GPS Systems NAVSTAR and GLONASS*. Moscow, Hotline-Telecom Publ., 2005. 272 p. [in Russian].

11. Gornostaev Yu.M. *Prospects for the Development of Satellite Navigation Systems*. Moscow, Communication and Business Publ., 2010. 132 p. [in Russian].

12. Solovyov Yu.A. *Satellite Navigation Systems*. Moscow, Eco-Trend Publ., 2011. 270 p. [in Russian].

13. Povalyaev A.A. *Satellite Navigation Systems*. Moscow, University Book Publ., 2012. 188 p. [in Russian].

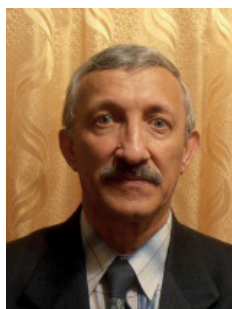
14. Pronkin A.N. Pseudo-Satellites Complement the GPS-Navigation. *Power*, 2011, No. 4, pp. 115–119. [in Russian].

15. Urlichich Yu.M. Pseudosputniki in Navigation Systems. *New Era*, 2011, No. 2, pp. 67–72. [in Russian].

16. Terekhin S.N. *The Methodology of Creating a Local Positioning System Based on the Retransmission of Signals of the Global Navigation System GLONASS*. Moscow, University Book, 2012. 458 p. [in Russian].

17. Efanov V.N., Sayapova L.R. Ensuring the Integrity of Navigation Measurements for Vehicles through the Use of a Local Radar System. *Information-Measuring and Control Systems*, 2012, No. 3, pp. 37–43. [in Russian].

18. Efanov V.N., Sayapova L.R., Mufazzalov D.F. *Software Module «Sputnik»*. Reg. Computer Program No. 2011619044, dd. 21.11.2011. [in Russian].



Зикий А. Н.
Zikiy A. N.

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



Зламан П. Н.
Zlaman P. N.

*ведущий инженер-конструктор
Научно-конструкторского бюро
моделирующих и управляющих систем,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный
университет»
г. Таганрог, Российская Федерация*

УДК 621.374.38.4

ВАРАКТОРНЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ 400 МГц

Варакторные умножители частоты нашли широкое применение в устройствах формирования сигналов передатчиков и гетеродинах приёмников. С их помощью можно получить высокостабильный сигнал в тех диапазонах частот, где прямая генерация невозможна или затруднительна, поэтому их исследование является актуальным [1-12].

К умножителю частоты предъявляются следующие требования:

- входная частота 400 МГц;
- кратность умножения частоты от 2 до 9;
- входная мощность от 10 до 20 дБм;
- коэффициент передачи от 10 до 20 дБ;
- входное сопротивление 50 Ом;
- сопротивление нагрузки 50 Ом;
- входной и выходной соединители тип 9 по ГОСТ 13317-89.

Такие параметры можно реализовать в умножителях частоты на варакторах, на диодах с накоплением заряда, на транзисторах и микросхемах. В данной работе выбран вариант варакторного умножителя частоты по причине его простоты и отсутствию напряжения питания.

Проведено экспериментальное исследование варакторного умножителя частоты при подаче на вход сигнала с частотой 400 МГц. Получены амплитудные характеристики для кратностей умножения частот от 2 до 9. Приведена принципиальная схема умножителя частоты, краткое описание конструкции и методика эксперимента.

Широко используются параллельная и последовательная схемы включения варактора. В данном случае используется параллельное включение варактора. Для согласования входного сопротивления умножителя частоты с волновым сопротивлением тракта используется П-образное звено фильтра нижних частот.

Показано, что приемлемые уровни выходной мощности от минус 8 до 4 дБм получены на гармониках от 2-ой до 9-ой при входной мощности 20 дБм. При этом коэффициент передачи меняется от минус 30 до минус 20 дБ.

Ключевые слова: варакторный умножитель частоты, амплитудные характеристики, эксперимент, спектр, кратность умножения.

VARACTOR FREQUENCY MULTIPLIER 400 MHz

Varactor frequency multipliers have found wide application in signal generation devices of transmitters and receiver heterodynes. With their help, it is possible to obtain a highly stable signal in those frequency bands where direct generation is impossible or difficult, and therefore their investigation is actual [1–12].

The following requirements are imposed on the frequency multiplier:

- input frequency of 400 MHz;
- multiplicity of frequency multiplication from 2 to 9;
- input power from 10 to 20 dBm;
- transmission ratio from 10 to 20 dB;
- input resistance 50 Ohm;
- load resistance 50 Ohm;
- input and output connectors are type 9 according to GOST 13317-89.

Such parameters can be realized in frequency multipliers on varactors, diodes with accumulation of charge, on transistors and microcircuits. In this paper, a variant of the varactor frequency multiplier is chosen because of its simplicity and lack of supply voltage.

An experimental study of a varactor frequency multiplier is performed when a signal with a frequency of 400 MHz is applied to the input. Amplitude characteristics are obtained for multiplicities of multiplication of frequencies from two to nine. A schematic diagram of the frequency multiplier, a brief description of the design, and the experimental procedure are presented.

Widely used parallel and sequential scheme of the inclusion of the varactor. In this case, the parallel inclusion of the varactor is used. The U-shaped link of the low-pass filter is used for to match the input resistance of the frequency multiplier with the wave impedance of the path.

It is shown that acceptable output power levels from minus 8 dBm to 4 dBm are obtained on harmonics from the second to the ninth with an input power of 20 dBm. In this case, the transmission factor varies from minus 30 dB to minus 20 dB.

Key words: varactor frequency multiplier, amplitude characteristics, experiment, spectrum, order of multiplication.

Схема и конструкция

Принципиальная схема умножителя частот приведена на рисунке 1, перечень элементов представлен в таблице 1.

Конденсаторы C1 и C4 являются разделительными. Конденсаторы C2, C3 и катушка L2 образуют согласующую цепь на входе. L1, R1 образуют цепь автосмещения.

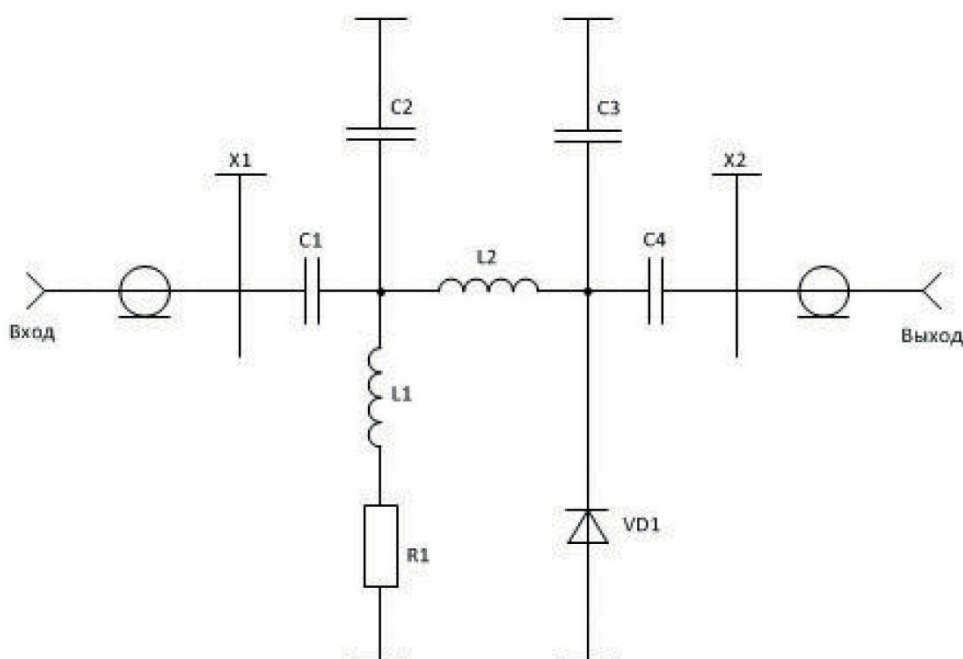
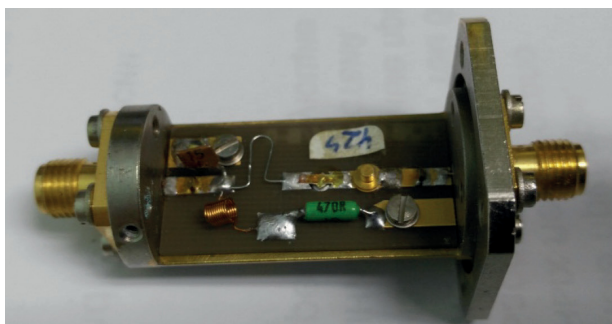


Рисунок 1. Принципиальная схема умножителя частоты

Таблица 1. Перечень элементов умножителя частоты

Позиции обозначений	Наименование	Значение
C1, C4	Конденсатор	1000 пФ $\pm 5\%$
C2	Конденсатор	12...18 пФ $\pm 5\%$
C3	Конденсатор	68 пФ $\pm 5\%$
R1	Резистор	470 Ом $\pm 5\%$
VD1	Варактор	VBV163
L1	Кагушка	10 витков на оправке 2мм, виток к витку
L2	Кагушка	0,75 витка $l = 20$ мм
X1, X2	Переход	SMA-F

Конструктивно умножитель частот представляет собой цилиндр размерами 35×20 мм, на плоских поверхностях которого установлены соединители X1, X2. Внутри цилиндра установлена печатная плата размерами 30×15×1 мм, на которую напаяны все радиоэлементы. Внешний вид умножителя частоты со снятой крышкой показан на рисунке 2. Массивная часть корпуса под платой играет роль теплоотвода для диода VD1 и конденсатора C3.

**Рисунок 2.** Фотография умножителя частоты

Эксперимент

Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой представлена на рисунке 3.

**Рисунок 3.** Структурная схема измерительной установки

Источником сигнала является генератор типа E8257D фирмы Agilent Technologies. Индикатором выходной мощности и частоты является анализатор спектра типа PXA N9030A.

На рисунке 4 можно видеть спектр выходного сигнала при подаче входного сигнала с частотой 400 МГц и мощностью 100 мВт.

Амплитудные характеристики умножителя частоты снимались при изменениях входной мощности от 10 до 20 дБм с шагом

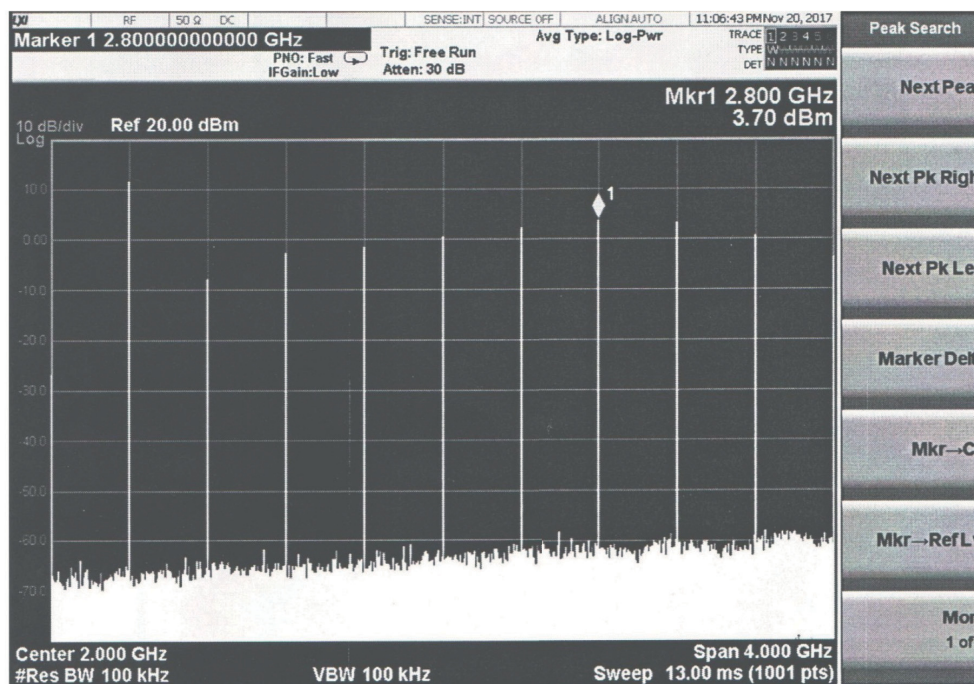
**Рисунок 4.** Спектр сигналов на выходе умножителя частоты при $f_{вх} = 400$ МГц, $P_{вх} = 100$ мВт

Таблица 2. Результаты испытаний при $f_{вх}=400$ МГц

Входная мощность (дБм)	Выходная мощность, дБм, при кратности умножения частоты							
	2	3	4	5	6	7	8	9
10	-51,37	-47,45	-47,11	-46,60	-46,39	-47,09	-51,18	-60,01
12	-38,60	-29,65	-25,85	-23,75	-22,78	-21,82	-23,20	-27,38
14	-24,45	-15,70	-13,74	-12,66	-10,73	-9,12	-9,83	12,47
16	-16,51	-9,11	-8,47	-6,58	-4,78	-3,08	-3,53	-5,85
18	-11,52	-5,41	-4,84	-2,58	-1,03	0,86	0,29	-1,94
20	-7,93	-2,82	-1,71	0,38	2,10	3,75	3,05	0,37

2 дБ. Результаты измерений выходной мощности заносились в таблицу 2. По данным таблицы 2 построены графики (рисунок 5).

Они позволяют сформулировать количественные выводы.

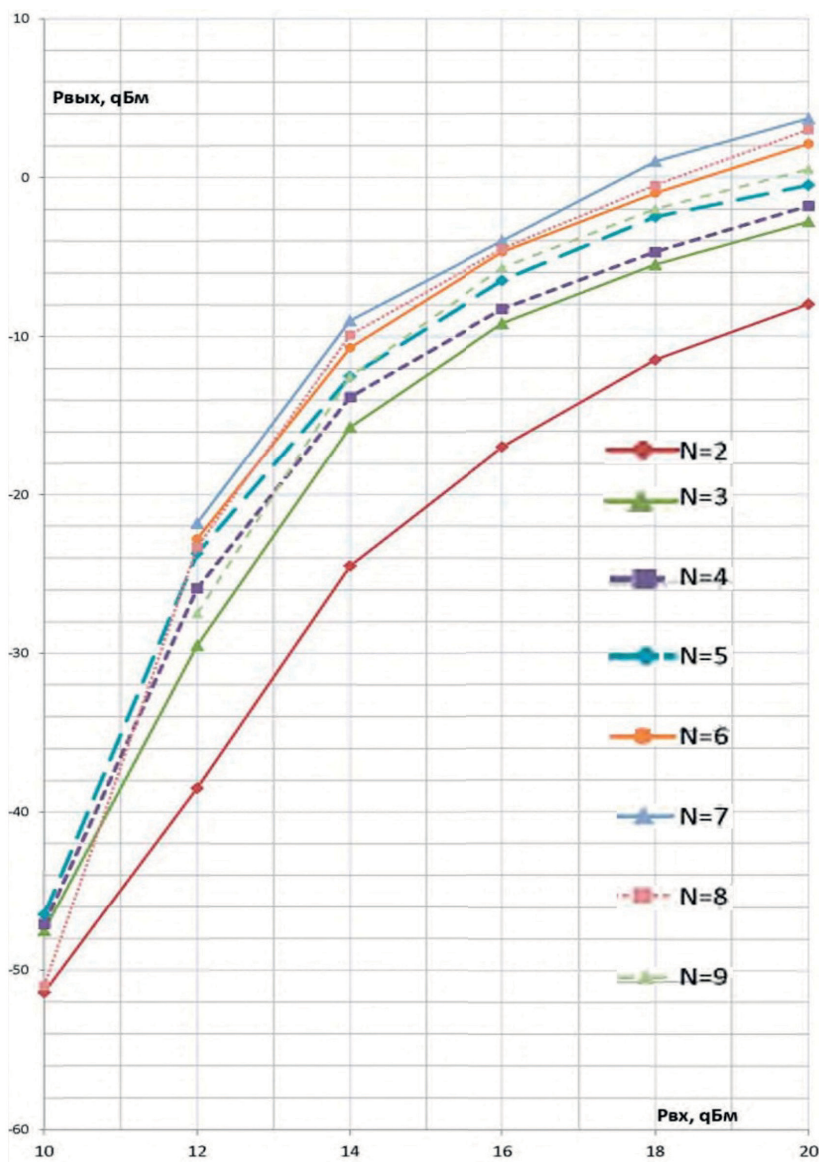


Рисунок 5. Амплитудные характеристики умножителя частот при $f_{вх}=400$ МГц

Выводы

1. Выходная мощность нелинейно зависит от входной мощности.
2. Приемлемые уровни выходной мощности (от минус 8 до + 4 дБм) получены на гар-

мониках от 2 до 9 при входной мощности + 20 дБм.

3. Коэффициент передачи умножителя частоты при входной мощности 100 мВт (20 дБм) и частоте 400 МГц представлен в таблице 3.

Таблица 3. Коэффициент передачи умножителя частоты

Номер гармоники	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициент передачи, дБ	-	-	-	-	-	-	-	-
	27,93	22,82	21,71	19,62	17,9	16,25	16,95	19,63

Список литературы

1. Красноголовый Б.Н., Плавский Л.Г. Варакторные умножители частоты. Минск: БГУ, 1979. 288 с.
2. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 320 с.
3. Касаткин Л.В., Чайка В.Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. Севастополь: Вебер, 2006. 319 с.
4. Ризкин И.Х. Умножители и делители частоты. М.: Связь, 1976. 328 с.
5. Бруевич А.Н., Евтянов С.И. Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии. М.: Советское радио, 1965. 344 с.
6. Грибов Э.Б. Нелинейные явления в приёмо-передающем тракте аппаратуры связи на транзисторах. М.: Связь, 1971. 243 с.
7. Жаботинский М.Е., Свердлов Ю.Л. Основы теории и техники умножения частоты. М.: Советское радио, 1964. 327 с.
8. Кищинский А.А. и др. Умножители частоты на полевых транзисторах с барьером Шотки. Обзоры по электронной технике / ЦНИИ Электроника — Серия 1. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 10 (1558). 32 с.
9. Савельев В.С. и др. Умножители частоты СВЧ диапазона на транзисторах. Обзоры по электронной технике / ЦНИИ Электроника — Серия 1. Электроника СВЧ. 1986. Вып. 17 (1220). 27 с.
10. Измерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / Под ред. А.М. Кудрявцева. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
11. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчёт / Под ред. Р.А. Валитова и И.А. Попова. М.: Советское радио, 1973. 464 с.
12. Camargo E. Design of FET Frequency Multipliers and Harmonic Oscillators. Artech House Inc. Norwood, MA, 1998. 215 p.
2. Belov L.A. *Devices for the Generation of Microwave Signals and Their Components*. Moscow, Publishing House MEI, 2010. 320 p. [in Russian].
3. Kasatkin L.V. Chajka V.E. *Semiconductor Devices in the Millimeter Wave Range*. Sevastopol, Veber, 2006. 319 p. [in Russian].
4. Rizkin I.Kh. *Frequency Multipliers and Dividers*. Moscow, Svyaz Publ., 1976. 328 p. [in Russian].
5. Bruevich A.N., Evtyanov S.I. *Approximation of Nonlinear Characteristics and Spectra under Harmonic Influence*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1965. 344 p. [in Russian].
6. Gribov E.B. *Nonlinear Phenomena in the Receiving-Transmitting Tract of Communications Equipment on Transistors*. Moscow, Svyaz Publ., 1971. 243 p. [in Russian].
7. Zhabotinskij M.E., Sverdlov Yu.L. *Fundamentals of the Theory and Technique of Frequency Multiplication*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1964. 327 p. [in Russian].
8. Kishhinskij A.A. e.a. Frequency Multipliers on Field Effect Transistors with a Schottky Barrier. *Electronic Surveys. TSNII Elektronika*. Ser. 1. Elektronika SVCH. 1990. Vol. 10 (1558). 32 p. [in Russian].
9. Savel'ev V.S. e.a. Multipliers of Microwave Frequency Range on Transistors. *Electronic Surveys. TSNII Elektronika*. Ser. 1. Elektronika SVCH. 1986. Vol. 17 (1220). 27 p. [in Russian].
10. *Measuring Equipment of Microwave and EHF. Nodal and Element Bases*. Ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 208 p. [in Russian].
11. *Radio Transmitting Devices on Semiconductor Devices. Design and Calculation*. Ed. by R.A. Valitova and I.A. Popova. Moscow, Soviet radio Publ., 1973. 464 p. [in Russian].
12. Camargo E. *Design of FET Frequency Multipliers and Harmonic Oscillators*. Artech House Inc. Norwood, MA, 1998. 215 p.

References

1. Krasnogolovyj B.N., Plavskij L.G. *Varactor Frequency Multiplier*. Minsk, BGU, 1979. 288 p. [in Russian].



Крымский В. Г.
Krymsky V. G.

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



Сафиуллина Р. Р.
Safiullina R. R.

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

УДК 004.89: 543.27.-8

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ MEMS-СЕНСОРОВ

В статье обсуждается проблема поддержки принятия решений по результатам мониторинга воздушной среды с помощью высокочувствительных MEMS-сенсоров. Отмечается, что MEMS-сенсоры способны обеспечивать реакцию на детектируемые газы в очень малых концентрациях. Этот факт может быть причиной ошибок, возникающих вследствие случайных флуктуаций состава воздушной среды и приводящих к ложным выводам об обнаружении того или иного опасного газа. Чтобы предотвратить ошибки, целесообразно использовать некоторый эффективный алгоритм комплексирования данных, привлекая измеренные величины от ряда сенсоров. Такое преобразование должно осуществляться в условиях неопределенности.

Авторы предлагают улучшить адекватность решений и, в особенности, устранить ложные детектирования загрязнений воздуха, сравнивая достоверность показаний разных сенсоров на основе подхода Демпстера-Шефера. Обосновывается, что этот подход позволяет получать оценки мер уверенности, соответствующих определенным решениям. Приводится численный пример, иллюстрирующий применение предложенной методики.

Ключевые слова: мониторинг воздуха, MEMS-сенсоры, поддержка принятия решений, подход Демпстера-Шефера.

DECISION SUPPORT WITHIN AIR MONITORING USING HIGH SENSITIVE MEMS-SENSORS

The paper discusses the problem of supporting decisions based on the results of air monitoring performed via high-sensitive MEMS-sensors. There is notified that MEMS-sensors are able to provide responses to the detected gases in very small concentrations. This fact can be the cause of errors appearing due to random fluctuations of the air composition and leading to false conclusion on the recognition of any dangerous gas. To prevent the errors, it is inherent to apply any effective algorithm for data fusion involving the measured values from a number of sensors. Such a transformation should be accomplished under the conditions of uncertainty.

The authors suggest to improve an adequacy of decisions and especially to avoid any false detection of the air pollutions by comparing the reliability of the readings from several sensors on the basis of Dempster-Schafer approach. It is justified that this approach allows obtaining the

estimations of belief measures corresponding to definite decisions. Numerical example illustrating the application of the proposed methodology is given.

Key words: air monitoring, MEMS-sensors, decision support, Dempster-Shafer approach.

Введение

Применение MEMS-сенсоров открывает новые перспективы в решении проблем контроля качества воздуха производственных помещений, что обусловлено их значительными преимуществами по сравнению с обычными (традиционными) датчиками, используемыми для указанной цели [1–3].

Как отмечается в [4], MEMS (Микроэлектро-механические системы) — это множество микроустройств, созданных с использованием модифицированных технологий микроэлектроники и имеющих различные конструкции и назначения. Такие системы образуются путем комбинирования механических элементов, датчиков и электроники на общем кремниевом основании. Все элементы могут быть реализованы в виде единого изделия, и при этом — в больших количествах, аналогично полупроводниковым интегральным микросхемам (ИМС).

Наследуя позитивные качества ИМС, MEMS-устройства в то же время приобретают новые привлекательные свойства вследствие интеграции электроники с механическими, оптическими и другими узлами. К этим свойствам, согласно [5], относятся малые разбросы параметров в пределах изделия, технологичность, микроминиатюрность, высокая функциональность, надежность и относительно низкая стоимость.

Наиболее распространенные модификации MEMS-сенсоров для определения концентраций тех или иных газов в воздушной среде относятся к следующим типам:

- 1) емкостные датчики (capacitive sensors);
- 2) датчики с использованием микроконсоли (microcantilever — based sensors);
- 3) резистивные полупроводниковые датчики типа microhotplate (microhotplate sensors).

Принцип действия MEMS-сенсоров емкостного типа основан на наличии в их структуре микроконденсатора, между обкладками которого имеется полимерный

слой, чувствительный к определенному веществу [6, 7]. При попадании молекул диагностируемого вещества между обкладками конденсатора изменяется диэлектрическая проницаемость указанного полимерного материала, что приводит к соответствующим изменениям емкости. Таким образом, на основании измерений емкости микроконденсатора можно определить концентрацию и тип вещества (в данном случае — газа, присутствующего в воздушной среде) [7].

В силу избирательности конкретного полимера с точки зрения его реакции на заданное вещество возникает стремление к построению универсального датчика, чувствительного к набору (совокупности) диагностируемых веществ. Это требование обеспечивается расположением нескольких микроконденсаторов, чувствительных к разным веществам, на одном чипе.

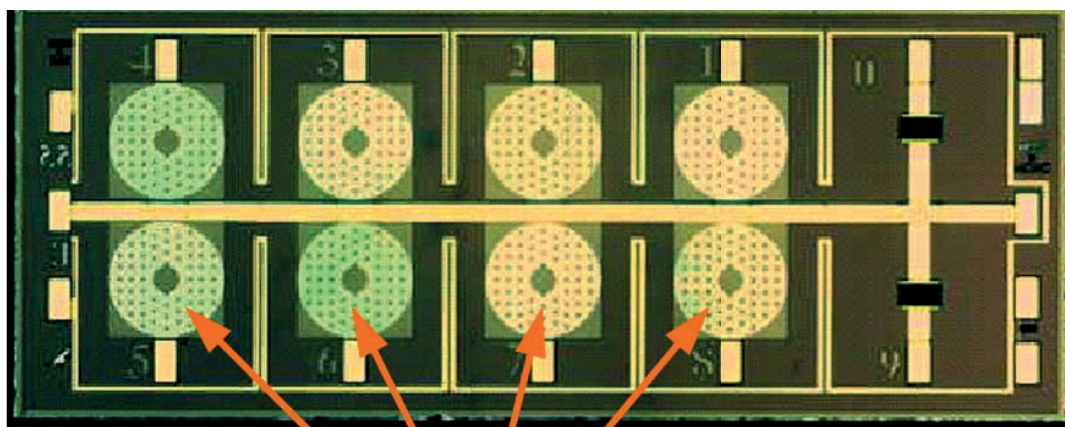
На рисунке 1 показан чип производства компании MEMSCAP (Дурхам, Северная Каролина, США) [6]. Он содержит восемь емкостных MEMS-сенсоров, причем между обкладками конденсаторов разных сенсоров могут помещаться различные полимеры.

Общий размер чипа — 5×2 мм.

Такого рода сенсоры обладают очень высокой чувствительностью к наличию диагностируемых веществ в воздушной среде. В частности, данные, приведенные в публикации [6], показывают, что они способны фиксировать наличие этанола в концентрациях порядка 40 ppm (1 ppm = 0,0001 %).

Сенсоры на основе микрокантилевера (рисунок 2) содержат прямоугольное основание (типовые размеры — 1,5×3,5×0,5 мм) с выступающей из него балкой (микроконсолью) шириной порядка 0,03 мм и длиной от 0,1 до 0,5 мм [8]. Толщина микроконсоли существенно меньше, чем ее ширина или длина.

В результате «бомбардировки» рецептора молекулами диагностируемого вещества («аналита») и происходящей при этом абсорбции меняются механические свойства микроконсоли. Соответственно, дальнейшие



Емкостные сенсоры с параллельными обкладками микроконденсаторов

Рисунок 1. Чип, содержащий 8 емкостных MEMS-сенсоров и 2 встроенных датчика температуры

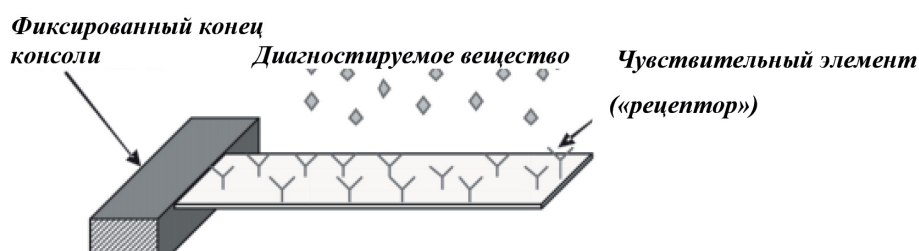


Рисунок 2. Схематическое представление микрокантилевера [8]

измерения концентраций газа могут быть основаны либо на определении отклонения свободного конца микроконсоли от исходного положения (для модификаций сенсоров, работающих в статическом режиме), либо осуществляться исходя из варьирования резонансной частоты ее колебаний (если сенсоры функционируют в динамическом режиме [9]). Подобные сенсоры могут реагировать даже на сверхнизкие концентрации диагностируемого газа, вплоть до $1 \text{ ppb} = 0,0000001 \%$.

Принцип действия датчиков типа microhotplate основан на том факте, что полупроводниковые металлические оксиды, нагретые до высоких температур (порядка $300 \text{ }^\circ\text{C}$), становятся весьма чувствительными к реактивным газам в воздухе, изменяя свое сопротивление [10]. Такие сенсоры потребляют более высокую мощность, чем другие разновидности устройств аналогичного назначения; это обусловлено наличием в них нагревательного элемента, температура которого должна достигать $300\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$. Подобные нагреватели часто имеют форму изогнутых спиралей и реализуются на базе никелевых сплавов, осажденных поверх

мембраны из диоксида кремния (рисунок 3) [11]. Толщина нагревателя может быть равна 1 мкм .

Температура нагревателя

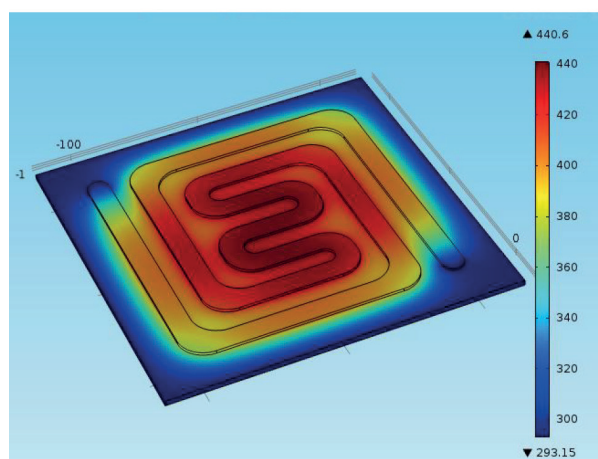


Рисунок 3. Нагреватель, изогнутый в виде спирали, для сенсора типа microhotplate [11]

Как свидетельствуют экспериментальные данные, с помощью датчиков этого типа можно добиться обнаружения детектируемого газа в концентрациях даже порядка 10 ppm [12].

Между тем, разработка систем мониторинга воздуха с использованием указанных сенсоров с принципиально новыми свой-

ствами обуславливает повышенные требования к формированию обоснованных выводов о складывающейся обстановке по результатам собранной измерительной информации. Случайные флуктуации воздушной среды, не являющиеся следствиями появления в ней значимых концентраций загрязнителей, зачастую способны вызвать появление «тревожных» сигналов подобных устройств, что приведет к принятию решений на основе ложных предпосылок. Достижение необходимой достоверности итоговых выводов возможно только на базе совместного анализа и сопоставления данных из нескольких источников (от разных сенсоров) с их комплексированием в рамках используемого алгоритма обработки данных. Соответствующие преобразования на практике выполняются в условиях неопределенности, вызванной наличием той или иной вероятности ошибки принятия решения по информации от одного источника. Один из путей такого комплексирования рассматривается ниже.

2. Поддержка принятия решений с использованием информации от нескольких сенсоров

Как уже отмечалось, основой повышения достоверности итоговых выводов относительно наличия или отсутствия загрязнений в воздухе может служить совместное использование данных от ряда сенсоров, которое должно сопровождаться оценением эффекта от указанных действий. В настоящей статье предлагается применять для этого оценивания подход Демпстера-Шефера [13]. Отмеченный подход базируется на построении так называемого «распределения уверенности» [13, 14].

Пусть A — случайное событие, которое заключается в появлении значимой концентрации опасного вещества в воздушной среде. Противоположное событие (т.е. отсутствие A , например в связи с сохранением в допустимых пределах всех характеристик технологического процесса) обозначим A' . Если с помощью выбранного метода мониторинга поступила информация с диагностическими признаками события A , то можно считать, что эта информация верна с вероятностью $P \pm \Delta P$, где ΔP — неуверенность

(или «неопределенность»), свойственная используемому методу. Величины P и ΔP должны быть либо известны по результатам накопленной статистики, либо установлены экспертным путем.

При использовании метода Демпстера-Шефера информация о вероятностях событий A и A' интерпретируется в виде результатов распределения общей вероятностной массы, равной 1, по возможным гипотезам (рисунок 4).

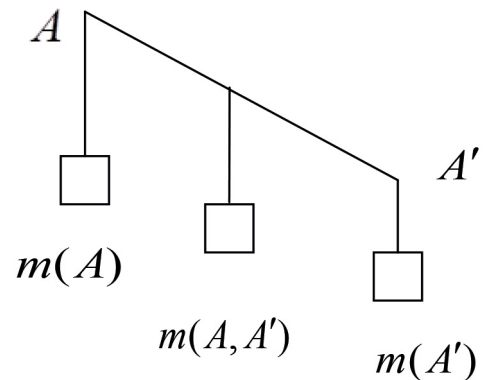


Рисунок 4. Распределение вероятностной массы

Масса, сопоставленная с событием A , равна $m(A) = P - \Delta P$; масса, сопоставленная с событием A' , равна $m(A') = 1 - (P + \Delta P)$. В то же время масса отражает неопределенность в вероятностном оценивании. Эта масса $m(A, A') = 2\Delta P$ может быть отнесена как к событию A , так и к событию A' .

Если факт наступления события A устанавливается с помощью анализа информации от нескольких сенсоров, то возникают несколько распределений вероятностных масс (т.е. уверенности). Их необходимо комплексировать с целью вычисления результирующей вероятности обнаружения события (попадания опасного вещества в воздушную среду).

Рассмотрим основные этапы данного алгоритма комплексирования на следующем примере.

Предположим, что согласно показаниям одного сенсора событие A (реальное загрязнение воздушной среды) имеет место с вероятностью $80\% + / - 15\%$, а в соответствии с показаниями другого сенсора — с вероятностью $30\% + / - 10\%$.

Тогда получаем следующие распределения уверенности:

$m_1(A) = 0,65; m_1(A') = 0,05; m_1(A, A') = 0,30;$
 $m_2(A) = 0,20; m_2(A') = 0,60; m_2(A, A') = 0,20.$

Дальнейшие вычисления сведены в таблицу 1.

В приведенной таблице 1 даются результирующие вероятности по тем или иным событиям или их комбинациям. Каждый эле-

мент ищется путем перемножения соответствующих этим событиям (комбинациям событий) вероятностных масс. В скобках указываются события, являющиеся общими для строк и столбцов (0, т.е. невозможное событие, возникает при отсутствии таких общих исходных событий).

Таблица 1. Значения вероятностных масс

Вероятностные массы	$m_1(A)$	$m_1(A')$	$m_1(A, A')$
$m_2(A)$	0,13 (A)	0,01 (0)	0,06 (A)
$m_2(A')$	0,039 (0)	0,03 (A')	0,18 (A')
$m_2(A, A')$	0,13 (A)	0,01 (A')	0,06 (A')

Формула для расчета результирующей меры уверенности (аналога вероятности) при фиксации рассматриваемого события с помощью композиции данных от двух сенсоров имеет вид [13, 14]:

$$Bel(A) = \frac{\sum_{B|C=A} m_i(B)m_j(C)}{1 - \sum_{B|C=0} m_i(B)m_j(C)}$$

В нашем случае $Bel(A) = (0,13 + 0,13 + 0,06 + 0,06) / (1 - 0,039 - 0,01) = 0,40.$

Оценку итоговой неопределенности можно выполнить, руководствуясь той же формулой с учетом того, что здесь необходимо рассматривать не $Bel(A)$, а величину

$$Bel(A, A') = 0,06 / (1 - 0,039 - 0,01) = 0,10.$$

Таким образом, получаем результат комплексирования: при совместном использовании двух источников информации о событии вероятность того, что выброс загрязнителя в воздушную среду действительно произошел, составляет 40 % + / - 5 %.

Заметим, что погрешность найденной вероятности меньше, чем погрешности для отдельных составляющих (индивидуальных источников информации), что является следствием комплексирования. Тем не менее, абсолютная величина «номинала» вероятности (40 %) слишком низка, чтобы сделать вывод о наступлении события А.

Список литературы

1. Жалбеков И.М., Крымский В.Г. Математические модели полупроводниковых резистивных газовых микросенсоров и их

Вывод

При формировании решений на базе информации от таких высокочувствительных измерителей, как газовые MEMS-сенсоры необходимо избежать ложных выводов о появлении загрязнений при наличии незначительных случайных флуктуаций состава воздушной среды. В этом отношении может оказаться полезным подход Демпстера-Шефера, в рамках которого осуществляется комплексирование данных от нескольких сенсоров с оцениванием достоверности итогового заключения о возникновении или отсутствии возникновения соответствующего события. Указанный подход, ориентированный на рассмотрение вероятностей как некоторых величин, которые заданы диапазоном (интервалом) возможных значений, близок по смыслу перспективному направлению в современном системном анализе, оперирующему моделями неопределенностей с использованием интервальных («неточных») вероятностей [15–18]. Авторы планируют в дальнейшем рассмотреть возможность реализации такого рода алгоритмов применительно к поддержке принятия решений по результатам комплексирования информации в системах автоматического слежения за контролируруемыми параметрами [19, 20].

использование // Приборы. 2010. № 4. С. 55–63.

2. Кабашов Ю.С., Крымский В.Г. Построение структурированной математической

модели газового емкостного MEMS-сенсора // Приборы. 2011. № 4. С. 16–23.

3. Крымский В.Г., Кабашов Ю.С. Использование «тау-модели» для комплексирования информации от нескольких газовых MEMS-сенсоров // Приборы. 2011. № 10. С. 57–62.

4. Борзенко А. Технология MEMS // ВУТЕ/Россия. 2006. № 1 (89). С. 26–32.

5. Применение микро-электро-механических систем [Электронный ресурс] // ЭЛИНФОРМ: информационный портал по технологиям производства электроники. 24.06.2007. — http://www.elinform.ru/articles_7.htm.

6. McCorkle D.L., Warmack R.J., Patel S.V., Mlsna T., Hunter S.R., Ferrell T.L. Ethanol Vapor in Aqueous Environments Using Micro-Capacitors and Dielectric Polymers // Sensors and Actuators B: Chemical. 2005. Vol. 107. No. 2. P. 892–903.

7. Кабашов Ю.С., Крымский В.Г. Оценка изменения диэлектрической проницаемости полимерного слоя в емкостных MEMS-микросенсорах для измерения концентрации опасных веществ в атмосфере // Приборы. 2008. № 3. С. 29–32.

8. Chaudhary M., Gupta A. Cantilever-Based Sensors // Defense Science Journal. 2009. Vol. 59. No. 6. P. 634–641.

9. Subbashini S., Vimala Juliet A. Resonance Based Micromechanical Cantilever for Gas Sensing // International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA). 2013. Vol. 5. No. 2. P. 125–130.

10. Roy S., Sarkar C.K. MEMS and Nanotechnology for Gas Sensors. Taylor & Francis Group / CRC Press, 2015. 224 p.

11. Arora M., Arora A. Design and Simulation of MEMS based Microhotplate as Gas Sensor // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET). 2013. Vol. 2. No. 8. P. 2487–2492.

12. Dufour N., Veyrac Y., Menini Ph., Blanc F., Talhi Ch., Franc B., Ganibal C., Wartelle C., Aguir K. Increasing the Sensitivity and Selectivity of Metal Oxide Gas Sensors by Controlling the Sensitive Layer Polarization // 2012 IEEE Sensors Proceedings. Taipei, Taiwan, 2012. 4 p.

13. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton (NJ, USA): Princeton University Press, 1976. 297 p.

14. Koks D., Challa S. An Introduction to Bayesian and Dempster-Shafer Data Fusion // Report DSTO-TR-1436. DSTO Systems Science Laboratory Publ. Edinburgh (Australia), 2005. 38 p.

15. 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 LNCS. P. 151–160.

16. Kozine I., Krymsky V. Enhancement of Natural Extension // Proceedings of the 5th International Symposium on Imprecise Probability: Theories and Applications (ISIPTA '07). Prague: Action M Agency, 2007. P. 253–262.

17. Kozine I., Krymsky V. Bounded Densities and Their Derivatives: Extension to Other Domains // Journal of Statistical Theory and Practice. 2009. Vol. 3, No. 1. P. 25–38.

18. Kozine I., Krymsky V. An Interval-Valued Reliability Model with Bounded Failure Rates // International Journal of General Systems. 2012. Vol. 41. No. 8. P. 760–773.

19. Крымский В.Г., Жалбеков И.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р. Автоматизация управления технологическими процессами в газораспределительных сетях: проблемы, тенденции и перспективы // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 2. С. 70–79.

20. Васильев В.И., Гусев Ю.М., Ефанов В.Н., Крымский В.Г., Шаймарданов Ф.А. О структурном синтезе многосвязных следящих систем // Известия вузов. Приборостроение. 1975. Т. 18. № 1. С. 37–40.

References

1. Zhalbekov I.M., Krymsky V.G. Mathematical Models of Semiconductor Resistive Gas Microsensors and Their Use. *Instruments*, 2010, No. 4, pp. 55–63. [in Russian].

2. Kabashov Yu.S., Krymsky V.G. Building a Structured Mathematical Model of a Gas Capacitive MEMS Sensor. *Instruments*, 2011, No. 4, pp. 16–23. [in Russian].

3. Krymsky V.G., Kabashov Yu.S. Using the «Tau-Model» to Integrate Information from

- Several Gas MEMS-Sensors. *Instruments*, 2011, No. 10, pp. 57–62. [in Russian].
4. Borzenko A. Technology MEMS. *BYTE Russia*, 2006, No. 1 (89), pp. 26–32. [in Russian].
 5. The Use of Micro-Electro-Mechanical Systems [Electronic Resource]. *ELINFORM: Information Portal on Electronics Manufacturing Technologies*, 24.06./2007. http://www.elinform.ru/articles_7.htm. [in Russian].
 6. McCorkle D.L., Warmack R.J., Patel S.V., Mlsna T., Hunter S.R., Ferrell T.L. Ethanol Vapor in Aqueous Environments Using Micro-Capacitors and Dielectric Polymers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, Vol. 107, No. 2, pp. 892–903.
 7. Kabashov Yu.S., Krymsky V.G. Evaluation of Changes in the Dielectric Constant of the Polymer Layer in Capacitive MEMS Microsensors for Measuring the Concentration of Hazardous Substances in the Atmosphere. *Instruments*, 2008, No. 3, pp. 29–32. [in Russian].
 8. Chaudhary M., Gupta A. Cantilever-Based Sensors. *Defense Science Journal*, 2009, Vol. 59, No. 6, pp. 634–641.
 9. Subbashini S., Vimala Juliet A. Resonance Based Micromechanical Cantilever for Gas Sensing. *International Journal of Network Security & Communications Applications (IJNSA)*, 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 125–130.
 10. Roy S., Sarkar C.K. MEMS and Nanotechnology for Gas Sensors. Taylor & Francis Group / CRC Press, 2015. 224 p.
 11. Arora M., Arora A. Design and Simulation of MEMS-based Microhotplate as Gas Sensor. *International Journal of Computer Science & Technology (IJARCET)*, 2013, Vol. 2, No. 8, pp. 2487–2492.
 12. Dufour N., Veyrac Y., Menini Ph., Blanc F., Talhi Ch., Franc B., Ganibal C., Wartelle C., Aguir K. Sensitive Layer Polarization. *2012 IEEE Sensors Proceedings*. Taipei, Taiwan, 2012. 4 p.
 13. Shafer G. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton (NJ, USA), Princeton University Press, 1976. 297 p.
 14. Koks D., Challa S., Data Fusion Data Report. Report DSTO-TR-1436. *DSTO Systems Science Publ. Edinburgh (Australia)*, 2005. 38 p.
 15. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Density Functions. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, Vol. 3732 LNCS, pp. 151–160. [in Russian].
 16. Kozine I., Krymsky V. Enhancement of Natural Extension. *Proceedings of the 5th International Symposium on Imprecise Probability: Theories and Applications (ISIPTA '07)*. Prague, Action M Agency, 2007, pp. 253–262. [in Russian].
 17. Kozine I., Krymsky V. Bounded Densities and their Derivatives: Extension to Other Domains. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 2009, Vol. 3, No. 1, pp. 25–38. [in Russian].
 18. Kozine I., Krymsky V. An Interval-Valued Reliability Model with Bounded Failure Rates. *International Journal of General Systems*, 2012, Vol. 41, No. 8, pp. 760–773.
 19. Krymsky V.G., Zhalbekov I.M., Imilbaev R.R., Yunusov A.R. Automation of Management of Technological Processes in Gas Distribution Networks: Problems, Trends and Prospects. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, Vol. 9, No. 2, pp. 70–79.
 20. Vasilyev V.I., Gusev Yu.M., Efanov V.N., Krymsky V.G., Shaimardanov F.A. On the Structural Synthesis of Multiply Connected Tracking Systems. *Izvestiya Vuzov. Instrument Making*, 1975, Vol. 18, No. 1, pp. 37–40.



Цыбов Н. Н.

Tsybov N. N.

*кандидат технических наук, заведующий лабораторией
электронного моделирования,
Кыргызский государственный университет
строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова,
г. Бишкек, Республика Кыргызстан*

УДК 621.317.73

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНАЛИЗАТОРОВ РЕАКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В процессе проектирования электронных систем контроля и управления процессами в электрических цепях актуальной является задача расчета и измерения параметров реактивных компонентов электрических цепей в широком диапазоне частот. На настоящий момент промышленностью выпускается широкий ряд измерителей реактивных компонентов. На этапе проектирования и отработки параметров электроизмерительных устройств с целью обеспечения их надежности необходима проверка их функционирования в широком диапазоне частот. Существующие же на сегодня промышленно выпускаемые приборы функционируют на конкретно определенных частотах или в весьма узком диапазоне конкретных частот. В связи с этим существует актуальная задача проектирования измерителей реактивных компонентов, функционирующих в широком диапазоне частот, от низких до сверхвысоких. В статье автором проводится анализ характеристик существующих промышленно выпускаемых измерителей реактивных компонентов, а также анализ существующих традиционных методов измерений реактивных компонентов электрических цепей. В статье приведены варианты моделей компонентов электрических цепей и их схемы замещения на низких и высоких частотах. В статье приведен пример создания Z-анализатора комплексных сопротивлений активных многополюсников с концентрированными и распределенными параметрами. Предложенный Z-анализатор, функционирующий в широком диапазоне частот и имеющий повышенную точность измерений, может быть использован при измерении частотных характеристик реактивных компонентов электрических цепей. В предлагаемом устройстве расширенный частотный диапазон измерения реактивных составляющих полного сопротивления получен за счет введения в устройство трех генераторов низкой частоты, высокой частоты и сверхвысокой частоты. Увеличение точности измерений получено за счет введения двух самостоятельно работающих масштабирующих усилителей тока и напряжения, которые оптимизируют диапазон амплитудных значений тока и напряжения на входе аналого-цифрового преобразователя.

Ключевые слова: паразитные компоненты, реактивные компоненты, измерители, анализаторы, иммитанс, импеданс, RLC-измеритель.

DESIGNING ANALYZERS REACTIVE COMPONENTS IN ELECTRONICS SYSTEMS OF CONTROL AND MANAGEMENT

In the process of designing electronic systems for monitoring and controlling processes in electrical circuits, the problem of calculating and measuring the parameters of reactive components of electrical circuits over a wide frequency range is topical. At the moment, the industry produces a wide range of meters of reactive components. At the stage of designing and testing the parameters of electrical measuring devices to ensure their reliability, it is necessary to check their functioning over a wide range of frequencies. Existing for today industrially produced devices operates at specific frequencies or in a very narrow range of specific frequencies. In this regard,

there is an urgent task of designing meters of reactive components operating in a wide range of frequencies, from low to ultrahigh (microwave). In the article the author analyzes the characteristics of existing commercially available meters of reactive components, as well as analyzes existing conventional methods for measuring reactive components of electrical circuits. The article presents variants of models of components of electrical circuits and their substitution schemes at low and high frequencies. The article gives an example of creating a Z-analyzer of complex resistances of active multipoles with concentrated and distributed parameters. The proposed Z-analyzer, operating in a wide frequency range and having increased measurement accuracy, can be used for measuring the frequency characteristics of reactive components of electrical circuits. In the proposed device, the extended frequency range for measuring the reactive components of the impedance is obtained by introducing three low-frequency, high frequency and ultra-high frequency generators into the device. The increase in the accuracy of measurements is obtained by introducing two independently operating scaling current and voltage amplifiers that optimize the amplitude range of the current and voltage at the input of the analog-to-digital converter.

Key words: parasitic components, reactive components, meters, analyzers, imittance, impedance, RLC-meter.

Все без исключения реальные компоненты любой электрической цепи содержат паразитные реактивные компоненты, при инженерных расчетах которыми на низких частотах пренебрегают. На высоких частотах наличие паразитных реактивных и активных составляющих характерно как для самих электронных компонентов, так и для элементов конструкции самого устройства.

Рассмотрим достоинства и недостатки традиционных способов определения реактивных компонентов.

Резонансный метод. При применении резонансного метода измеряются параметры «рабочего элемента», резонансной частоты контура, образованного измеряемой цепью и «рабочим элементом» – образцовой емкостью или индуктивностью (рисунок 1). Достоинством метода является возможность определения параметров емкости индуктивности в действующих значениях и есть возможность определения параметров самих паразитных составляющих.

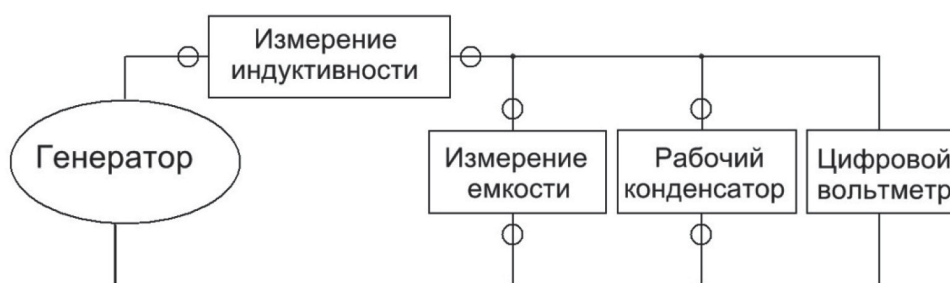


Рисунок 1. Резонансный метод определения реактивных компонентов

Метода дискретного счета. Применение метода дискретного счета основано на определении параметров апериодического процесса, полученного в результате подключения к «образцовому» резистору заряженного конденсатора. Этот метод имеет высокую точность измерений. К недостаткам метода дискретного счета можно отнести: заметное влияние нестабильности параметров образцовых резисторов и конденсаторов, а также погрешность установки частоты генератора и нестабильность его амплитуды колебаний.

Метод амперметра, вольтметра и ваттметра. Этот метод применяется в условиях, не требующих высокой точности (рисунок 2) [1]. Полное сопротивление при этом определяется из выражения:

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Активная составляющая полного сопротивления определяется из выражения:

$$R = \frac{P}{I^2}. \quad (2)$$

Реактивная составляющая полного сопротивления определяется из выражения:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (3)$$

Индуктивность при этом определяется из выражения:

$$L = \frac{X}{2\pi f}, \quad (4)$$

а емкость — из выражения:

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot X}. \quad (5)$$

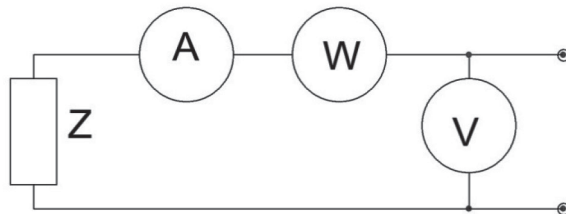


Рисунок 2. Метод амперметра, вольтметра и ваттметра

Мостовой метод четырехплечего моста является наиболее применяемым при измерениях реактивных компонентов.

Условия для равновесия моста (рисунок 3) соблюдаются при выполнении соотношения:

$$\begin{aligned} Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 &= (R_1 + jX_1) \cdot (R_4 + jX_4) = \\ &= (R_2 + jX_2) \cdot (R_3 + jX_3). \end{aligned} \quad (7)$$

Из уравнения (7) получаем уравнения для вещественных и мнимых членов:

$$\begin{aligned} R_1 \cdot R_4 - X_1 \cdot X_4 &= R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_3; \\ R_1 \cdot X_4 + X_1 \cdot R_4 &= R_2 \cdot X_3 + X_2 \cdot R_3. \end{aligned} \quad (8)$$

Это значит, что балансировка моста производится управлением двумя параметрами. Мостовой метод, как правило, реализуется на базе сбалансированного моста. В отличие от схемы измерений на базе несбалансированного моста уравновешенный мост не предъявляет особых требований по стабилизации напряжения питания моста, и нет необходимости градуировки шкалы «измерительного элемента» в единицах сопротивления.

Сами реактивные компоненты индуктивность и емкость всегда содержат паразитные составляющие — паразитную емкость,

индуктивную и активную составляющие. Реальный резистор можно считать с большим приближением активным на сравнительно низких частотах. При значительном повышении частоты начинает проявляться влияние паразитной индуктивности резистора L_R (рисунок 4) [2]. Влияние паразитной индуктивности L_R обусловлено появлением изменяющегося магнитного поля при прохождении через резистор переменного тока, что соответственно вызывает появление ЭДС самоиндукции. При дальнейшем повышении частоты начинает проявляться паразитная емкость резистора C_R . Влияние паразитной емкости C_R обусловлено образованным между выводами реального резистора переменным электрическим полем. Наличие паразитной емкости C_R приводит к протеканию «дополнительного тока» между выводами резистора. Параметры сопротивления в высокочастотной области описываются в соответствии с законом Ома следующим выражением:

$$i(t) = \frac{U(t)}{R} = G \cdot U(t). \quad (9)$$

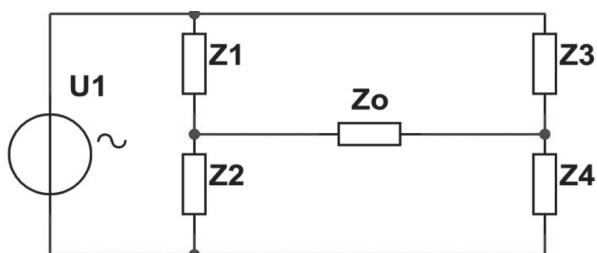


Рисунок 3. Одинарный четырехплечий измерительный мост

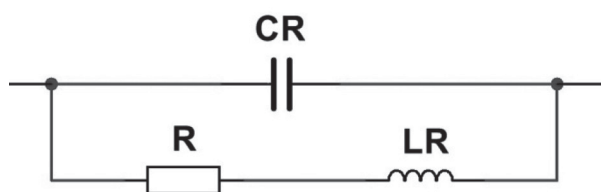


Рисунок 4. Эквивалентная схема замещения реального резистора на высоких частотах

Влияние паразитных составляющих на различные типы резисторов различно и зависит от конструкции и технологии изготовления. К примеру, паразитная индуктивная составляющая у пленочных резисторов выражена намного меньше, чем у проволочных резисторов, но они имеют большую паразитную емкостную составляющую, образованную между телом пленочного резистора и печатной платой.

Схема замещения реальной емкости (конденсатора) в низкочастотной области может приближенно быть представлена одним емкостным элементом [2]. При повышении частоты (рисунок 5) у реального конденсатора проявляются паразитные компоненты — активная и индуктивная составляющие. Это сопротивление утечки R_s (на схеме замещения включено параллельно емкости), сопротивление потерь (на схеме замещения включено последовательно емкости), индуктивность выводов конденсатора L_c (на схеме замещения включено последовательно емкости). Влияние паразитной индуктивности L_c обусловлено воздействием на конденсатор переменного напряжения, в результате которого появляется изменяющееся магнитное поле. Функционирование конденсатора в электрических цепях описывается следующим выражением [3]:

$$U(t) = U(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{I(t)}{C} dt. \quad (10)$$

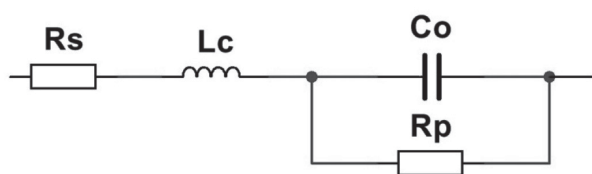


Рисунок 5. Эквивалентная схема замещения реального конденсатора на высоких частотах

Реальная индуктивность в виду конечного значения сечения провода обмотки всегда имеет паразитную активную составляющую — сопротивление потерь провода обмотки R_s (рисунок 6). С повышением частоты переменного напряжения в индуктивности образуются переменное электрическое и магнитное поля. Вследствие этого возникает ЭДС самоиндукции. Наличие ЭДС самоиндукции способствует появлению переменного элек-

трического поля, в результате чего между витками индуктивности образуется ток смещения. Потери в ферромагнитном сердечнике на схеме замещения реальной индуктивности обозначены R_p , а межвитковая емкость индуктивности обозначена $C_{вит}$.

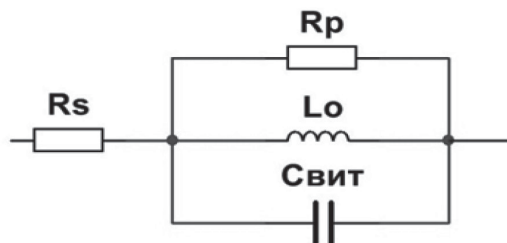


Рисунок 6. Эквивалентная схема замещения реальной индуктивности на высоких частотах

Параметры катушки индуктивности описываются следующими выражениями:

$$U_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt}; \quad (11)$$

$$I(t) = \frac{1}{L} \frac{dI(t)}{dt} \cdot \int_0^t U_L(\tau) d\tau. \quad (12)$$

Для измерений реактивных компонентов в настоящее время промышленностью выпускаются следующие модели RLC -измерителей [4]: RLC MIC-4070D, RLC E7-22, измерение осуществляется на частотах 120 Гц и 1 КГц; МТ 4080А и МТ 4080D измерение осуществляется на частотах 100 Гц, 120 Гц, 1кГц, 10 кГц; МТ 4080D измерение осуществляется на частотах 100 кГц; LCR 816 измерение осуществляется на частотах 2 кГц; LCR 817 измерение осуществляется на частотах 10 кГц; LCR 827 измерение осуществляется на частотах 10 кГц; LCR 819 измерение осуществляется на частоте 100 кГц; LCR 829 измерение осуществляется на частоте 100 кГц; E7-20 измерение осуществляется в диапазоне частот 25-999 Гц с шагом 1 Гц и 0,1-1 МГц с шагом 1 кГц.

Наибольший интерес для настоящих исследований представляет собой «цифровой измеритель иммитанса E7-20. RLC -измеритель E7-20 функционирует при классе точности 0,1 в диапазоне частот 25-999 Гц при шаге измерений 1 Гц и в диапазоне частот 0,1-1 МГц при шаге измерений 1 кГц. RLC -измеритель E7-20 предназначен для измерения как реактивных сопротивлений,

так и параметров емкостей, катушек индуктивности и сопротивлений. К недостаткам RLC-измерителя E7-20 можно отнести только не достаточно широкий частотный диапазон измерений.

С позиции традиционных видов измерений вышеперечисленные RLC-измерители обладают достаточно высокой точностью измерений и в большинстве случаев удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Но в ряде случаев, когда при исследовании параметров электронных устройств необходима подробная информация в широком диапазоне измеряемых частот, то вышеперечисленные RLC-измерители не могут быть использованы при построении частотных характеристик реактивных компонентов исследуемых электрических цепей; все они имеют ограниченное количество частот, на которых осуществляются измерения.

Для решения задачи построения частотных характеристик реактивных компонентов и определения их параметров нами разработан Z-анализатор составляющих комплексного сопротивления (положительное решение о выдаче патента на изобретение № 20170132.1 от 31 мая 2018 г.) [5].

Целью проектирования Z-анализатора составляющих комплексного сопротивления является создание измерителя реактивных компонентов, позволяющих анализировать частотные характеристики реактивных компонентов в широком диапазоне частот. Разработанный Z-анализатор составляющих комплексного сопротивления относится к технике электро-радиоизмерений и может быть использован при построении частотных характеристик реактивных компонентов электрических цепей (рисунок 7). Прототипом разработанного Z-анализатора составляющих комплексного сопротивления является RLC-измеритель E7-20 (разработка Минского научно-исследовательского приборостроительного института).

Выполнение поставленной задачи в данном исследовании решается за счет использования в приборе трех управляемых генераторов НЧ, ВЧ и СВЧ, коммутатора генераторов и двух масштабирующих усилителей по току и напряжению. Процесс измерения реактивных компонентов при помощи Z-анализатора составляющих полного комплексного сопротивления происходит следующим образом.

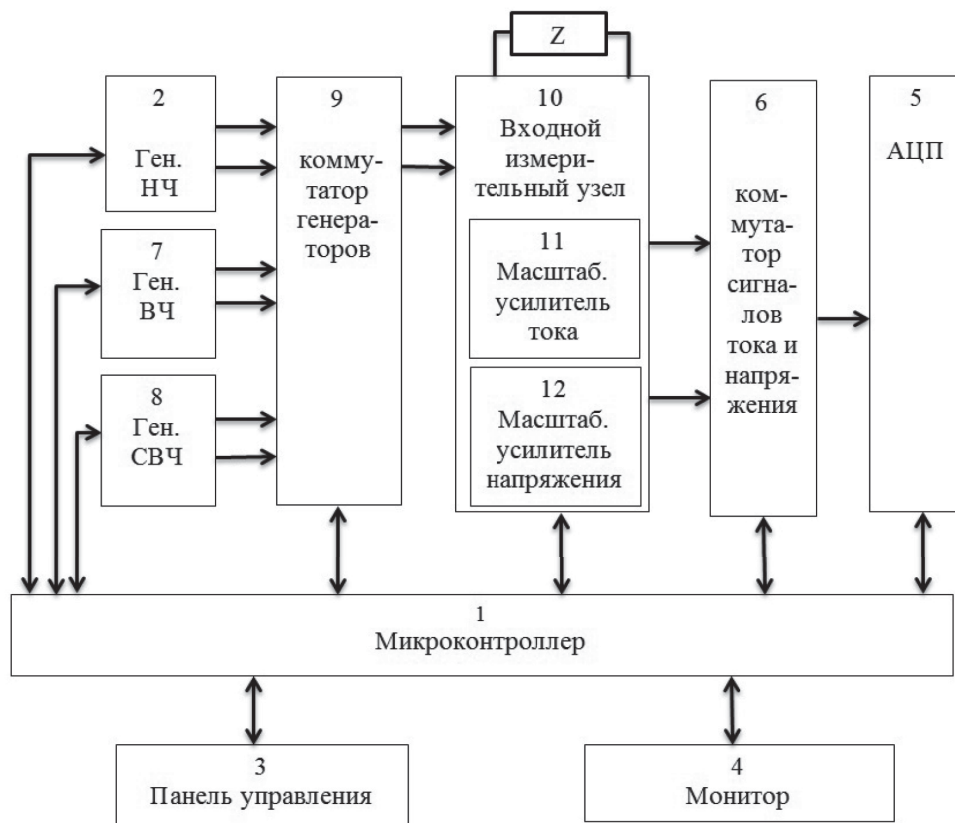


Рисунок 7. Структурная схема Z-анализатора составляющих комплексного сопротивления

Перед началом измерений устанавливается с панели управления 3 диапазон измерения: выборочно НЧ, ВЧ, СВЧ или весь диапазон от НЧ до СВЧ. Измеряемый компонент подключается к входному измерительному узлу 10. По команде микроконтроллера 1 напряжения рабочих частот с генератора 2 НЧ через коммутатор 9 поступает на вход входного измерительного узла 10. В соответствии с сигналами управления, поступающими с микроконтроллера 1, генератор 2 НЧ меняет плавно частоту выходного сигнала от минимального до максимального своего значения. Генератор 2 НЧ генерирует одновременно два напряжения: с первого выхода генератора — синусоидальное, а со второго — прямоугольной формы. При этом фронт сигнала прямоугольной формы совпадает с моментом перехода синусоидального напряжения через ноль. Сигнал, прошедший с генератора 2 НЧ через коммутатор 9, проходит через измеряемый компонент и преобразуется во входном измерительном узле 10 в сигнал, пропорциональный току, протекающему через измерительный объект,

и в сигнал, пропорциональный напряжению на нем. Далее с помощью коммутатора сигналов тока и напряжения 6 сигналы с выхода входного измерительного узла 10 подаются для оцифровки на вход АЦП 5, после чего подаются для окончательной обработки на микроконтроллер 1. По завершению цикла обработки сигналов всего рабочего диапазона частот генератора 2 НЧ микроконтроллер дает сигналы на обработку сигналов рабочих частот генератора 7 ВЧ и генератора 8 СВЧ. Результаты окончательной обработки сигналов в микроконтроллере 1 отображаются на мониторе 4.

Выводы

1. Расширенный частотный диапазон измерения реактивных составляющих полного сопротивления получен за счет введения в устройство трех генераторов НЧ, ВЧ и СВЧ.
2. Увеличение точности измерений получено за счет введения двух самостоятельно работающих масштабирующих усилителей тока и напряжения.

Список литературы

1. Ольшовец П. Модификация косвенных методов определения параметров электрических двухполюсников // Приборы и методы измерений. 2014. № 2 (9). Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_23217479_97110268.pdf.
2. Математические модели компонентов. Заглавие с экрана. Режим доступа. <https://studfiles.net/preview/6145699/page:3>.
3. Конденсатор электрический. Принцип работы. Емкость. Математическая модель. Схемы. Типы, виды, категории, классификация. Заглавие с экрана. Режим доступа. <http://gyrator.ru/circuitry-capacitor>.
4. Дедюхин А.А. Обзор современных измерителей импеданса. (Измерители RLC). Заглавие с экрана. Режим доступа. <https://prist.ru/info/articles/lcr-meters.htm>.
5. Z-анализатор составляющих комплексного сопротивления / Цыбов Н.Н., Шаршеналиев Ж.Ш. Заявка на изобретение № 20170132.1 от 06 декабря 2017 г. Положительное решение о выдаче патента от 31.05.2018 г.

References

1. Ol'shovets P. Modification of Indirect Methods for Determining the Parameters of Electric Two-Terminal. *Instruments and Methods of Measurement*, 2014, No. 2 (9). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_23217479_97110268.pdf. [in Russian].
2. *Mathematical Models of Components*. Zaglavie s ekrana. Available at: <https://studfiles.net/preview/6145699/page:3>. [in Russian].
3. *Electric Capacitor. Principle of Operation. Capacity. Mathematical Model. Scheme. Types, Types, Categories, Classification*. Zaglavie s ekrana. Available at: <http://gyrator.ru/circuitry-capacitor>. [in Russian].
4. Dedyukhin A.A. *Overview of Modern Impedance Meters. (RLC Meters)*. Zaglavie s ekrana. Available at: <https://prist.ru/info/articles/lcr-meters.htm>. [in Russian].
5. Tsybov N.N., Sharshenaliev Zh.Sh. *Z-Analyzer of Components of Complex Resistance*. Application for Invention No. 20170132.1 dd. December 6, 2017. Positive Decision on Granting a Patent dd. May 31, 2018. [in Russian].

ОБ АВТОРАХ

Абдрахманов Вали Хызырович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: awali@inbox.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Астафьев Дмитрий Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электротехнологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет», доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», e-mail: dim-as82@yandex.ru, г. Челябинск, Российская Федерация

Бабикова Наталья Львовна

кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: gumerova_m@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Бухаров Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, заместитель начальника службы — начальник отдела, Служба автоматизированных систем диспетчерского управления, Филиал АО «Системный оператор Единой энергетической системы» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Иркутской области», Иркутск, Российская Федерация

Важаев Константин Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: vazhdaevk@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Возмилов Александр Григорьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», e-mail: vozmiag44@rambler.ru, г. Челябинск, Российская Федерация

Гареев Рустам Ильдусович

старший преподаватель кафедры электромеханики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: gumerova_m@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Горбатков Михаил Викторович

аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Горбунов Антон Сергеевич

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электромеханики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: freizer-anton@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Гумерова Марина Булатовна

кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: gumerova_m@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Дементьев Сергей Сергеевич

аспирант кафедры электротехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», e-mail: c165tc34@yandex.ru, г. Волгоград, Российская Федерация

Дунаев Дмитрий Иванович

инженер 2 категории, Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный ядерный центр – Всероссийский научный исследовательский институт экспериментальной физики», e-mail: dunaeff.dima2015@yandex.ru, г. Саров, Российская Федерация

Ефанов Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и биомедицинские технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: efanov@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Звездакова Ольга Владиленовна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электротехнологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет», доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», e-mail: dim-as82@yandex.ru, г. Челябинск, Российская Федерация

Зикий Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» Института компьютерных технологий и информационной безопасности, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: zikiy50@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Зламан Павел Николаевич

ведущий инженер-конструктор Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Ишмияров Арсен Арамаисович

младший научный сотрудник кафедры телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: airwolf91@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Камалов Тимур Ильдусович

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: linenko-bsau@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Киреева Надежда Анатольевна

кандидат исторических наук, доцент кафедры «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: kireeva1211@yandex.ru, г. Салават, Российская Федерация

Крымский Виктор Григорьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: vikrymsky@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Линенко Андрей Владимирович

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: linenko-bsau@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Мельников Александр Викторович

заведующий лабораторией кафедры «Электрооборудование и электротехнологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет», e-mail: dim-as82@yandex.ru, г. Челябинск, Российская Федерация

Мешков Иван Константинович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Мукаева Вета Робертовна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Теоретические основы электротехники», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: veta_mr@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Парфенов Евгений Владимирович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: evparfenov@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Пархомчук Георгий Евгеньевич

студент энергетического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет», e-mail: dim-as82@yandex.ru, г. Челябинск, Российская Федерация

Породзинский Игорь Александрович

кандидат технических наук, начальник технологического отдела, ООО «ГрафитЭл — Московский электродный завод», г. Москва, Российская Федерация

Рогинская Любовь Эммануиловна

доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: freizer-anton@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Родионов Артем Сергеевич

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: artrodionov@mail.ru, г. Салават, Российская Федерация

Салихов Ренат Баязитович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: salikhovrb@ua.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Сафиуллина Розалина Раилевна

магистрант кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: usts@rusoil.net, г. Уфа, Российская Федерация

Саяпова Линера Радиковна

аспирант кафедры «Электроника и биомедицинские технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: bezdna.06@list.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Султанов Альберт Ханович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Таназлы Иван Николаевич

заместитель генерального директора, ЗАО «НПО «Параллель», e-mail: freizer-anton@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Фаррахов Рузиль Галиевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: frg1982@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Фархутдинов Рамиль Ильдарович

студент кафедры «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: tattin76@mail.ru, г. Салават, Российская Федерация

Халилов Булат Радикович

ассистент кафедры «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: linenko-bsau@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Хусаинов Ильнар Рамилевич

студент кафедры «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: tattin76@mail.ru, г. Салават, Российская Федерация

Цыбов Николай Николаевич

кандидат технических наук, заведующий лабораторией электронного моделирования, Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, e-mail: Nikolay_research@mail.ru, г. Бишкек, Республика Кыргызстан

Шапиро Семен Вольфович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры медицинской физики с курсом информатики, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный медицинский университет», e-mail: svshap@ufacom.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Шилин Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», e-mail: c165tc34@yandex.ru, г. Волгоград, Российская Федерация

Шило Дмитрий Валентинович

кандидат технических наук, заместитель генерального директора по технологическому развитию, ООО «ГрафитЭл–Московский электродный завод», e-mail: freizer-anton@yandex.ru, г. Москва, Российская Федерация

Юшкова Оксана Алексеевна

кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: gumerova_m@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

AbdrakhmanovVali Kh.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: awali@inbox.ru, Ufa, Russian Federation

Astafev Dmitriy V.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Equipment and Electrotechnology Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Ural State Agrarian University», Assistant Professor of Automobile Transport Chair, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University (National Research University)», e-mail: dim-as82@yandex.ru, Chelyabinsk, Russian Federation

Babikova Natalya L.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: gumerova_m@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Bukharov Dmitry S.

Cand. Sci. Tech., Deputy Head of Service–Head of Department, Service of Automated Dispatch Management Systems, Branch of JSC «System Operator of the Unified Energy System» «Regional Dispatch Management of the Energy System of the Irkutsk Region», Irkutsk, Russian Federation

Dementyev Sergey S.

Post-Graduate Student of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University», e-mail: c165tc34@yandex.ru, Volgograd, Russian Federation

Dunaev Dmitriy I.

Engineer of 2 Category, Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics», e-mail: dunaeff.dima2015@yandex.ru, Sarov, Russian Federation

Efanov Vladimir N.

Dr. Sci. Tech., Professor of Electronics and Biomedical Technologies Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: efanov@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Farkhutdinov Ramil I.

Student of General Scientific Disciplines Chair, General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: tattin76@mail.ru, Salavat, Russian Federation

Farrakhov Ruzil G.

Cand. Sci. Tech., Associated Professor, Assistant Professor of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: frg1982@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Gareev Rustam I.

Senior Lecturer of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: gumerova_m@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Gorbatkov Mikhail V.

Post-Graduate Student of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: veta_mr@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Gorbunov Anton S.

Cand. Sci. Tech., Senior Lecturer of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: freizer-anton@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Gumerova Marina B.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: gumerova_m@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Ishmiyarov Arsen A.

Junior Researcher of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: airwolf91@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Kamalov Timur I.

Cand. Sci. Tech., Senior Lecturer of Power Supply and Use of Electrical Energy in Agriculture Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: linenko-bsau@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Khalilov Bulat R.

Assistant of Power Supply and Use of Electrical Energy in Agriculture Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: linenko-bsau@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Khusainov Ilnar R.

Student of General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: tattin76@mail.ru, Salavat, Russian Federation

Kireeva Nadezhda A.

Cand. Sci. H., Assistant Professor of General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: kireeva1211@yandex.ru, Salavat, Russian Federation

Krymsky Viktor G.

Dr. Sci. Tech., Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: vikrymsky@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Linenko Andrey V.

Dr. Sci. Tech., Professor of Electrical Machines and Electrical Equipment Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: linenko-bsau@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Melnikov Aleksandr V.

Head of the Laboratory of Electrical Equipment and Electrotechnology Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Ural State Agrarian University», e-mail: dim-as82@yandex.ru, Chelyabinsk, Russian Federation

Meshkov Ivan K.

Cand. Sci. Tech., Associated Professor, Assistant Professor of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Mukaeva Veta R.

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: veta_mr@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Parfenov Evgeny V.

Dr. Sci. Tech., Associated Professor, Professor of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: evparfenov@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Parkhomchuk Georgiy E.

Student of Energy Faculty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Ural State Agrarian University», e-mail: dim-as82@yandex.ru, Chelyabinsk, Russian Federation

Porodzinsky Igor A.

Cand. Sci. Tech., Head of Technology Department, GrafiteI—Moscow Electrode Plant LLC, e-mail: freizer-anton@yandex.ru, Moscow, Russian Federation

Rodionov Artem S.

Cand. Sci. Phys.-Math., Assistant Professor of General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: artrodionov@mail.ru, Salavat, Russian Federation

Roginskaya Ljubov E.

Dr. Sci. Tech., Prof. of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: freizer-anton@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Safiullina Rosalina R.

Undergraduate of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: usts@rusoil.net, Ufa, Russian Federation

Salikhov Renat B.

Dr. Sci. Phys.-Math., Professor, Head of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: salikhovrb@ya.ru, Ufa, Russian Federation

Sayapova Linera R.

Post-Graduate Student of Electronics and Biomedical Technologies Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: bezdna.06@list.ru, Ufa, Russian Federation

Shapiro Semen V.

Dr. Sci. Tech., Professor, Professor of Medical Physics with Computer Science Course Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Medical University», e-mail: svshap@ufacom.ru, Ufa, Russian Federation

Shilin Aleksandr N.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University», e-mail: c165tc34@yandex.ru, Volgograd, Russian Federation

Shilo Dmitriy V.

Cand. Sci. Tech., Deputy General Director for Technological Development, GrafitEl-Moscow Electrode Plant LLC, e-mail: freizer-anton@yandex.ru, Moscow, Russian Federation

Sultanov Albert Kh.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Tanazly Ivan N.

Deputy General Director, NPO Parallel, CJSC, e-mail: freizer-anton@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Tsybov Nikolay N.

Cand. Sci. Tech., Head of Electronic Modeling Laboratory, Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named of N. Isanov, e-mail: Nikolay_research@mail.ru, Bishkek, Republic of Kyrgyzstan

Vazhdaev Konstantin V.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Water Supply and Sewage Water Disposal Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: vazhdaevk@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Vozmilov Aleksandr G.

Dr. Sci. Tech., Professor of Automobile Transport Chair, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University (National Research University)», e-mail: vozmiag44@rambler.ru, Chelyabinsk, Russian Federation

Yushkova Oksana A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: gumerova_m@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Zikiy Anatoliy N.

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher, Assistant Professor of Information Security of Telecommunication Systems Department, Institute of Computer Technologies and Information Security, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: zikiy50@mail.ru, Taganrog, Russian Federation

Zlaman Pavel N.

Leading Design Engineer, Scientific Design Bureau of Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: otDel24d@nkbmius.ru, Taganrog, Russian Federation

Zvezdakova Olga V.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Equipment and Electrotechnology Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «South Ural State Agrarian University», Assistant Professor of Automobile Transport Chair, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University (National Research University)», e-mail: dim-as82@yandex.ru, Chelyabinsk, Russian Federation

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГНТУ» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц. Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.

Requirements for the materials, provided for publication in the journal:

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSBEI HE «USPTU» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

Memo to authors

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («» or "").

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers. References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.