

ISSN 1999-5458

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 1, т. 11, 2015



Electrical and data processing facilities and systems

№ 1, v. 11, 2015



Подписной индекс:
91824 в каталоге «Пресса России»

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

УГУЭС

№ 1, т. 11, 2015

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

Учредитель

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса»

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций» (решение президиума Высшей аттестационной комиссии от 2 марта 2012 года).
Международный стандартный серийный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

С.В. Шапиро – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



Зам. главного редактора:

Ш.З. Валиев – канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



Члены редакционной коллегии:

В.М. Артюшенко – д-р техн. наук, проф.

ГБОУ ВО МО «Финансово-технологическая академия» (Россия, г. Москва)



Б.М. Горшков – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Поволжский государственный университет сервиса» (Россия, г. Тольятти)



М.Ю. Доломатов – д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



В.Г. Крымский – д-р техн. наук, проф.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



В.Г. Кушнир – д-р техн. наук, проф. Костанайского

государственного университета им. Ахмета Байтурсынова (Казахстан, г. Костанай)



С.В. Павлов – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный авиационный технический университет» (Россия, г. Уфа)



Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



П.С. Серенков – д-р техн. наук, проф. Белорусского

национального технического университета (Белоруссия, г. Минск)



А.Ф. Романченко – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный

университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



М.А. Ураксеев – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный авиационный технический университет» (Россия, г. Уфа)



Н.А. Феоктистов – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ

ВО «Московский государственный университет дизайна и технологии» (Россия, г. Москва)



Ф.Ф. Хизбуллин – д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



П.И. Чередниченко – д-р техн. наук, проф.

Черниговского государственного технологического университета (Украина, г. Чернигов)



В.А. Шабанов – канд. техн. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный нефтяной технический университет» (Россия, г. Уфа)



Р.Б. Яруллин – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



И. Зицмане – д-р техн. наук, профессор Рижского

технического университета, эксперт научного совета Латвийской академии наук (Латвия, г. Рига)



Г.Д. Георгиев – д-р техн. наук, преподаватель

Технического университета (Болгария, г. Варна)



И.В. Пентегов – д-р техн. наук, профессор, вед. научный

сотр. Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины (Украина, г. Киев)



Б. Брудник – д-р техн. наук, вед. научн. сотр. Тель-

Авивского университета (Израиль, г. Тель-Авив)



Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.С. Некрасова

Подписка во всех отделениях связи: индекс 91824 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала – на сайте www.ugues.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-56127 от 15.11.2013 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2015

Адрес редакции: 450078, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Чернышевского, 145.

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 25.03.2015 г. Формат 60×80 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8. Тираж 1000 экз. Заказ № 16.

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.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND SERVICE



№ 1, v. 11, 2015

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

Founder:

Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Federal government budgetary educational institution of higher education
"Ufa state university of economics and service"

The journal is included in "The list of reviewed scientific journals and editions for publication of the main scientific results of theses" (decision of the Highest certification commission presidium of March 2, 2012).

International standard serial number ISSN 1999-5458.

Editorial board:

Editor-in-chief:

S.V. Shapiro – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Ufa state university of economics and service (Russia, Ufa)



Deputy editor-in-chief:

Sh.Z. Valiev – Cand. Sci.Tech., Dr. Sci. Econ., prof. of FSBEI HE Ufa state university of economics and service (Russia, Ufa)



Members of an editorial board:

V.M. Artyushenko – Dr. Sci.Tech., prof. of SBEI HE MR Financial and technological academy (Russia, Moscow)



B.M. Gorshkov – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Volga region state university of service (Russia, Tolyatti)



M.Yu. Dolomatov – Dr. Sci.Chem., prof. of FSBEI HE Ufa state university of economics and service (Russia, Ufa)



V.G. Krymsky – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Ufa state university of economics and service (Russia, Ufa)



V.G. Kushnir – Dr. Sci.Tech., prof. of Kostanaysky state university of Ahmet Baytursynov (Kazakhstan, Kostanay)



S.V. Pavlov – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Ufa state aviation technical university (Russia, Ufa)



R.R. Safin – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Ufa state university of economics and service (Russia, Ufa)



P.S. Serenkov – Dr. Sci.Tech., prof. of Byelorussian national technical university (Byelorussia, Minsk)



A.F. Romanchenko – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Ufa state university of economics and service (Russia, Ufa)



M.A. Urakseev – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Ufa state aviation technical university (Russia, Ufa)



N.A. Feoktistov – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Moscow state university of design and technology (Russia, Moscow)



F.F. Hizbullin – Dr. Sci.Chem., prof. of FSBEI HE Ufa state university of economics and service (Russia, Ufa)



P.I. Cherednichenko – Dr. Sci.Tech., prof. of Chernigov state technological university (Ukraine, Chernigov)



V.A. Shabanov – Cand. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Ufa state petroleum technological university (Russia, Ufa)



R.B. Yarullin – Dr. Sci.Tech., prof. of FSBEI HE Ufa state university of economics and service (Russia, Ufa)



I. Zicmane – Dr. Sci.Tech., prof. Riga Technical University, expert the Latvian Council of Science (Latvia, Riga)



G.D. Georgiev – Dr. Sci.Tech., lecturer Technical university (Bulgaria, Varna)



I.V. Pentegov – Dr. Sci.Tech., prof., leading researcher the E.O.Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Kiev)



B. Brudnik – Dr. Sci.Tech., leading researcher of Tel Aviv University (Israel, Tel Aviv)



Assistant editor: A.A. Mukhamadiev
Technical editor: S.S. Nekrasova

Subscription is available in all post offices: Postal code 91824 in the integrated catalog of the "Russian Press".

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 PI № PHS 77-56127 from 15.11.2013 given by Federal service of supervision in the scope of communication, information technologies and mass media.

© Ufa State University of Economics and Service, 2015

Publisher's address: 145 Chernishevskiy St., 145, Ufa, 450078.

Ph.: +7 (347) 228-91-38.

Signed for printing 25.03.2015. Format 60×80 1/8. Offset printing. 8 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order № 16.

The text of journal "Electrical and data processing facilities and systems" may be quoted with written permission of the publisher only.

Content is published as provided by authors.

Publisher's view may be different from that of the authors of the articles.

СОДЕРЖАНИЕ

Электротехнические комплексы и системы

<i>Огорелков Б.И., Татевосян А.С., Пимонова У.В., Поляков Д.А.</i> Экспериментальное исследование и математическое моделирование динамики электромагнита постоянного тока.....	5
<i>Хакимьянов М.И., Сираев Р.М., Крылов А.О.</i> Исследование влияния на энергопотребление скважинных насосов технологических и эксплуатационных параметров	15
<i>Кушинир В.Г., Кошкин И.В., Гайфуллин Г.З.</i> Определение сечения линий электропередачи в электрических сетях напряжением до 1000 В методом аппроксимации данных	20
<i>Яруллин Р.Б.</i> О регулируемом электроприводе техники сервиса	24
<i>Славутский А.Л.</i> Моделирование переходных режимов узла нагрузки с асинхронным двигателем в фазных координатах.....	38
<i>Карбельская И.В.</i> Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложными геометрическими параметрами	45
<i>Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р., Гайсин Б.М., Гумерова М.Б., Андроников Д.А.</i> Исследование характеристик автономных источников электроэнергии на основе фотоэлектрических модулей в условиях средних широт России	52
<i>Аипов Р.С., Акчурин С.В., Пугачев В.В.</i> Математическая модель вибропривода с линейным асинхронным двигателем	58
<i>Лопатин В.П., Ишимухамедов И.К.</i> Современное элегазовое электрооборудование подстанций систем электроснабжения и особенности его эксплуатации	63

Информационные комплексы и системы

<i>Козловский В.Н., Дебелов В.В., Пьянов М.А.</i> Электротехнический и программный комплекс управления двигателем внутреннего сгорания легкового автомобиля.....	73
<i>Андреанова А.В., Мешков И.К., Султанов А.Х.</i> Генерация многоканального сверхширокополосного сигнала для RoF систем.....	84
<i>Зотов К.Н., Кузнецов И.В., Салов А.С., Симбирцева Д.С., Стрельникова Л.В.</i> Разработка алгоритмов кластерного анализа концентрации абонентских устройств в системах мобильной связи.....	90

Метрология и информационно-измерительные устройства

<i>Ураксеев М.А., Левина Т.М., Шамаев Ф.Ф., Кулябин А.С.</i> Разработка волоконно-оптических систем для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования в СУБД с web-интерфейсом.....	97
<i>Федосов В.А., Августиневич А.В.</i> Виброакустическая техника для измерения уровня вибрации на производстве	103

Нанoeлектроника и квантовые информационные системы

<i>Денисова О.А.</i> Особенности распространения ультразвука в холестерических жидких кристаллах	109
<i>Доломатов М.Ю., Петров А.М., Рыжиков О.Л., Бахтизин Р.З.</i> Особенности фазовых переходов «диэлектрик-полупроводник» в многокомпонентных органических спиновых стеклах	117

Об авторах	122
-------------------------	-----

CONTENT

Electrical facilities and systems

<i>Ogorelkov B.I., Tatevosyan A.S., Pimonova U.V., Polyakov D.A.</i> Experimental research and mathematical modelling of dynamics of the electromagnet of the direct current	5
<i>Khakimyanov M.I., Siraev R.M., Krylov A.O.</i> Research of influence energy consumption for well pumps technological and operational parameters	15
<i>Kushnir V.G., Koshkin I.V., Gaifullin G.Z.</i> Definitions cross sections power lines in electric networks with voltage up 1000 V method of approximating the data	20
<i>Yarullin R.B.</i> About the regulated electric drive of technology of service	24
<i>Slavutski A.L.</i> Modeling transients in the load nodes containing the induction motors in phase coordinates	38
<i>Karabelskaya I.V.</i> Research the electric field of direct current systems with complex geometric parameters	45
<i>Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gaisin B.M., Gumerova M.B., Andronikov D.A.</i> Study of characteristics autonomous sources of electricity from photovoltaic modules under midlatitudes Russia	52
<i>Aipov R.S., Akchurin S.V., Pugachev V.V.</i> Mathematical model of vibratory drive with linear induction motor	58
<i>Lopatin V.P., Ishmukhamedov J.K.</i> Modern gas-insulated substations electric power systems and its operating features	63

Data processing facilities and systems

<i>Kozlovskiy V.N., Debelov V.V., Pianov M.A.</i> Electrical and software internal combustion engine control car	73
<i>Andrianova A.V., Meshkov I.K., Sultanov A.Kh.</i> Multichannel ultra-wideband signal generation for RoF systems	84
<i>Zotov K.N., Kuznetsov I.V., Salov A.S., Simbirtseva D.S., Strelnikova L.V.</i> Development of algorithms for analyzing the concentration of a cluster of subscriber devices in mobile communication systems.	90

Metrology and information-measuring devices

<i>Urakseev M.A., Levina T.M., Shamaev F.F., Kuliabin A.S.</i> Development of fiber-optic systems for recording, monitoring and forecast of high-voltage equipment operation in DBMS with web-interface	97
<i>Fedosov V.A., Avgustinovich A.V.</i> Vibro-acoustic technique for measuring the vibration level at the enterprises	103

Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Denisova O.A.</i> Features of ultrasound propagation in cholesteric liquid crystals	109
<i>Dolomatov M.Yu., Petrov A.M., Ryjikov O.L., Bakhtizin R.Z.</i> Features of the phase transition "insulator-semiconductor" in multicomponent organic spin glasses	117

About the authors	124
--------------------------------	-----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS



Огорелков Б.И.
Ogorelkov B.I.

кандидат технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»
Россия, г. Омск



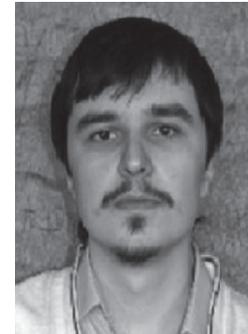
Татевосян А.С.
Tatevosyan A.S.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»
Россия, г. Омск



Пимонова У.В.
Pimonova U.V.

магистрант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»
Россия, г. Омск



Поляков Д.А.
Polyakov D.A.

аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»
Россия, г. Омск

УДК 621.316.53(075)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассматриваются результаты экспериментального исследования динамических характеристик электромагнита постоянного тока на разработанном лабораторном стенде, позволяющем обеспечить снятие времятоковой характеристики и измерение времени срабатывания при включении/отключении электромагнита с высокой точностью измерений благодаря использованию USB-осциллографа и 16-битного таймера микроконтроллера AVR Atmega 16, запрограммированного на работу с частотой 125 кГц. В качестве примера объектом исследования на лабораторном стенде является малогабаритный контактор серии. Приводится принципиальная электрическая схема лабораторного стенда и описание ее работы. Полученные на лабораторном стенде результаты исследования динамики электромагнита подтверждаются результатами математического моделирования путем решения нелинейной системы дифференциальных уравнений движения якоря электромагнита и электрического равновесия в цепи катушки в переходном процессе. Предложенная математическая модель динамики движения якоря электромагнита использует результаты численного расчета магнитного поля в комплексе программ Elcut при фиксированных значениях рабочего зазора в пределах хода якоря и аппроксимацию зависимости инверсной индуктивности катушки от хода якоря уравнением прямой линии. Реализация предложенного алгоритма в пакете Matlab/Simulink дает хорошее совпадение с экспериментальными данными, что подтверждает правомерность принятых допущений при построении модели динамики электромагнита.

Ключевые слова: электромагнит постоянного тока, лабораторный стенд, объект исследования, времятоковая характеристика малогабаритного контактора, время срабатывания, таймер на основе микро-

контроллера, математическая модель, уравнение движения якоря, уравнение электрического равновесия, нелинейная система дифференциальных уравнений, численный расчет магнитного поля, зависимость инверсной индуктивности катушки от хода якоря.

EXPERIMENTAL RESEARCH AND MATHEMATICAL MODELLING OF DYNAMICS OF THE ELECTROMAGNET OF THE DIRECT CURRENT

In article results of a pilot study of dynamic characteristics of an electromagnet of a direct current at the developed laboratory stand, allowing to provide removal of the time-current characteristic and measurement of time of operation at electromagnet inclusion/shutdown with high precision of measurements thanks to USB of an oscillograph and the 16-bit timer of the AVR Atmega 16 microcontroller programmed for work with a frequency of 125 kHz are considered. In article results of a pilot study of dynamic characteristics of an electromagnet of a direct current at the developed laboratory stand, allowing to provide removal of the time-current characteristic and measurement of time of operation at electromagnet inclusion/shutdown with high precision of measurements thanks to USB of an oscillograph and the 16-bit timer of the AVR Atmega 16 microcontroller programmed for work with a frequency of 125 kHz are considered. The offered mathematical model of dynamics of movement of an anchor of an electromagnet uses results of numerical calculation of a magnetic field in a complex of the Elcut programs at the fixed values of a working gap within a course of an anchor and approximation of dependence of inverse inductance of the coil from an anchor course the straight line equation. Realization of the offered algorithm in a Matlab/Simulink package gives good coincidence to experimental data that confirms legitimacy of the accepted assumptions at creation of model of dynamics of an electromagnet.

Key words: electromagnet of a direct current, the laboratory stand, object of research, the vremyatokovy characteristic of the small-sized contactor, operation time, the timer on the basis of the microcontroller, mathematical model, the equation of movement of an anchor, the equation of electric balance, nonlinear system of the differential equations, numerical calculation of a magnetic field, dependence of inverse inductance of the coil on an anchor course.

Электромагниты постоянного тока по многим экономическим и техническим параметрам превосходят электромагниты переменного тока. Разнообразие конструктивных решений позволяет их легко приспособлять во многих устройствах к различным условиям работы, например, в промышленной автоматике, аппаратуре регулирования и защите. Широкое распространение электромагнитов постоянного тока требует от разработчиков и экспертов совершенствования методов их оптимального проектирования и экспериментального исследования. Несмотря на большой накопленный опыт в вопросах расчета, проектирования и испытаний электромагнитов постоянного тока [1–3, 10], нарастающая в последние десятилетия тенденция к использованию в исследованиях современных пакетов прикладных программ, новых методов измерительной техники на основе микроконтроллеров делает необходимым продолжение работ в этой области [4, 5, 9]. Достижение поставленных целей во многом зависит от успехов решения задачи динамики электромагнита постоянного тока.

Данная статья посвящена разработке лабораторного стенда и аппаратно-программного измерительного комплекса (АПИК) для исследования динамических характеристик электромагнита постоянного

тока. Дано сопоставление экспериментальных данных, полученных на лабораторном стенде, с результатами математического моделирования динамики электромагнита, выполненного с использованием пакетов программ Elcut 5.6 (профессиональная версия) и Matlab/Simulink [1, 2]. В комплексе программ Elcut приводится решение магнитостатической задачи расчета картин магнитного поля при различных фиксированных положениях якоря и определение зависимости инверсной индуктивности (величина обратной индуктивности) катушки электромагнита от хода якоря. В пакете Matlab/Simulink выполняется решение уравнений динамики электромагнита, которую с математической точки зрения можно охарактеризовать как линейную систему дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, имеющую три независимых переменных состояния (i – ток в катушке, v – скорость движения якоря, x – перемещение якоря).

В качестве объекта исследования динамики электромагнита постоянного тока в лабораторном стенде используется малогабаритный контактор постоянного тока серии КМИп-10910 – дистанционно управляемый коммутационный аппарат, позволяющий коммутировать мощные (в том числе индуктивные) нагрузки как переменного, так и постоянного

На рис. 3 обозначены: 1 – источник постоянного тока серии АКПП-1125; 2, 3 – кнопки управления с подсветкой ABLF-22 «Стоп» (красная) и «Пуск» (зеленая) соответственно; 4 – пластиковый корпус; 5 – ЖК-дисплей; 6 – автоматический выключатель серии ИЕК 47-29 2-пол. С25; 7 – малогабаритный контактор постоянного тока; 8 – промежуточное реле серии РП-25; 9 – USB-осциллограф; 10 – ПК.

Для питания ЖК-дисплея используется адаптер

преобразователя переменного тока напряжением 220 В в постоянный ток напряжением 5 В. Разъемы для подключения источника постоянного тока и адаптера размещаются на задней стенке пластикового корпуса лабораторного стенда. Работа лабораторного стенда (рис. 2) состоит из последовательности операций на включение и отключение контактора постоянного тока.

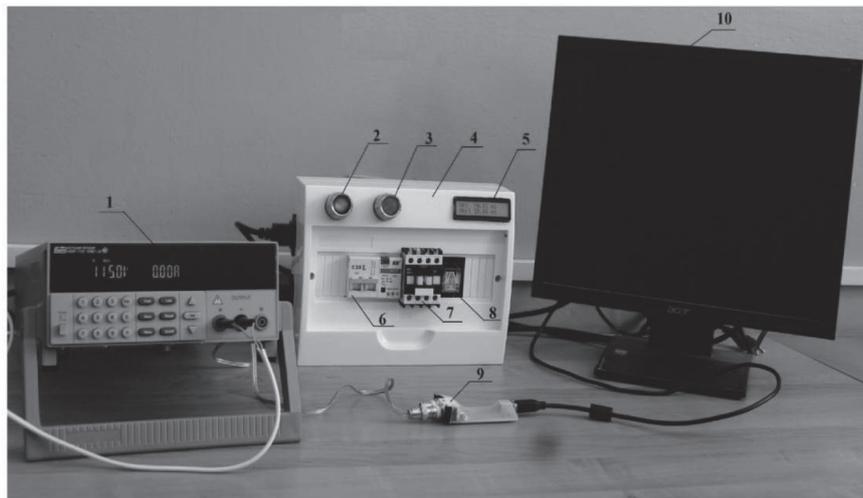


Рис. 3. Общий вид лабораторного стенда с внешними соединениями

Измерение времени срабатывания контактора при включении. При нажатии на кнопку SB1 напряжение от промышленной сети переменного тока напряжением 220 В поступает на катушку промежуточного реле KM1. Промежуточное реле KM1 срабатывает и замыкает свой блокировочный контакт KM1.1, шунтируя кнопку SB1, которую можно отпустить. Одновременно с этим происходит замыкание двух других контактов промежуточного реле – KM1.2 и KM1.3. При замыкании контакта KM1.2 питание от источника постоянного тока БП1 подается на катушку управления контактора KM2. При замыкании контакта KM1.3 на вход прерывания PD2(INT0) микроконтроллера поступает передний фронт импульса. В цепи катушки контактора KM2 при подаче постоянного напряжения на катушку управления возникает переходный процесс, характеризующийся изменением тока, ЭДС движения и перемещения якоря во времени. По окончании хода якоря контакты контактора KM2.1, KM2.2 и KM2.3 замыкаются. При их замыкании так же, как при замыкании контакта промежуточного реле KM1.3, на входы микроконтроллера PB0, PB1(INT2), PD3(INT1) соответственно приходит передний фронт импульса. Поскольку прерывание INT0 в микроконтроллере

запрограммировано для срабатывания на оба фронта импульса – INT1 – только на передний фронт, а INT2 – только на задний фронт, то после нажатия на кнопку SB1 срабатывают два прерывания микроконтроллера INT0 и INT1. Промежуток времени между срабатываниями этих прерываний определяет время срабатывания контактора на включение.

Измерение времени контактора при отключении. После нажатия на кнопку SB2 катушка промежуточного реле KM1 обесточивается, блокировочный контакт KM1.1, контакт KM1.2 в цепи питания катушки контактора KM2 и контакт KM1.3 размыкаются. После размыкания контакта KM1.3 задний фронт импульса поступает на вход прерывания PD2(INT0) микроконтроллера. При размыкании контакта KM1.2 катушка управления контактора KM2 теряет питание. Начинается переходный процесс, сопровождаемый изменением тока, ЭДС движения и перемещения якоря в исходное положение, соответствующее максимальному рабочему зазору, то есть значению $\delta_{н}$. С возвратом якоря в исходное состояние контакты KM2.1, KM2.2 и KM2.3 размыкаются. При этом на входы микроконтроллера PB0, PB1(INT2), PD3(INT1) соответственно поступает задний фронт импульса, срабатывают прерывания

INT0 и INT2 и время отключения измеряется как промежуток времени между срабатыванием этих прерываний. Для защиты от шумов на входах прерывания микроконтроллера и дребезга контактов используются резисторы R2÷R5. Вход PB0 используется для дополнительной защиты от дребезга контактов. Катушка управления контактора постоянно имеет значительную индуктивность. При ее отключении от источника постоянного тока могут возникать перенапряжения, опасные для изоляции катушки. Для защиты изоляции от перенапряжений параллельно катушке контактора KM2 включается полупроводниковый диод (на рис. 2 полупроводниковый диод не показан). Контактные пары новых серий оборудованы специальными полупроводниковыми сборками, обеспечивающими ограничение перенапряжений при отключении катушки управления контактора от источника постоянного тока.

На рис. 4 показана работа электронного таймера на микроконтроллере по измерению времени срабатывания контактора KM2 при его включении и отключении. Верхняя цифра на ЖК-дисплее соответствует времени срабатывания контактора на включение, нижняя – на отключение.

Измерение времени срабатывания контактора производится на 16-битном таймере микроконтроллера AVR Atmega16, запрограммированном на работу с частотой 125 кГц [6].

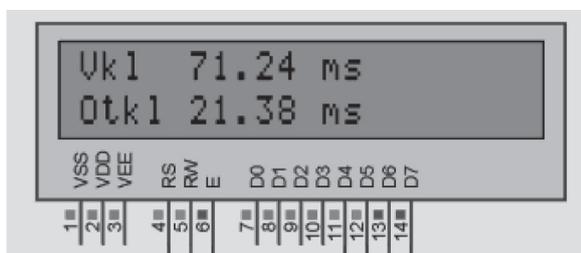


Рис. 4. Время включения (71,24 мс) и время отключения (21,38 мс) контактора на экране ЖК-дисплея

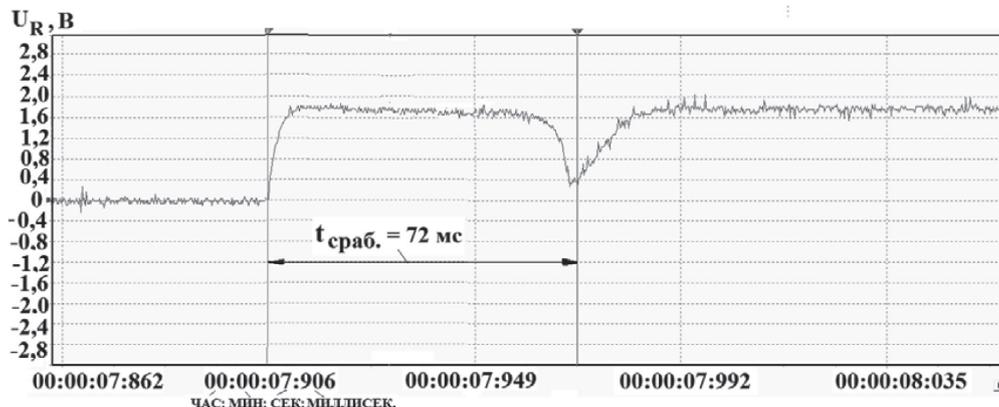


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на измерительном сопротивлении

В таком режиме электронным таймером можно измерять время до 0,52428 секунды с шагом в 8 мкс. Размер регистра таймера равен 65536. В этом легко убедиться на простых вычислениях. Время, затрачиваемое на один такт таймера:

$$\frac{1}{125000} = 8 \cdot 10^{-6} = 8 \text{ мкс.}$$

Количество тактов на 16-битном таймере:

$$2^{16} = 65536.$$

Максимально возможное измеряемое время:

$$8 \cdot 10^{-6} \cdot 65536 = 0,524288 \text{ с.}$$

При срабатывании прерываний INT0 и INT1 происходит считывание значений из регистра таймера TCNT1, после чего находится разность этих значений и переводится в миллисекунды. Допустим, что при срабатывании прерывания INT0 было считано значение $t_1^* = 500$, а при срабатывании прерывания INT1 – $t_2^* = 9500$, тогда время срабатывания будет (рис. 5):

$$t_{\text{сраб}} = (t_2^* - t_1^*) \cdot 8 \cdot 10^{-6} = (9500 - 500) \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 72 \text{ мс.}$$

Данные осциллограммы программным приложением USB-осциллографа [7] сохраняются в текстовом файле. После обработки текстового файла в пакете Excel по значениям напряжений на измерительном сопротивлении рассчитываются по закону Ома значения тока в соответствующие моменты времени, по ним на графике (рис. 6) строится времятоковая характеристика контактора постоянного тока.

Проведем сопоставление экспериментальных данных, полученных на лабораторном стенде, с результатами математического моделирования динамики контактора постоянного тока. При построении математической модели контактора примем следующие допущения:

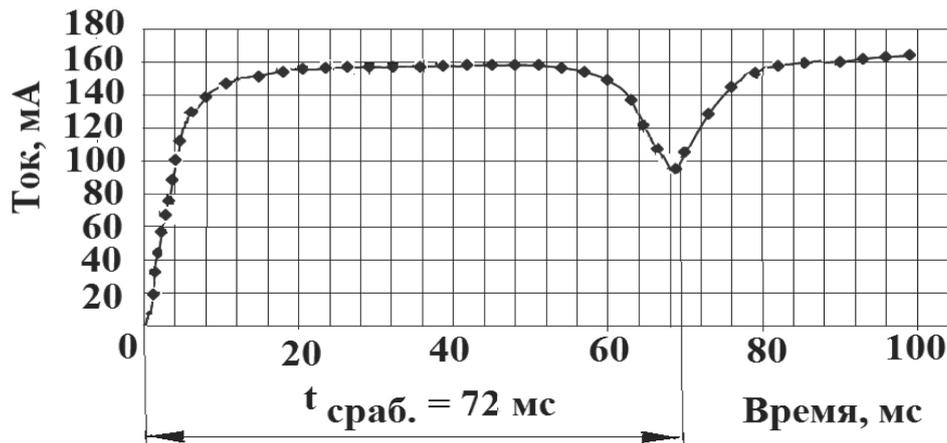


Рис. 6. Времятоковая характеристика контактора при его включении

1. Магнитное поле электромагнита обычно является трехмерным, однако часто его анализ с достаточной для практики точностью удается выполнить путем решения задачи в двухмерной постановке, при допущении о плоскопараллельном или осесимметричном характере распределения магнитного поля. Принимая во внимание, что исследуемая конструкция контактора не имеет осевую симметрию, магнитное поле контактора будем считать плоскопараллельным.

2. Влияние вихревых токов в короткозамкнутых алюминиевых кольцах, запрессованных в якорь, проявляется при малых рабочих зазорах в конце хода якоря, поэтому при включении контактора их можно не учитывать.

3. По результатам расчета картин магнитного поля в комплексе программ и индуктивности катушки контактора при фиксированных значениях рабочего зазора в пределах хода якоря зависимость инверсной индуктивности катушки (величина обратная индуктивности) с достаточной для практики точностью может быть представлена уравнением прямой линии:

$$\Gamma(x) = L^{-1}(x) = a - bx, \quad (1)$$

где $a = \frac{1}{L_H}$, $b = \frac{1}{L_H \delta_H}$ — коэффициенты полинома первого порядка; L_H — начальная индуктивность катушки при перемещении якоря $x = 0$; δ_H — начальный рабочий зазор.

Выражение (1) может быть использовано для расчета электромагнитной силы с учетом выпучивания магнитного потока в рабочем зазоре, характеристик используемых магнитных материалов и истинной геометрии магнитной системы контактора:

$$F_{ЭМ} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{b}{(a - bx)^2}. \quad (2)$$

Учитывая силы, действующие на якорь, получим следующее уравнение движения якоря, пренебрегая силой трения:

$$m_{я} \frac{dv}{dt} = F_{ЭМ} + P_{я} - F_{пр}, \quad (3)$$

где $F_{пр} = F_0 + c \cdot x$ — сила сжатия возвратной пружины; F_0 — сила начального сжатия возвратной пружины; c — жесткость пружины; x — перемещение якоря; v — скорость якоря; $P_{я} = m_{я} \cdot g$ — вес якоря; $m_{я}$ — масса подвижных частей, приведенных к якорю; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Полная система уравнений, характеризующая изменение тока и движение якоря при переходном процессе, возникающем с момента подачи на катушку постоянного напряжения источника питания, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} U = R \cdot i + \frac{1}{(a - bx)} \frac{di}{dt}; \\ m_{я} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{b}{(a - bx)^2} - (F_0 + c \cdot x) + m_{я} \cdot g, \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{cases} \quad (4)$$

Для решения полученной системы уравнений необходимо задаться начальными условиями:

а) до начала движения якоря в момент времени $t = 0$:

$$x = 0, i = 0, v = 0, \frac{dv}{dt} = 0. \quad (5)$$

Требуется определить $\rightarrow i(t)$, время трогания $t_{тр}$, ток трогания $i_{тр}$;

б) в процессе движения якоря время $t_{тр} \leq t \leq t_{ср}$, перемещение якоря $0 \leq x \leq x_K = \delta_H - \delta_K$, в момент времени $t = t_{ср}$:

$$x = 0, i = i_{тр}, v = 0, \frac{dv}{dt} = 0. \quad (6)$$

Требуется определить $\rightarrow i(t), v(t), \frac{dv(t)}{dt}, i(t_{дв}),$
 время движения $t = t_{дв} = t_{сп} - t_{тр};$

в) при остановке якоря в момент времени срабатывания контактора на включение $t_{сп} = t_{тр} + t_{дв};$

$$x = x_k = \delta_n - \delta_k, \quad v = 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0. \quad (7)$$

Требуется определить $\rightarrow i(t).$

Подставляя начальные условия в уравнение движения якоря, можно определить ток трогания:

$$i_{тр} = a \sqrt{\frac{2(F_0 - m_{я}g)}{b}}. \quad (8)$$

При этом в системе уравнений (4) решению подлежит только первое уравнение, из которого можно найти время трогания:

$$t_{тр} = T_n \ln\left(\frac{k_3}{k_3 - 1}\right), \quad (9)$$

где $T_n = \frac{L_n}{R} = \frac{1}{aR}$ – значение постоянной времени при $x = 0$ (до начала движения якоря); $k_3 = \frac{I_y}{i_{тр}}$ – коэффициент запаса; $I_y = \frac{U}{R}$ – установившееся значение

тока в катушке контактора при его включении на постоянное напряжение источника питания.

Система дифференциальных уравнений (4) в форме Коши имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = (a - bx) \cdot (U - Ri) \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_{я}} \left[\frac{1}{2} i^2 \frac{b}{(a - bx)^2} - (F_0 + cx) + m_{я}g \right] \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{cases} \quad (10)$$

Решение системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (10) для расчета динамики контактора основывается на знании зависимости инверсной индуктивности катушки $\Gamma(x) = L^{-1}(x)$ от хода якоря. Для определения коэффициентов a, b зависимости (1) в рабочем окне Elcut построена расчетная область плоскопараллельной модели магнитного поля контактора (рис. 7). Картина магнитного поля контактора при фиксированном значении рабочего зазора приведена на рис. 8.

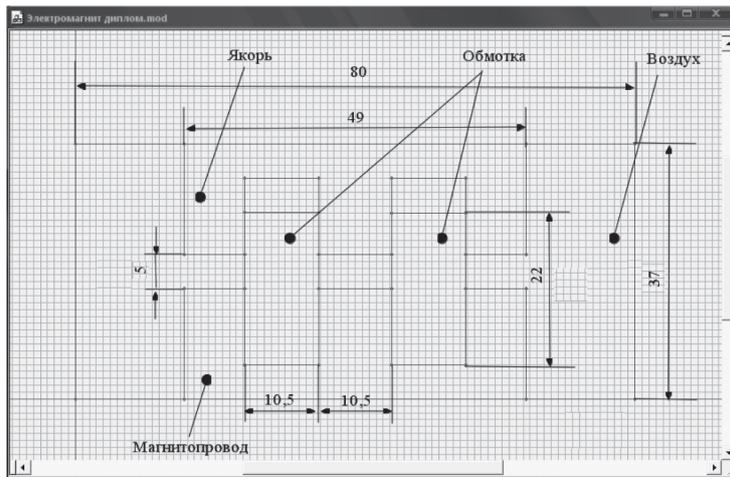


Рис. 7. Расчетная область контактора в рабочем окне

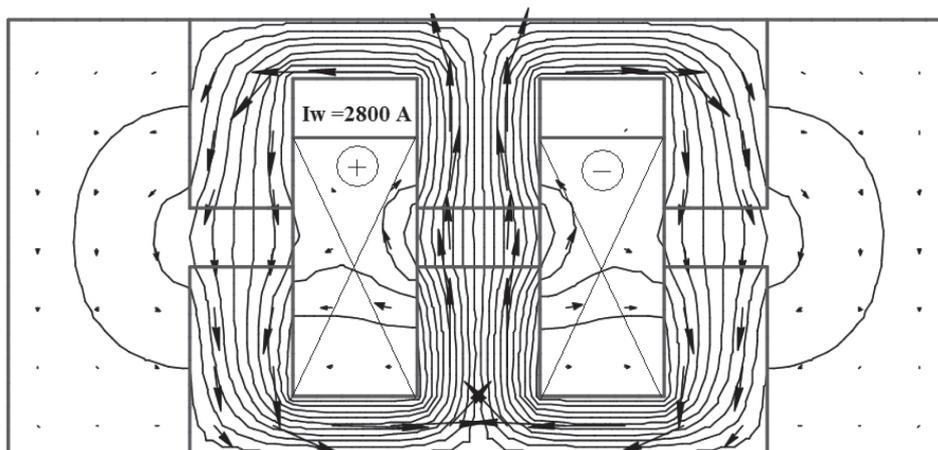


Рис. 8. Картина магнитного поля контактора постоянного тока при зазоре $\delta = 5$ мм

По окончании расчета картины магнитного поля контактора с помощью «Мастера индуктивности» в комплексе программ Elcut были определены значения запаса энергии магнитного поля $W = 0,129$ Дж и индуктивности катушки контактора $L = 1,0333$ Гн при рабочем зазоре $\delta = 5$ мм. По рассчитанным картинам магнитных полей при фиксированных значениях рабочего зазора определена зависимость

инверсной индуктивности катушки от хода якоря (рис. 9). На графике расчетные значения инверсной индуктивности катушки обозначены буквами A0, A1, ..., A7. Между расчетными точками на графике показана аппроксимирующая прямая линия, уравнение которой

$$\Gamma(x) = L^{-1}(x) = a - bx = 1,32 - 130 \cdot x.$$

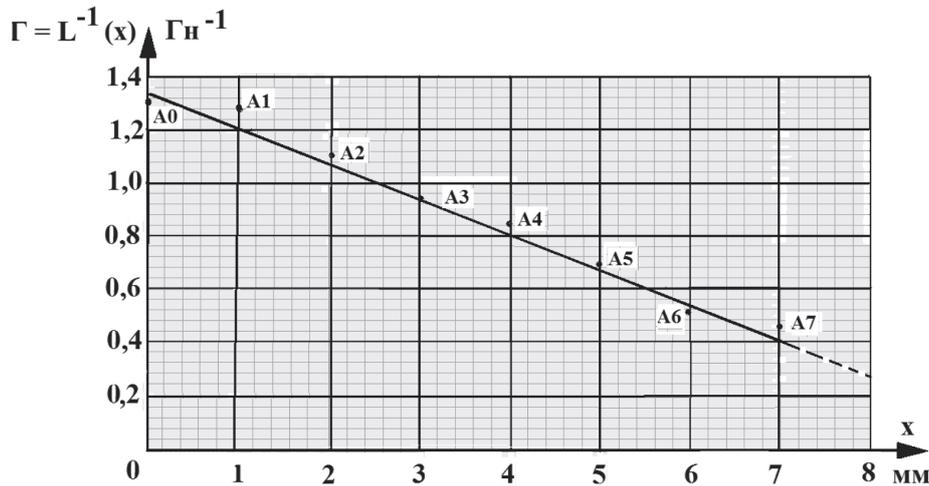


Рис. 9. Аппроксимация зависимости уравнением прямой линии

Соблюдая правила построения модели в пакете Matlab/Simulink, система дифференциальных уравнений динамики контактора постоянного тока (10) преобразуется в структурную схему (рис. 10), в которой отдельные фрагменты Simulink-модели оформлены в виде отдельных блоков. Благодаря использованию Subsystem-подсистем в Simulink-модели уменьшается количество одновременно отображаемых блоков на экране, что облегчает восприятие модели. При этом можно создавать фрагменты модели по отдельности, что повышает технологичность ее создания [9]. По названию фрагментов Simulink-модели на структурной схеме можно понять функции, которые они выполняют, а именно: исходные данные; расчет времени трогания; логика; расчет временных зависимостей тока, перемещения и скорости якоря; расчет временных зависимостей электромагнитной силы и потокосцепления.

Наблюдение временных зависимостей тока, перемещения, скорости якоря, потокосцепления, электромагнитной силы от времени производится с помощью осциллографа (Scope). Графики динамических характеристик контактора постоянного тока приведены на рис. 11.

Выводы

1. Предлагаемый лабораторный стенд для исследования динамических характеристик электро-

магнита позволяет обеспечить снятие времятоковой характеристики и измерение времени срабатывания контактора при включении/отключении с высокой точностью измерений благодаря использованию USB-осциллографа и 16-битного таймера микроконтроллера AVR Atmega 16, запрограммированного на работу с частотой 125 кГц.

2. Представленная математическая модель динамики движения якоря электромагнита, использующая результаты численного расчета магнитного поля в комплексе программ Elcut и аппроксимацию зависимости инверсной индуктивности катушки от хода якоря уравнением прямой линии, дает возможность построить алгоритм решения нелинейной системы дифференциальных уравнений динамики электромагнита при переходном процессе.

3. Реализация указанного в пакете Matlab/Simulink дает хорошее совпадение с результатами расчета с экспериментальными данными, полученными на лабораторном стенде, что позволяет судить об эффективности разработанного алгоритма и правомерности принятых допущений.

Представленная статья выполнена в рамках работы кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета по разработке программного обеспечения лабораторных стендов, оснащенных

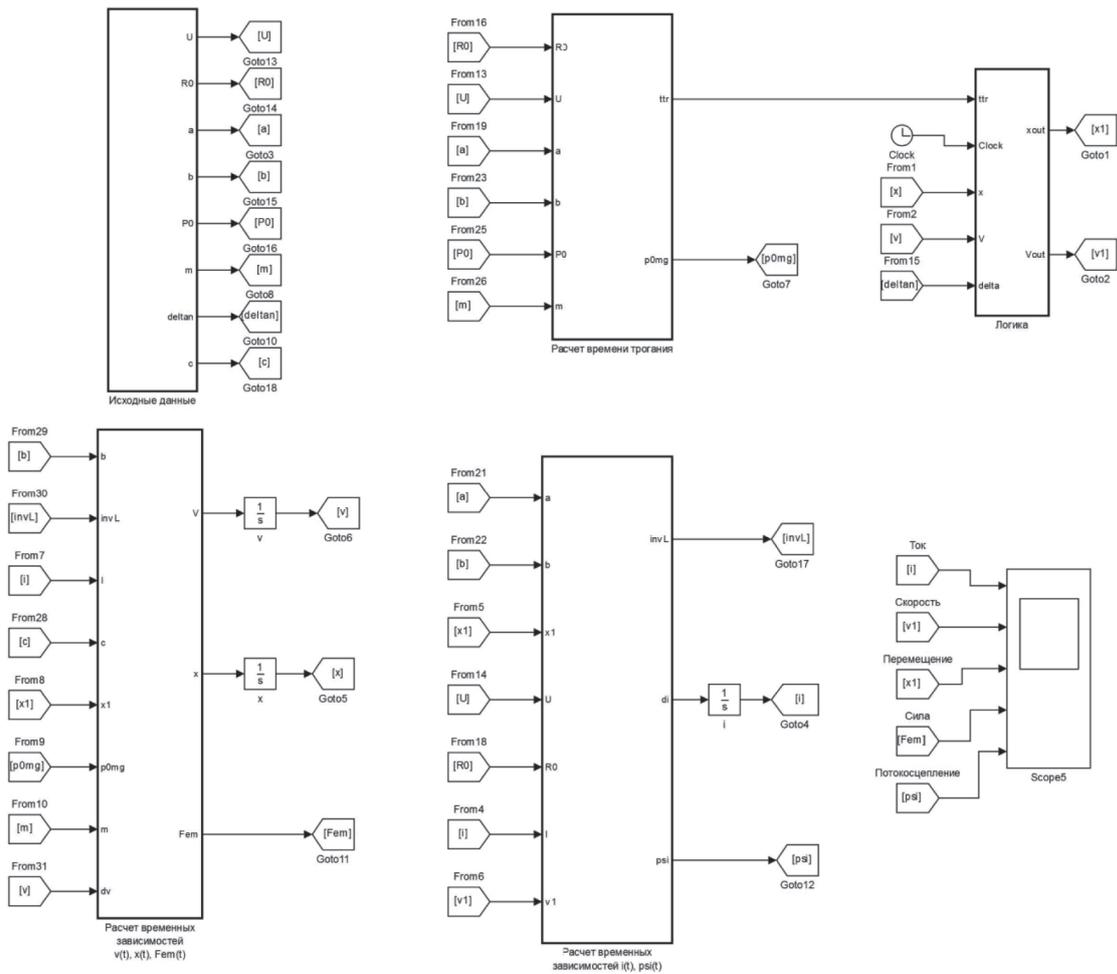


Рис. 10. Структурная Simulink-модель для исследования динамики контактора постоянного тока

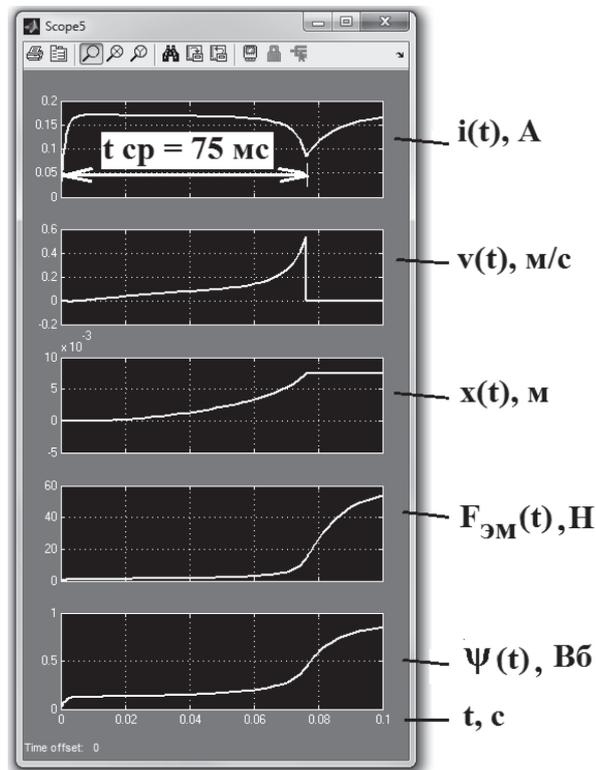


Рис. 11. Динамические характеристики контактора постоянного тока на экране осциллографа в среде Simulink

ных современными цифровыми измерительно-вычислительными комплексами, используемыми в учебном процессе для обучения студентов и магистрантов по направлению 13.03.02 – «Электрические и электронные аппараты» [8].

Список литературы

1. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. Расчет и элементы проектирования [Текст] / М.А. Любчик. – М.: Энергия, 1968. – 152 с.
2. Буль Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей [Текст] / Б.К. Буль – М.: Энергия, 1964. – 464 с.
3. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты [Текст] / А.Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
4. Буль Б.К. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS [Текст] / Б.К. Буль. – М.: Изд-во «Гардарики», 2006.
5. Курбатов П.А. Математическое моделирование электромеханических систем электрических аппаратов [Текст] / П.А. Курбатов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 110 с.
6. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega: Руководство пользователя [Текст] / А.В. Евстифеев. – М.: Додэка XXI, 2007. – 592 с.
7. Феколкин К. USB-осциллограф [Текст] / К. Феколкин. – Радиоаматор. Практическая радиоэлектроника. – 2009. – № 6. – С. 18–21.
8. Захарова Н.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование поверхностного эффекта проводника с током в ферромагнит-

ном пазу [Текст] / Н.В. Захарова, А.С. Татевосян // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 4. – Т. 9. – С. 5–12.

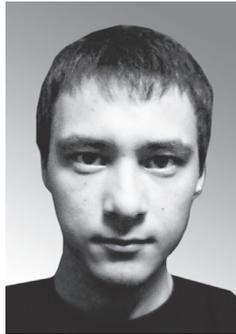
References

1. Ljubchik M.A. Silovye jelektromagnity apparatov i ustrojstv avtomatiki postojannogo toka. Raschet i jelementy proektirovanija [Tekst] / M.A. Ljubchik. – M.: Jenergija, 1968. – 152 s.
2. Bul' B.K. Osnovy teorii i rascheta magnitnyh cepej [Tekst] / B.K. Bul' – M.: Jenergija, 1964. – 464 s.
3. Slivinskaja A.G. Jelektromagnity i postojannye magnity [Tekst] / A.G. Slivinskaja. – M.: Jenergija, 1972. – 248 s.
4. Bul' B.K. Metody rascheta magnitnyh sistem jelektricheskikh apparatov. Programma ANSYS [Tekst] / B.K. Bul'. – M.: Izd-vo «Gardariki», 2006.
5. Kurbatov P.A. Matematicheskoe modelirovanie jelektromehaničeskikh sistem jelektricheskikh apparatov [Tekst] / P.A. Kurbatov. – M.: Izd. dom MJeI, 2007. – 110 s.
6. Evstifeev A.V. Mikrokontrollery AVR semejstva Mega: Rukovodstvo pol'zovatelja [Tekst] / A.V. Evstifeev. – M.: Dodjeka XXI, 2007. – 592 s.
7. Fekolkin K. USB-oscillograf [Tekst] / K. Fekolkin. – Radioamator. Praktičeskaja radio-jelektro-nika. – 2009. – № 6. – S. 18–21.
8. Zaharova N.V. Jeksperimental'noe issledovanie i matematicheskoe modelirovanie poverhnostnogo jeffekta provodnika s tokom v ferromagnitnom pazu [Tekst] / N.V. Zaharova, A.S. Tatevosjan // Jelektrotehničeskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – № 4. – Т. 9. – S. 5–12.



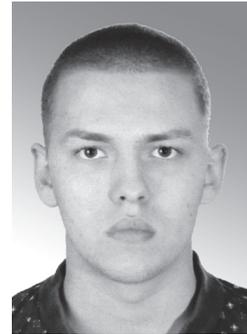
Хакимянов М.И.
Khakimyanov M.I.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электротехника и
электрооборудование предприятий»
ФГБОУ ВО «Уфимский государ-
ственный нефтяной технический
университет», Россия, г. Уфа



Сираев Р.М.
Siraev R.M.

студент ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной тех-
нический университет»,
Россия, г. Уфа



Крылов А.О.
Krylov A.O.

студент ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
Россия, г. Уфа

УДК 681.5:502:622.276

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ СКВАЖИННЫХ НАСОСОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Скважинная механизированная добыча является самым энергоемким технологическим процессом на нефтедобывающих предприятиях. В современных экономических условиях нефтедобывающие компании вынуждены оптимизировать потребление электроэнергии на технологические процессы добычи. Для этого необходимо иметь методики, позволяющие рассчитывать энергопотребление всего нефтедобывающего оборудования.

Потери энергии происходят во всех элементах установки электроцентробежного насоса: в самом насосе, погружном электродвигателе, электрическом кабеле, трансформаторе и станции управления. Существуют аналитические выражения, позволяющие найти потребление мощности во всех элементах насосной установки. Однако потребление энергии зависит от многих технологических и эксплуатационных параметров, таких как плотность, вязкость и обводненность скважинной жидкости, содержание газа, температура в скважине.

Авторы провели исследования о влиянии на потребление электроэнергии различных технологических и эксплуатационных параметров.

Потери мощности в электрическом кабеле зависят от его температуры. Однако определение средней температуры кабеля является достаточно сложной задачей, так как температура скважины изменяется по глубине, происходит самонагрев кабеля от протекающего тока, теплообмен через оболочку со скважинной жидкостью, нагрев жидкости теплотой, выделяемой работающим насосным агрегатом.

Была исследована зависимость энергопотребления от вязкости скважинного флюида. Известно, что от вязкости меняются такие характеристики насоса, как напор, подача и КПД.

Использование частотно-регулируемого привода является одним из основных способов снижения энергоемкости технологических процессов механизированной добычи нефти. В статье получен график зависимости удельного потребления электроэнергии скважинным насосом от частоты питающего напряжения. При регулировании производительности насоса изменяется депрессия пласта, а соответственно, и нефтеотдача скважины. Поэтому определить оптимальную производительность насоса для конкретной скважины расчетным путем достаточно проблематично. Связь между депрессией пласта и изменением притока скважинной жидкости может быть определена по данным гидродинамических исследований скважины.

Результаты проведенных исследований могут быть полезны специалистам нефтедобывающих предприятий при разработке мероприятий по оптимизации потребления энергии.

Ключевые слова: электроцентробежный насос, погружной электродвигатель, вязкость, плотность,

частотно-регулируемый электропривод, удельное энергопотребление, энергоэффективность.

RESEARCH OF INFLUENCE ENERGY CONSUMPTION FOR WELL PUMPS TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL PARAMETERS

Downhole artificial lift is the most energy-intensive process at the oil companies. In the current economic conditions, the oil companies are forced to optimize the power consumption for production processes. To do this, you must have a methodology for calculating the energy consumption of all oil-producing equipment.

Energy losses occur in all parts of the electrical submersible pump: in the pump units: submersible motors, electrical cables, transformers and control station. There are analytical expressions that allow finding the power consumption in all elements of the pumping unit. However, the energy consumption depends on many process and operating parameters, such as density, viscosity, water content wellbore fluid, gas content, temperature in the borehole.

The authors conducted a study on the impact on the power consumption of various technological and operational parameters. The power loss in the electrical cable depends on its temperature. However, determining the average temperature of the cable is quite a challenge, as the temperature varies with depth of the well, there is a self-heating cable from the current flow, heat transfer through the shell with the well fluid, the fluid is heated, the heat developed operating the pump unit.

The dependence of energy on the viscosity of the borehole fluid. It is known that the viscosity of the changing characteristics such as pump pressure, flow and efficiency.

The use of a variable frequency drive is one of the main ways to reduce the energy intensity of the mechanized process of oil production. The paper obtained plot of the specific energy consumption of the borehole pump from frequency of the supply voltage. When adjusting the pump performance varies depression and reservoir, respectively, and the oil recovery wells. Therefore, to determine the optimal performance of the pump for the payment by a particular well is problematic. The relationship between the formation and the depression change inflow borehole fluid can be determined according to well testing.

The results of these researches can be useful to specialists in the development of the oil-producing enterprises of measures to optimize energy consumption.

Key words: electric submersible pump, submersible motor, viscosity, density, variable frequency drive, energy intensity, energy efficiency.

Сложные экономические условия, нестабильные цены на нефть и непрерывный рост тарифов на электрическую энергию заставляют нефтедобывающие предприятия заниматься оптимизацией своих затрат, планированием потребления энергоресурсов. Известно, что самым энергоемким технологическим процессом на нефтедобывающих предприятиях является скважинная механизированная добыча [1, 2].

Потребляемая установками электроцентробежных насосов (ЭЦН) энергия расходуется на подъем скважинной жидкости, а также на потери во всех элементах установки: насосе, предвключенном устройстве, протекторе, погружном электродвигателе, кабельной линии, трансформаторе, станции управления, также в сетевом и входном фильтрах [3].

Несмотря на то, что потребление мощности в любом из элементов установки ЭЦН можно рассчитать по известным аналитическим выражениям, задача определения удельного энергопотребления для каждой конкретной скважины является достаточно сложной. Это связано с тем, что на энергопотребле-

ние влияет множество технологических и эксплуатационных параметров, таких как плотность, вязкость и обводненность скважинной жидкости, содержание газа, градиент температуры по стволу скважины и других.

Например, температура в стволе скважины влияет на сопротивление жил кабеля, по которому подводится напряжение к погружному электродвигателю, следовательно, и на потери в них:

$$\Delta P_{\text{кл}} = \frac{1,732 \cdot \rho \cdot L_{\text{КАБ}} [1 + \alpha(T_{\text{КАБ}} - 20)] \cdot I^2}{F}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала кабеля, Ом·м (для меди $\rho = 0,0195 \cdot 10^{-6}$ Ом·м); α – температурный коэффициент расширения меди (для меди $\alpha = 0,0041$); $L_{\text{КАБ}}$ – длина кабеля, м; $T_{\text{КАБ}}$ – средняя температура кабеля, °C; I – рабочий ток, А; F – площадь поперечного сечения жилы, м².

Однако определение средней температуры кабеля является достаточно сложной задачей, так как температура скважины изменяется с глубиной в соответствии с геотермическим градиентом, происхо-

дит самонагрев кабеля протекающим током, теплообмен через оболочку со скважинной жидкостью, нагрев жидкости теплотой, выделяемой работающим насосным агрегатом.

Интерес представляет зависимость удельного энергопотребления от вязкости скважинного флюида. Известно, что от вязкости меняются такие характеристики насоса, как напор, подача, КПД насоса [4, 5]. Эти изменения задаются с помощью соответствующих коэффициентов:

$$K_{Qv} = 1 - 4,95 \cdot v^{0,85} \cdot Q_{об}^{-0,57}; \quad (2)$$

$$K_{\eta v} = 1 - 1,95 \cdot \frac{v^{0,4}}{Q_{об}^{0,27}}; \quad (3)$$

$$K_{Hv} = 1 - \frac{1,07 \cdot v^{0,6} \cdot q_{пп}}{Q_{об}^{0,57}}, \quad (4)$$

где K_{Qv} – коэффициент изменения подачи от вязкости; $K_{\eta v}$ – коэффициент изменения КПД от вязкости; K_{Hv} – коэффициент изменения напора от вязкости; v – эффективная вязкость смеси, м²/с; $Q_{об}$ – оптимальная подача насоса на воде (по паспорту насоса), м³/сут; $q_{пп}$ – относительная подача на входе в насос.

На рисунке 1 приведена зависимость удельного энергопотребления установки ЭЦН от вязкости жидкости для скважины № 718. Видно, что для вязкости $0 \dots 1,4 \cdot 10^{-3}$ м²/с удельное энергопотребление будет изменяться от 3,76 до 3,96 кВт·ч/м³.

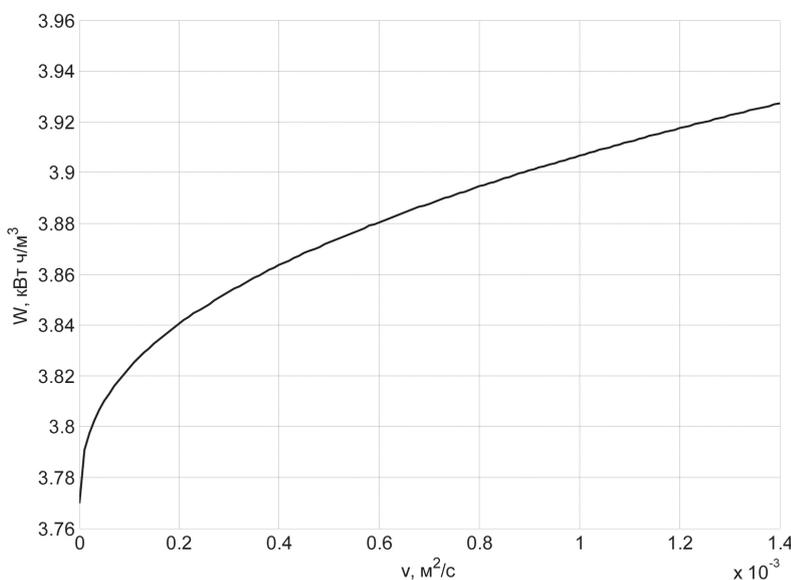


Рис. 1. Зависимость объемного удельного энергопотребления установки ЭЦН от вязкости скважинной жидкости

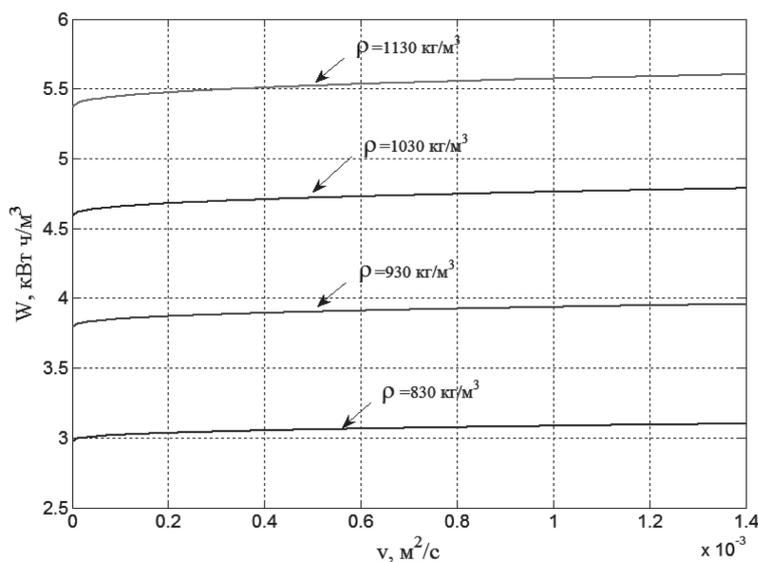


Рис. 2. Зависимость объемного удельного энергопотребления установки ЭЦН от вязкости скважинной жидкости при различных значениях плотности

На рисунке 2 приведены кривые зависимостей удельного энергопотребления от вязкости при различных плотностях скважинного флюида. Видно, что с увеличением вязкости и плотности жидкости удельное энергопотребление повышается. Трехмерный график зависимостей удельного энергопотребления от вязкости при различных плотностях скважинного флюида приведен на рисунке 3.

Известно, что использование частотно-регулируемого привода является одним из основных способов снижения энергоемкости технологических процессов механизированной добычи нефти. На сегодняшний день в большинстве случаев оптимальные производительность насоса и скорость вращения приводного двигателя определяются опытным путем – перебором с определенным шагом. Расчетное определение оптимальной производительности затрудняется тем, что нефтеотдача скважины также

зависит от скорости отбора жидкости. В результате регулирования производительности насоса изменяется депрессия пласта, что обуславливает изменение притока жидкости. Необходимые данные могут быть получены после проведения гидродинамических исследований скважины, в частности, снятия кривых восстановления давления и уровня [6, 7].

График зависимости удельного энергопотребления от частоты питающего напряжения приведен на рисунке 4. Из графика видно, что для данной скважины минимального энергопотребления можно достичь при частоте питающего напряжения 28 Гц. При меньших частотах наблюдается увеличение энергопотребления из-за уменьшения количества извлекаемой жидкости, а при больших – из-за роста потребляемой мощности погружного электродвигателя.

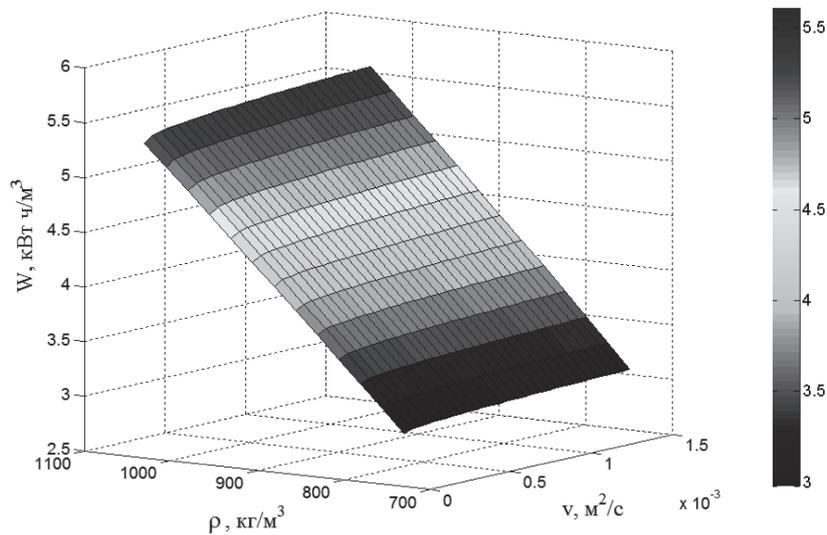


Рис. 3. Трехмерный график зависимости энергопотребления установки ЭЦН от вязкости скважинной жидкости при различных значениях плотности

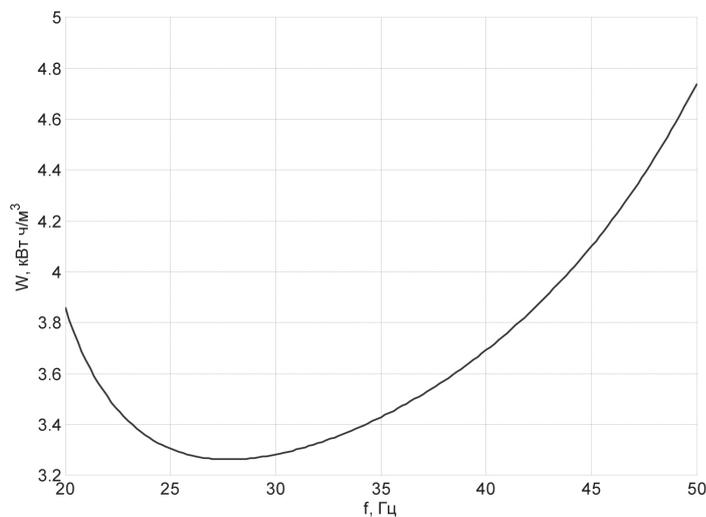


Рис. 4. Зависимость объемного удельного энергопотребления установки ЭЦН с ЧРП от частоты питающего напряжения

Следует отметить, что режим эксплуатации скважины с наименьшим удельным энергопотреблением не всегда является рациональным с экономической точки зрения. В условиях дорогой нефти и дешевой электроэнергии предприятиям выгодно обеспечивать максимальный дебит при любых энергетических затратах, так как цена дополнительно добытой нефти перекрывает все затраты.

Таким образом, по проведенным исследованиям были сделаны следующие выводы:

1. Для точного определения удельного энергопотребления установок скважинных насосов необходимо учитывать целый ряд технологических и эксплуатационных параметров: плотность, вязкость и обводненность скважинной жидкости, среднюю температуру кабеля, содержание газа и других.

2. На потребляемую насосным агрегатом мощность значительное влияние оказывают потери в кабеле, которые зависят от его температуры. Определение средней температуры кабеля является достаточно сложной задачей, так как она зависит от градиента температуры вдоль ствола скважины, нагрева жил кабеля протекающим током, нагрева жидкости теплом, выделяемым работающим насосным агрегатом.

3. Плотность и вязкость скважинного флюида оказывают весьма существенное влияние на удельное энергопотребление, значения вязкости значительно изменяют характеристики насоса относительно паспортных данных по подаче, напору и КПД.

4. При регулировании производительности насоса изменяется депрессия пласта, а соответственно, и нефтеотдача скважины. Поэтому определить оптимальную производительность насоса для конкретной скважины расчетным путем достаточно проблематично. На практике производительность насоса определяют опытным путем, регулируя ее с определенным шагом.

5. Связь депрессии пласта и изменения притока скважинной жидкости можно определить по данным гидродинамических исследований скважины, в частности, по снятию кривых восстановления давления и уровня.

6. Наиболее оптимальным способом повышения эффективности работы скважинного насосного оборудования является внедрение частотно-регулируемого электропривода.

Список литературы

1. *Хакимьянов М.И.* Методические основы расчета потребления электроэнергии электроприводами дожимных и кустовых насосных станций [Текст]

/ М.И. Хакимьянов, Б.В. Гузеев, Л.А. Рябишина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 15–20.

2. *Хакимьянов М.И.* Оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности: монография. – Уфа: РИЦ УГНТУ, 2013. – 77 с.

3. *Хакимьянов М.И.* Анализ потребления электроэнергии при механизированной добыче нефти электроцентробежными насосами [Текст] / М.И. Хакимьянов, И.Н. Шафиков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 37–41.

4. *Ивановский В.Н.* Скважинные насосные установки для добычи нефти [Текст] / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

5. *Ивановский В.Н.* Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти [Текст] / В.Н. Ивановский, С.С. Пекин, А.А. Сабиров. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2002. – 256 с.

6. *Медведев А.И.* Обоснование новых правил исследования нефтяных и газовых эксплуатационных скважин [Текст] / А.И. Медведев, В.Н. Боганик // Вестник ЦКР. – 2011. – № 5. – С. 21–26.

7. *Добрынин В.М.* Петрофизика: учеб. для вузов [Текст] / В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. – М.: Недра, 1991. – 368 с.

References

1. *Hakim'janov M.I.* Metodicheskie osnovy rascheta potreblenija jelektroenergii jelektroprivodami dozhimnyh i kustovyh nasosnyh stancij [Tekst] / M.I. Hakim'janov, B.V. Guzeev, L.A. Rjabishina // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2014. – Т. 10. – № 3. – S. 15–20.

2. *Hakim'janov M.I.* Optimizacija rezhimov raboty jelektroprivodov v nefte dobyvajushhej promyshlennosti: monografija. – Ufa: RIC UGNTU, 2013. – 77 s.

3. *Hakim'janov M.I.* Analiz potreblenija jelektroenergii pri mehanizirovannoj dobyche nefti jelektrocentrobeznyimi nasosami [Tekst] / M.I. Hakim'janov, I.N. Shafikov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – Т. 9. – № 3. – S. 37–41.

4. *Ivanovskij V.N.* Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlja dobychi nefti [Tekst] / V.N. Ivanovskij, V.I. Darishhev, A.A. Sabirov, V.S. Kashtanov, S.S. Pekin. – M.: GUP Izd-vo «Nef't i gaz» RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina, 2002. – 824 s.

5. *Ivanovskij V.N.* Ustanovki pogruzhnyh centrobeznyh nasosov dlja dobychi nef'ti [Tekst] / V.N.

Ivanovskij, S.S. Pekin, A.A. Sabirov. – M.: GUP Izd-vo "Neft' i gaz" RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina. – 2002. – 256 s.

6. *Medvedev A.I.* Obosnovanie novyh pravil issledovaniya neftjanyh i gazovyh jekspluacionnyh

skvazhin [Tekst] / A.I. Medvedev, V.N. Boganic // Vestnik CKR. – 2011. – № 5. – S. 21–26.

7. *Dobrynin V.M.* Petrofizika: ucheb. dlja vuzov [Tekst]/ V.M. Dobrynin, B.Ju. Vendel'shtejn, D.A. Kozhevnikov. – M.: Nedra, 1991. – 368 s.



Кушнир В.Г.
Kushnir V.G.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины, тракторы и автомобили», Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, Казахстан, г. Костанай



Кошкин И.В.
Koshkin I.V.

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и физика», Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, Казахстан, г. Костанай



Гайфуллин Г. З.
Gaifullin G.Z.

доктор технических наук, профессор кафедры «Технический сервис», Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, Казахстан, г. Костанай

УДК 621.365.22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В МЕТОДОМ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ

В научной работе представлен анализ метода определения точек экстремума, эмпирической функции для расчета сечения линий электропередачи. Проведено исследование методов определения сечения проводников по нормативным документам электротехники. Для экономического обоснования оценки эффективности выбора сечения проводника использован метод минимума приведенных затрат.

По данному методу капитальные вложения на сооружение линии электропередачи расчетного сечения пятипроводного исполнения пересчитывают в эквивалентную годовую стоимость с помощью специальной дисконтной ставки, а затем прибавляют к эксплуатационным расходам за год. Результатом является полученная сумма ежегодных приведенных затрат.

Для математической обработки множества решения выбран метод систематизации и использования статистических данных для научных и практических выводов и технико-экономических расчетов объекта электроснабжения с заданной нагрузкой сети напряжением до 1000 В. Произведен расчет отклонения значений годовых затрат от значений представленных сечений проводника в системе уравнений. Решение системы уравнения определяется методом Гаусса. Метод предполагает последовательное исключение переменных, когда с помощью преобразований система уравнений приводится к равносильной системе ступенчатого вида, из которого последовательно, начиная с последних переменных, находятся все остальные переменные.

Представлен график зависимости приведенных затрат от сечения проводника линии электропередачи. Определена среднеквадратическая ошибка, допустимая при вычислении приведенных годовых затрат, с помощью полученного аппроксимирующего многочлена, находящаяся в диапазоне менее 1%. Разработан-

ный способ может быть применим для проводников любой длины и вида прокладки, с использованием укрупненных технико-экономических показателей анализируемой электрической сети. Данный статический метод может быть применен только как инструмент с простым способом вычисления показателей расчета.

Ключевые слова: аппроксимация, кабель, электроснабжение, электрическая сеть, сечение проводника, приведенные затраты, погрешность.

DEFINITIONS CROSS SECTIONS POWER LINES IN ELECTRIC NETWORKS WITH VOLTAGE UP 1000 V METHOD OF APPROXIMATING THE DATA

In a scientific paper presents an analysis method for determining the extreme points of the empirical function to calculate the cross-section of power lines. A study of methods for determining the cross-section of conductors for electrical regulations. For the feasibility study evaluating the effectiveness of choice of the section of the conductor used the method of minimum cost is given.

According to this method, capital expenditures for the construction of the power line design section five wired performance translated into an equivalent annual cost of using the special discount rate, and then added to the operating costs for the year. The result is obtained by the sum of the annual discounted costs.

For mathematical processing of multiple solutions, the method of ordering and use of statistics for scientific and practical conclusions and feasibility study for an object with a given power supply network load voltage up to 1000 V. The calculation of the deviation values of annual costs from the values presented in the section of the conductor system of equations. Solving systems of equations determined by Gauss. The method involves the sequential elimination of variables when using transformations of the system of equations is reduced to an equivalent system of stepwise form from which sequentially, starting with the last variables are all the other variables.

Is a plot of reduced expenditures on the section of the conductor transmission line determined standard error allowable in calculating the reduced annual costs by approximating polynomial obtained in the range of less than 1%. The developed method can be applied for any length of conductors and form gaskets with enlarged technical and economic parameters of the analyzed electrical network. This static method can be used only as a tool with a simple way to calculate performance calculation.

Key words: approximation, cable, power supply, electrical network, section of the conductor, reduced costs, measurement error.

Выбор сечения проводов воздушных линий (ВЛ) и жил кабелей является важнейшей задачей в построении системы электроснабжения.

В первую очередь от правильного выбора сечения проводника зависит надежность и работоспособность всей электрической сети. Неправильный выбор сечения проводов может привести к потере мощности и вероятности перегрева, что впоследствии может привести к перегоранию проводов. Нагрузка на провода должна рассчитываться достаточно точно, так как ее завышение приведет к выбору провода большего сечения, а занижение – меньшего, что также экономически не выгодно, так как вызывает лишние потери электроэнергии и напряжения в проводах [1].

Сечение проводов и жил кабелей выбирают в зависимости от технических и экономических факторов. При руководстве нормативными документами, такими как Правила устройства электроустановок, существует ряд способов выбора сечения проводников:

– по условию предельно допустимого нагрева с

учетом не только нормальных, но и послеаварийных режимов;

– по условию допустимых длительных токов;

– по потере напряжения в жилах кабелей или проводах воздушных линий от проходящего по ним тока в нормальном и аварийном режимах;

– по механической прочности;

– по экономической плотности тока;

– по условиям короны и радиопомех.

В технико-экономических расчетах систем промышленного электроснабжения часто требуется отыскать точки экстремума функций, заданных таблично. К таким задачам относятся, например:

– выбор экономически целесообразного напряжения для системы электроснабжения;

– выбор мощности трансформаторов;

– выбор экономически целесообразного сечения шин, проводов, жил кабелей.

Целью научной работы является нахождение целесообразного сечения кабеля на основании использования метода математической статистики.

Задачей научной работы является обоснование

эффективности применения метода математической обработки эмпирических данных для определения сечения провода.

Основной метод, который будет рассматриваться для выбора сечения, основывается на зависимости годовых затрат от сечения жил кабеля. Каждому стандартному сечению соответствуют определенные затраты.

В суммированные затраты входят издержки на амортизацию, текущий ремонт, обслуживание и сто-

имость потерь электроэнергии. Способ прокладки не учитывался, уровень напряжения электрической сети принят до 1000 В.

Для получения исходных данных произвели расчет приведенных затрат на значительный диапазон сечений кабельной и воздушной линии электропередачи и полученные данные свели в таблицу 1. Приведенные затраты представлены в тенге и также используются в дальнейших расчетах математического аппарата.

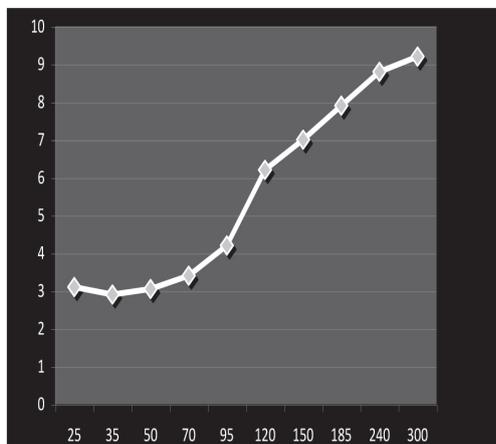
Таблица 1

Расчетные данные приведенных затрат по ступеням стандартных сечений линии электропередачи

Сечение, мм ²	Приведенные затраты, тенге/год
25	3143550
35	2906862
50	3049866
70	3388291,2
95	4152708,85
120	6199477,75
150	6946332,25
185	7891319,25
240	8751388,08

Первым этапом требуется определить аналитическое выражение для функции $Z = f(s)$ по заданным значениям аргумента. Для того чтобы сделать задачу определенной, в качестве аппроксимирующей функции возьмем многочлен $P_n(S)$ степени n . Выбор степени многочлена зависит от требуемой точности аппроксимации. Графически это означает, что на плоскости требуется провести параболу n степени, проходящую возможно ближе к точкам, полученным из расчета. График представлен на рисунке 1.

Z , млн.тенге



S , мм²

Рис. 1. График зависимости приведенных затрат от сечения проводника линии электропередачи

Затем по данным из таблицы строится график зависимости годовых приведенных затрат от сечения. По полученному графику видно, что функция аппроксимируется многочленом второй степени.

Для нахождения его коэффициентов составленным уравнения, характеризующие величину отклонений.

Обозначив через « ϵ » отклонения значений годовых затрат от значений в таблице, записываем уравнения, характеризующие величину отклонений:

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= a + bs_i + cs_i^2 - Z_i; \\ \epsilon'_i &= s_i(a + bs_i + cs_i^2 - Z_i); \\ \epsilon''_i &= s_i^2(a + bs_i + cs_i^2 - Z_i). \end{aligned} \quad (1)$$

Для того чтобы $f(a; b; c)$ имела наименьшее значение, необходимо, чтобы ее частные производные по a, b, c (каждая в отдельности) равнялись нулю. Следовательно, для этого из таблицы поочередно каждую пару значений затрат и сечения подставляем в уравнения, получая систему уравнений.

Получили нормальную систему уравнений:

$$\begin{cases} 10a + 1270b + 23700c - 55.75 = 0 \\ 1270a + 23700b + 5364250c - 9096 = 0 \\ 23700a + 5364250b + 1341631775c - 119717.5 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Для решения системы использовался метод Гаусса. Из коэффициентов при неизвестных в уравне-

ния системы составим матрицу. Если добавить к ней столбец, состоящий из свободных членов, то получим так называемую расширенную матрицу:

$$\begin{pmatrix} 10a + 1270b + 237000c - 55.75 = 0 \\ 1270a + 237000b + 53642500c - 9096 = 0 \\ 237000a + 53642500b + 13416317750c - 119717.5 = 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Оставляем первую строку без изменения, а вторую и третью преобразовываем. Умножаем все элементы первой строки на (-127) и результаты прибавляем к соответствующим элементам второй строки:

$$\begin{pmatrix} 10a + 1270b + 237000c - 55.75 = 0 \\ 0 + 75710b + 23543500c - 2015.75 = 0 \\ 237000a + 53642500b + 13416317750c - 119717.5 = 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Далее умножаем все элементы первой строки на (-23700) и результаты прибавляем к соответствующим элементам третьей строки. Множители подбираются так, чтобы все элементы первого столбца, кроме первого элемента, были равны нулю:

$$\begin{pmatrix} 10a + 1270b + 237000c - 55.75 = 0 \\ 0 + 75710b + 23543500c - 2015.75 = 0 \\ 0 + 23543500b + 7799417750c - 598442.5 = 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Теперь все элементы второй строки умножаем на (-23543500/75710):

$$\begin{pmatrix} 10a + 1270b + 237000c - 55.75 = 0 \\ 0 + 75710b + 23543500c - 2015.75 = 0 \\ 0 + 0 + 478107590c + 28394.5 = 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Такие преобразования расширенной матрицы приводят к системе уравнений, эквивалентной исходной:

$$\begin{aligned} 10a + 1270b + 237000c - 55.75 &= 0 \\ 75710b + 23543500c - 2015.75 &= 0 \\ 478107590c + 28394.5 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

После преобразований системы уравнений получили аппроксимирующий многочлен:

$$Z = 1.27 + 0.045s - 5.94 \times 10^{-4}s^2. \quad (8)$$

Исходя из специфики технико-экономических задач промышленного электроснабжения, считаем аппроксимацию достаточно хорошей, если квадратичная ошибка $\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}}{n-1}$; $\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}}{n-1}$ не

превышает 10% среднеарифметического табличных значений эмпирической функции. Если σ превышает заданную допустимую величину, то следует сделать пересчет (аппроксимировать функцию многочленом более высокой степени).

Находим среднеквадратическую ошибку, допустимую при вычислении приведенных годовых затрат, с помощью полученного аппроксимирующего многочлена.

Для этого составим таблицу 2 отклонений, где: Z_i – затраты, полученные в результате вычисления по капитальным затратам; Z – затраты, полученные на основании аппроксимирующего многочлена.

Таблица 2

Расчетная таблица отклонений приведенных затрат от сечения проводника

Приведенные затраты	Сечение проводника, мм ²								
	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Z_i	3,1	2,9	3,05	3,4	4,2	6,2	7	7,9	8,8
Z	2,36	2,77	3,37	4,13	5	5,82	6,68	7,56	8,65
ε_i	-0,74	-0,13	0,32	0,73	0,8	-0,38	-0,32	-0,34	-0,15

Получим: $\sum \varepsilon_i = 0,01$; $\sum \varepsilon_i^2 = 2,273$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum \varepsilon_i^2}}{\sqrt{n-1}}; \quad \sigma = \frac{\sqrt{2,273}}{\sqrt{9}} = 0.5. \quad (9)$$

Полученное приближение достаточно хорошее, потому что составляет 1% среднеарифметического табличных значений функции.

Для нахождения точки экстремума дифференцируем полученный многочлен и производную приравняем к нулю. Получаем:

$$Z' = 0,045 - 2 \times 5,94 \times 10^{-4} \times S. \quad (10)$$

В точке экстремума находим $S_{\varepsilon} = 37,9$ мм².

В технико-экономических расчетах систем промышленного электроснабжения зависимость годовых затрат $Z = f(S)$ имеет слабо выраженный минимум, то есть на некотором участке функция мало отклоняется от прямой.

По экономическим соображениям в пределах допустимой 10%-ной погрешности для значений годовых затрат выгодно взять S_{ε} как наименьшее до-

пустимое значение аргумента, то есть по найденному значению определяем допустимую абсолютную погрешность для функции.

Корни составленного уравнения являются абсциссами точек пересечения кривой годовых затрат и прямой. Таким образом, в этом случае будет найдена точка, где находятся корни полученного квадратного уравнения.

В ходе проведенных расчетов было выбрано целесообразное сечение кабеля с присоединяемой нагрузкой в 200 А, равное 50 мм². Выбор экономически целесообразного сечения дает возможность экономить электроэнергию для относительно коротких линий, что в значительной мере относится к сетям промышленных предприятий.

Литература

Артемов А.И. Электроснабжение промышленных предприятий в примерах и задачах [Текст] / А.И. Артемов / Под редакцией В.И. Минченкова. – Смоленск, 2000. – 300 с.

References

Artemov A.I. Jelektrosnabzhenie promyshlennyh predpriyatij v primerah i zadachah [Tekst] / A.I. Artemov / Pod redakciej V.I. Minchenkova. – Smolensk, 2000. – 300 s.



Яруллин Р.Б.

Yarullin R.B.

д-р техн. наук, доцент,

профессор кафедры «Машины, аппараты, приборы

и технологии сервиса» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 621.313.33:64.067

О РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ТЕХНИКИ СЕРВИСА

Современный электропривод развивается по пути максимального соответствия электродвигателя рабочей машине, что ведет к широкому распространению регулируемого электропривода переменного тока. Регулируемый и управляемый электропривод является не только основой механизации производственных процессов, но и технической базой совершенствования и автоматизации этих процессов. Поэтому главной тенденцией развития современного электропривода становится переход к регулируемым электроприводам в сочетании со всесторонним приспособлением электропривода к требованиям рабочих механизмов и технологических процессов.

В то же самое время основным потребителем электроэнергии считается электропривод, основную долю которого составляет асинхронный электропривод. Учитывая, что основные потери электроэнергии происходят при энергопотреблении, существенная экономия электрической энергии возможна при использовании частотно-регулируемого асинхронного электропривода с одновременным выполнением всех требований рабочих машин и технологических процессов. Требования рабочих машин к электроприводу определяются их приводными характеристиками (технологическими, механическими, нагрузочными, кинематическими, энергетическими и инерционными). Как известно, выбор рационального электропривода, прежде всего, начинается с определения технологической характеристики производственного механизма, связанной, главным образом, со скоростным режимом процесса, что включает необходимость, диапазон, направление и плавность регулирования, а также стабильность рабочей скорости.

Привод бытовых машин, приборов и аппаратов, а также механизмов в индивидуальном хозяйстве осуществляется коллекторными, однофазными асинхронными и синхронными двигателями. Основная часть бытовых машин получает электропривод от коллекторных двигателей, так как они обеспечивают, с одной

стороны, достижение высоких скоростей рабочих органов без промежуточных передач, с другой стороны, широкий диапазон плавного регулирования скорости. Однако они по сравнению с асинхронными двигателями имеют более сложное устройство, большую стоимость, меньший срок службы, повышенные эксплуатационные расходы, радиопомехи и мягкую механическую характеристику и тем самым низкую стабильность рабочей скорости внутри диапазона регулирования. Однофазные асинхронные двигатели применяются в основном для нерегулируемого привода бытовых машин и механизмов в индивидуальном хозяйстве с частотой вращения менее 3000 об/мин, а также при регулировании скорости в небольших пределах бытовых устройств с вентиляторной механической характеристикой.

Однако однофазные асинхронные двигатели относительно трехфазных двигателей имеют ряд недостатков, поэтому с развитием полупроводниковых преобразователей частоты, которые однофазный ток преобразовывают в регулируемый по частоте и напряжению по требуемому закону трехфазный ток, целесообразно электропривод ряда бытовых устройств переводить на частотно-регулируемый асинхронный электропривод на базе бесконтактного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором.

На основе анализа пяти технологических процессов в сфере сервиса (деревообработка, отжим белья в барабанных стиральных машинах, кондиционирование воздуха, шитье одежды и пылеудаление) рассмотрена возможность применения для них частотно-регулируемого электропривода на базе трехфазного асинхронного двигателя.

Ключевые слова: энергосбережение, регулирование скорости, диапазон, коэффициент плавности, двигатели, преобразователи частоты.

ABOUT THE REGULATED ELECTRIC DRIVE OF TECHNOLOGY OF SERVICE

Modern electric drive developing towards maximum compliance motor driven machine, which leads to a proliferation of controlled electric AC. Regulated and controlled by the drive is not only the basis of mechanization of production processes, but also the technical basis to improve and automate these processes. Therefore, the main trend in the development of modern electric drive becomes a transition to a regulated electric drive, combined with a comprehensive adaptation to the requirements of the drive working mechanisms and processes.

At the same time, a major consumer of electricity is considered to be the drive, the bulk of which is asynchronous electric. Given that the main power losses occur when power consumption is a significant electricity savings possible by using variable-frequency asynchronous electric with simultaneous fulfillment of all the requirements of working machines and processes. Demands of the workers to the motor vehicles are defined by their driving characteristics (technological, mechanical, stress, kinematic, energy and inertia). As you know, the choice of rational electric primarily starts with the definition of the technological characteristics of the production mechanism, associated mainly with high-speed mode process that includes the need, range, direction, and control the smoothness and stability of the operating speed.

Drive household appliances, devices and apparatus, as well as mechanisms to individual farms carried collector, single-phase asynchronous and synchronous motors. The main part of household electric machines prepared by collecting engines because they provide on the one hand, the achievement of high working speeds without intermediate transmissions, on the other hand, a wide range variable speed. However, they are compared with induction motors have a more complex device, a large value, a shorter life, higher maintenance costs, mechanical interference, and a soft characteristic and thus low stability in the operating speed of the control range. Single-phase asynchronous motors are used mainly for household unregulated drive machinery sector individually at a speed of less than 3000 rev / min and by adjusting the speed within a small range of consumer devices with mechanical ventilatory response.

However, single-phase asynchronous motors with respect to three-phase motors have a number of disadvantages, so with the development of semiconductor inverters that convert single phase in the regulated voltage and frequency required by the law of three-phase current, it is appropriate number of electric home appliances translated into frequency-controlled asynchronous electric drive on the basis of non-contact three-phase squirrel cage induction motor.

Based on the analysis 5 processes in service (wood, spin the laundry in the washing machine drum, air conditioning, sewing clothes and dust extraction) considered the possibility of using them for variable frequency drive on the basis of 3-phase induction motor.

Key words: energy saving, variable speed, range, coefficient of smoothness, motors, frequency converters.

Одним из главных приоритетов энергетической стратегии России на период до 2020 года определено снижение удельных затрат на использование энергоресурсов за счет рационализации их потребления, применения энергосберегающих технологий и оборудования.

Установлено [1, 2], что основные потери электроэнергии (до 90%) происходят при энергопотреблении. Поэтому разработки по энергосбережению главным образом должны быть направлены на рационализацию потребления энергоресурсов. Основным потребителем электроэнергии (60÷70%) [1, 2, 3] считается электропривод, где основная доля приходится на асинхронный электропривод. Поэтому существенная экономия электрической энергии возможна при использовании системы «полупроводниковый преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором». Установлено [2], что частотно-регулируемый асинхронный электропривод в ближайшие годы становится главным техническим решением массового регулируемого электропривода, который, управляя скоростью рабочего органа производственного механизма в соответствии с требованиями технологического процесса, одновременно экономит и электроэнергию. Рассмотрим специфику электропривода техники сервиса.

Как известно, привод бытовых машин, приборов (БМП) и механизмов в индивидуальном хозяйстве осуществляется в основном универсальными коллекторными, также однофазными асинхронными и только небольшая часть синхронными двигателями.

Коллекторные двигатели находят применение, как правило, в электроприводах БМП с широким диапазоном регулирования скорости (пылесосы, швейные машины, электроинструменты), а также с высокими скоростями более 10 тыс. об/мин (миксеры, взбивалки, кофемолки, соковыжималки, блендеры и т. д.) и с большими моментами трогания (стартеры автомобилей, квадроциклов, мини-тракторов).

Однофазные асинхронные двигатели применяются в основном для нерегулируемого привода БМП и механизмов в индивидуальном хозяйстве при частотах вращения менее 3000 об/мин (деревообрабатывающие станки, электропилы, элек-

трорубанки, насосы, холодильники, стиральные машины, газонокосилки, мясорубки и др.). Также они применяются для регулирования скорости в небольших пределах ступенчатым или плавным изменением напряжения обмоток статора двигателей бытовых устройств с вентиляторной механической характеристикой (вентиляторы, воздухоочистители, кондиционеры, тепловентиляторы и т. д.) и ступенчато (барабанные стиральные машины с приводом от одного двигателя) изменением числа пар полюсов поля статора.

Как известно, выбор рационального электропривода начинается, прежде всего, с определения технологической характеристики механизма, связанной, главным образом, со скоростным режимом технологического процесса (необходимость, диапазон, направление и плавность регулирования, а также стабильность рабочей скорости).

Проведем анализ показателей технологических процессов некоторых механизмов сервиса для установления их технологических характеристик (в сборе и обработке материалов в разные годы принимали участие студенты УГУЭС: Бикбулатов И.Ф., Жукович В.А., Чанышев У.Д., Касимов Ф.Ф. и Ахметов И.Р.).

1. Технологическая характеристика процесса деревообработки

Обработка древесины и древесных материалов резанием занимает ведущее место в деревообработке [4, 5]. Особое значение при этом имеет решение проблемы качества обработки древесины, которое зависит в основном от оптимальной геометрии режущего инструмента и степени его подготовки к работе, а также скорости резания. Скорость резания, в свою очередь, определяется как породой древесины, так и видом распиловки и достигает до 20÷60 м/с. Пиление древесины круглыми (дисковыми) пилами является самым распространенным за счет простоты устройства станков, относительно низкой стоимости и высокой производительности. Бытовые деревообрабатывающие станки в основном имеют диаметр пильного диска 250 мм. В таблице 1 приведены показатели регулирования скорости процесса деревообработки для таких станков, расположенные по мере убывания скорости резания в зависимости от степени твердости древесины и вида обработки [5].

Показатели регулирования скорости процесса деревообработки

№ п/п	Порода дерева	Вид распиловки	Скорость резания $V (V_{cp.})$ м/сек	Частота вращения пилыного вала $n (n_{cp.})$, об/ мин	Отклонение $\pm \Delta n = (n_{max} - n_{min}) / 2n_{cp.} \times 100$, %	Коэффициент плавности регулирования оборотов $K_{пл.п.ср.} = n_{i.ср.} / (n_{i.ср.}^{-1})$	Скорость резания $V_s (V_{s.ср.})$, м/мин	Коэффициент плавности регулирования скорости подачи $K_{пл.п.ср.} = V_{i.ср.} / (V_{i.ср.}^{-1})$
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<u>Мягкие:</u> ель, ива, липа, ольха, осина, пихта, сосна, лиственница	Продоль- ная	65÷35 (50)	4968÷2675 (3821)	30	1.54	15÷8 (12)	1.6
2	<u>Средней твердости:</u> береза, вяз, груша, орех, дуб	Продоль- ная	45÷20 (32.5)	3440÷1528 (2484)	38	1.08	10÷5 (7.5)	1.07
3	<u>Мягкие:</u> ель, ива, липа, ольха, осина, пихта, сосна	Попереч- ная	40÷20 (30)	3057÷1528 (2293)	38	1.33	9÷5 (7)	1.43
4	<u>Средней твердости:</u> береза, вяз, груша, орех, дуб	Попереч- ная	30÷15 (22.5)	2293÷1147 (1720)	34	1.13	6.9÷3 (4.9)	1.06
5	<u>Твердые:</u> баккаут, бук, граб, палисандр	Продоль- ная	30÷10 (20)	2293÷764 (1529)	50	1.16	6.9÷2.3 (4.6)	1.15
6	<u>Твердые:</u> баккаут, бук, граб, палисандр, черное дерево	Поперечная	25÷10 (17.5)	1911÷764 (1318)	43	–	5.7÷2.3 (4)	–
7	Диапазон регулирования	–	50÷17.5 (2.9:1)	3821÷1318 (2.9:1)	не более ±34	1.54÷1.08 (1.25)	12÷4 (3:1)	1.6÷1.07 (1.26)

Из таблицы 1 следует, что регулирование как частоты вращения пильного вала, так и скорости подачи обрабатываемого материала должно быть плавным. Это вытекает из значений коэффициентов плавности, близких к 1, у которых средние значения соответственно равны: $K_{пл.сп.} = 1.25 (1.54 \div 1.08)$ и $K_{пл.сп.} = 1.26 (1.60 \div 1.07)$. Коэффициенты плавности находятся как отношения средних значений соседних ступеней скоростей внутри диапазона регулирования. Диапазоны регулирования составили: частоты вращения пильного вала $D_n = n_{ср.макс.} : n_{ср.мин.} = (3821:1318) [об/мин] = 2.9:1$, скорости подачи – вала $D_v = v_{ср.макс.} : v_{ср.мин.} = (12:4) [м/с] = 3:1$. Допустимые отклонения частоты вращения пильного вала относительно среднего значения внутри диапазона регулирования должны быть не более $\pm 34\%$. Из таблицы видно, что для обеспечения режима резания для всех семи позиций обороты пильного вала с нерегулируемым приводом должны быть установлены на максимальные значения, равные 3821 [об/мин], при которых осуществляется обработка остальных видов древесины с повышенными энергозатратами. Также следует отметить, что режим работы электродвигателя повторно-кратковременный, где рабочий период чередуется с периодом работы двигателя вхолостую.

2. Технологическая характеристика процесса кондиционирования воздуха в жилых помещениях

Под кондиционированием воздуха подразумевается создание и автоматическое поддержание в

закрытых помещениях температуры, влажности, чистоты, состава, скорости движения воздуха, которые являются наиболее благоприятными для самочувствия людей, обуславливающие тепловой комфорт и высокую работоспособность. Для этого, в зависимости от типа помещений и времени холодного и теплового периода года, скорость движения воздуха требуется поддерживать от 0.1 до 0.3 м/с, что наиболее целесообразно обеспечить регулированием скорости вентилятора внутреннего блока. Наибольшее распространение для жилых помещений нашли кондиционеры, состоящие из двух блоков (сплит-системы), рассчитанные на комнаты площадью от 15 до 20 м² с холодильной мощностью от 1.8 до 5.0 кВт и выпускаемые многими зарубежными фирмами [6]. Для привода вентилятора внутреннего блока кондиционеров в основном применяются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором номинальной мощностью от 10 до 57 Вт на 1500- и 1000-синхронные обороты. Регулирование скорости вентилятора внутреннего блока производится ступенчато (от 3-х до 8-ми) как переключением числа пар полюсов, так и изменением напряжения на обмотках статора асинхронного двигателя. В таблице 2 приведены показатели регулирования частоты вращения асинхронных двигателей номинальной мощностью $P_n = 57$ Вт вентилятора внутреннего блока на примере трех моделей – кондиционеров фирмы Daikin 28, Daikin 42 и Daikin 50 [6].

Таблица 2

Показатели регулирования частоты вращения двигателя вентилятора внутреннего блока

Наименование и модель внутр. блока кондиционера		Ступени регулирования скорости вентилятора, об/мин								
		LLL	LL	SL	L	ML	M	HM	H	HH
Daikin FTXR28EV1B	Охл.	-	590	720	790	890	990	1090	1190	1270
		$D_n = 1:2.2$								
	$K_{пл1-8}$	-	1.22	1.10	1.13	1.11	1.10	1.09	1.07	-
		$K_{пл.сп.} = 1.12$								
	Обог.	350	590	790	860	970	1080	1190	1300	1380
		$D_n = 1:3.9$								
	$K_{пл1-8}$	1.69	1.34	1.09	1.13	1.11	1.10	1.09	1.06	-
		$K_{пл.сп.} = 1.2$								

Наименование и модель внутр. блока кондиционера		Ступени регулирования скорости вентилятора, об/мин								
		LLL	LL	SL	L	ML	M	HM	H	HH
Daikin FTXR42EV1B	Охл.	-	590	750	820	940	1060	1180	1300	1380
		$D_n=1:2.3$								
	$K_{пл.ср.}$	-	1.27	1.09	1.15	1.13	1.11	1.10	1.06	-
		$K_{пл.ср.}=1.13$								
	Обог.	350	590	820	890	1000	1110	1220	1340	1420
		$D_n=1:4.1$								
	$K_{пл.ср.}$	1.69	1.39	1.09	1.12	1.11	1.10	1.10	1.06	-
		$K_{пл.ср.}=1.21$								
Daikin FTXR50EV1B	Охл.	-	590	790	860	990	1120	1250	1380	1460
		$D_n=1:2.5$								
	$K_{пл.ср.}$	-	1.34	1.09	1.15	1.13	1.12	1.10	1.06	-
		$K_{пл.ср.}=1.14$								
	Обог.	350	590	860	950	1070	1190	1310	1440	1520
		$D_n=1:4.3$								
	$K_{пл.ср.}$	1.69	1.46	1.10	1.13	1.11	1.10	1.10	1.06	-
		$K_{пл.ср.}=1.22$								

Из анализа показателей регулирования скорости вентилятора внутреннего блока кондиционера следует: 1. Для регулирования скорости воздуха в пределах $0.1 \div 0.3$ м/с частота вращения вентилятора изменяется ступенчато (7 ступеней в режиме охлаждения и 8 ступеней – обогрева). Следует отметить, что даже при таком многоступенчатом регулировании скорости не обеспечивается требуемая скорость воздуха, которая может оказаться между соседними ступенями скорости. 2. Диапазоны регулирования скорости составляют: в режиме охлаждения $D_n \leq (1460 \div 590)$ [об/мин] $\leq 2.5:1$, в режиме обогрева $D_n \leq (1520 \div 350)$ [об/мин] $\leq 4.3:1$. 3. Изменение скорости внутри диапазона регулирования требуется плавное, так как средние значения коэффициентов плавности скорости составляют: для режима охлаждения $K_{пл.ср.} = 1.13(1.12 \div 1.14) \rightarrow 1$, а для режима обогрева – $K_{пл.ср.} = 1.21(1.20 \div 1.22) \rightarrow 1$. 4. Регулирование скорости двигателя за счет напряжения параметрическое, т.е. за счет изменения скольжения, что из-за существенных потерь делает необходимым завышение мощности, а также применение двигателя повышенного скольжения.

Нагрузочная характеристика электропривода вентилятора соответствует длительному режиму с переменной нагрузкой, где периоды ступеней на-

грузки (скорости) могут быть довольно продолжительными.

3. Технологическая характеристика процесса отжима белья в стиральных машинах барабанного типа

Отжим влаги из ткани в бытовых стиральных машинах является самой сложной технологической операцией, определяющей конструкцию машины и тип электропривода. В среднем 1 кг сухой ткани захватывает $2 \div 2.5$ кг воды, т.е. остаточная влажность ткани составляет $200 \div 250\%$, которую в процессе отжима необходимо довести до $55 \div 65\%$ [8].

Исследования показали [8], что для обеспечения остаточной влажности $110 \div 120\%$ частота вращения барабана должна составлять $350 \div 400$ об/мин, а для достижения $45 \div 55\%$ необходимо увеличить частоту вращения барабана до 1000 об/мин. В современных стиральных машинах достичь остаточной влажности ниже $38 \div 40\%$ невозможно из-за нахождения воды внутри волоконных капилляров. Установлено [9], что увеличение частоты вращения барабана ведет к существенному возрастанию энергоемкости машины, усложнению ее конструкции.

Выход на режим отжима барабана с влажным бельем встречает определенные трудности, связанные с появлением биения барабана из-за центробеж-

ной силы от неравномерно распределенной массы влажной ткани. Для решения этой проблемы исследователями предлагается: прерывистый режим отжима или ступенчатый отжим с различным числом ступеней и их уровней, а также линейный отжим с плавным повышением частоты вращения. Обзор исследований процесса отжима белья показывает [8], что скоростной режим отжима белья зависит также от вида тканей (таблица 3).

Из таблицы 3 следует, что при отжиме белья из различных видов тканей диапазон регулирования скорости для средних значений оборотов барабана составляет $D_n=(850:450)$ [об/мин] =1.89:1

с допустимым отклонением оборотов от среднего значения ступени не более $\pm 3\%$. Регулирование оборотов барабана внутри диапазона требуется плавное, что определяется коэффициентом плавности $K_{пл.} = 1.03 \div 1.65$, где $K_{пл.ср.} = 1.2 \rightarrow 1$. Следует заметить, что в случае привода барабана в режиме отжима от нерегулируемого привода обороты барабана должны соответствовать оборотам отжима тканей из синтетических материалов, т. е. максимальные, равные 850 об/мин, что приводит к повышенному энергопотреблению при отжиме тканей из других материалов, при отжиме их при более высоких оборотах.

Таблица 3

Показатели регулирования скорости процесса отжима

№ п/п	Виды тканей	Частота вращения барабана, об/мин $n_{ср}$	Отклонение частоты вращения $\pm \Delta n, \%$	$K_{пл.}$, о. е.
1	Деликатное белье	(400÷500) 450	11	–
2	Шелк	(450÷500) 475	5.25	1.06
3	Шерсть	(450÷550) 500	10	1.05
4	Хлопок, лен	(800÷850) 825	3.03	1.65
5	Синтетические материалы	(800÷900) 850	5.88	1.03
Средние значения		Диапазон $D_n=450:850=1:1.89$	$\Delta n_{доп} = \pm 3.03\%$	$K_{пл.ср.} = 1.2$

В качестве приводного двигателя барабана стиральной машины встречаются коллекторные, а также вентильные (вентильно-индукторные) двигатели. Во многих стиральных машинах используются двухскоростные однофазные асинхронные конденсаторные двигатели как наиболее простые, надежные и дешевые. Нагрузочная характеристика работы электропривода барабана в процессе стирки и отжима повторно-кратковременная, в реверсивном режиме при стирке с частотой вращения барабана 45÷60 об/мин и пиковой нагрузкой в процессе отжима.

4. Технологическая характеристика шитья

Шитье представляет собой создание на материале стежков и швов при помощи иглы и ниток с целью производства или ремонта одежды и текстильных изделий, выполняемое в быту вручную или швейной машиной. Специфика шитья на швейной машине обусловлена необходимостью в начале шитья малой (ползучей) скорости и затем плавного перехода на большие скорости, с уменьшением их

при появлении криволинейной траектории стежков.

Максимальная частота вращения главного вала бытовой швейной машины с электроприводом по ГОСТ 25647 составляет 1000 ± 200 , а минимальная – 250 ± 100 об/мин. Для машин с электроприводом номинальная потребляемая мощность при максимальной частоте вращения главного вала должна быть не более 115 Вт [10]. В промышленных швейных машинах приводным двигателем является 3-фазный асинхронный двигатель, тогда как в бытовых швейных машинах коллекторный двигатель. Регулирование скорости промышленных швейных машин осуществляется фрикционной или электромагнитной муфтами за счет изменения передаточного отношения, а также изменения частоты тока асинхронных двигателей. Регулирование скорости коллекторного двигателя бытовой машины реостатное, с низкой стабильностью скорости, со значительными потерями мощности.

Нагрузочная характеристика работы швейной

Показатели регулирования скорости бытовых швейных машин

Марка, изготовитель промышленной швейной машины	Операция, материал	Макс. скорость шитья швейных машин (стяж/мин)		Мощность двигателя, Вт		Макс. обороты ведущего вала бытовой шв. маш., об/мин	Коеф. плавности регулирувания $K_{пл.}$
		Промышленной	Бытовой	Промышленной	Бытовой		
Кл. 563 Германия «Durkopp»	Прямострочная, для легких тканей	6000	800	400	80	927÷1000 (960)	1.14
Кл. 271 Германия «Durkopp»				300			
31–11+50 Беларусь ПО «Промшвеймаш»							
31–31+50 ” --	Отделочные строчки для сорочек	5000	670	350	80	840	1.07
31–32+50 ” --	Прямострочная, для средних тканей	4800	640			764÷800 (782)	1.12
31–32+100 ” --		4600	610				
1022-МТ ” --	Прямострочная, для пальтовых тканей	4200	560	450	80	700	1.04
31–33+50 ” --	Прямострочная, для среднетяжелых тканей	4000	540			670	1.14
Кл. 0810 Россия з-д имени Дегтярева	Для стачивания меховых шапок						
72111-1050 Чехия «Минерва»	Для стачивания кожи	3500	470	400	80	588	—
	Режим – начало шитья	$n_{мин} = 250 \pm 100$		Диапазон регулирувания		$D_n = (960:250) = 3.84:1$	$K_{пл.ср.} = 1.10$

машины повторно-кратковременная с переменной нагрузкой в период работы.

Обзор работ [11] по процессам шитья на швейных машинах показал, что для качественного вы-

полнения шитья, в зависимости от вида операции и материала ткани, требуются определенные скорости, которые наряду с показателями регулирования скорости приведены в таблице 4.

Из анализа таблицы 4 следует, что максимальный диапазон регулирования скорости составляет $D_n = (960:250)$ [об/мин] = 3.84:1. Сам процесс шитья в зависимости от операции и материалов ткани имеет диапазон $D_n = (960:588)$ [об/мин] = 1.63:1, при этом регулирование скорости требуется плавное, так как значения коэффициентов плавности составляют $K_{пл.сп.} = 1.102(1.04\div 1.14) \rightarrow 1$, т. е. близки к 1.

5. Технологическая характеристика процесса пылеудаления в жилых помещениях

Борьба с пылью в жилище человека имеет исключительно большое значение для сохранения здоровья. Пыль весьма вредно действует на дыхательные органы человека, она может оказаться причиной заболевания также глаз и кожи.

В борьбе с пылью исключительно большое значение имеют пылесосы, при работе с которыми не приходится соприкасаться с пылью.

Практика показывает, что после получасовой уборки помещения пылесосом относительное количество бактерий в воздухе сокращается вдвое. Пылесос можно с успехом использовать для борьбы с молью, ее личинками и другими насекомыми, специально распыляя порошки; для борьбы с древесными грибами и жуками, разрушающими древесину, опрыскивая ее специальными составами; для побелки стен и потолков помещений известковым раствором; для разбрызгивания ароматических и дезинфицирующих растворов.

В состав пыли входят в основном кварцевые частицы различных размеров и органические частицы

хлопка, шерсти, бумаги и т. п.

Скорость воздуха в воздуховодах принимают на 25÷30% больше, чем скорость витания, при которой частица поддерживается потоком во взвешенном состоянии. Эта скорость для тяжелой абразивной пыли равна 14÷16 м/с, минеральной пыли 10÷12 м/с, хлопка 8÷10 м/с, синтетического волокна 10÷14 м/с [12]. Отсюда следует (таблица 5), что необходимый предел скорости – от 8 до 16 м/с или через средние значения от 9 до 15 м/с, т. е. в диапазоне 1:1.67. Из приведенных скоростей, соответствующих взвешенному состоянию минеральных и органических частиц пыли, коэффициент плавности составляет от 1.10 до 1.25 ($K_{пл.сп.} = 1.19$) $\rightarrow 1$, т. е. регулирование требуется плавное с допустимым отклонением скорости не более $\pm 6.6\%$ от среднего значения. Мощность бытовых пылесосов находится в пределах от 100 до 2000 Вт и более. Причем за период применения пылесосов просматривается тенденция увеличения мощности пылесосов, что связано с увеличением производительности и тем самым оборотов агрегата пылесосов.

В существующих пылесосах из-за необходимости обеспечения высоких оборотов и их плавного регулирования используются коллекторные электродвигатели с диапазоном оборотов от 9000 до 15000 об/мин.

Нагрузочный режим работы электродвигателя пылесоса является длительным с переменной нагрузкой.

Таблица 5

Показатели регулирования скорости пылеудаления

№ п/п	Виды частиц пыли	Скорость частиц в воздуховоде, м/с (среднее)	Допустимые отклонения скорости от среднего значения, $\pm \%$	Коэффициент плавности $K_{пл.сп.}$, о. е.
1	Хлопок	8÷10 (9)	11.1	–
2	Минеральная пыль	10÷12 (11)	9.1	1.22
3	Синтетические волокна	10÷14 (12)	8.4	1.10
4	Тяжелая абразивная пыль	14÷16 (15)	6.6	1.25
	Средние значения	Диапазон $D_v = (15:9)$ [об/мин] = 1.67:1	$\Delta V_{доп} = \pm 6.6\%$	$K_{пл.сп.} = 1.19$

Для общего анализа полученные результаты сведем в таблицу 6 «Приводные характеристики бытовых машин», где, кроме технологических характеристик, приведены нагрузочные (момент на валу в процессе работы) и механические (момент на валу от угловой скорости) характеристики.

Из таблицы 6 следует, что: 1) наибольший диапазон регулирования скорости электродвигателей не превышает 4.3:1 и находится в пределах 3821÷250 об/мин с допустимым отклонением скорости не более ±3%, кроме пылесоса, где диапазон по оборотам составляет 15000÷9000 об/мин; 2) регулирование скорости внутри установленных диапазонов должно быть плавным, так как коэффициент плавности стремится к 1, т. е. $K_{пл.сп.}=(1.1÷1.26) \rightarrow 1$. Направление регулирования должно быть как выше, так и ниже естественной характеристики двигателя; 3) характер изменения момента статического сопротивления рассмотренных машин, в основном возрастающий как линейно, так и квадратично, а также убывающий нелинейно.

Всем приведенным показателям по регулированию скорости, в соответствии с технологическими требованиями, с одновременным энергосбережением при пуске и работе при меньших скоростях, соответствует электропривод на базе бесконтактного 3-фазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и полупроводникового преобразователя частоты. Это следует из того, что, во-первых, преобразователи частоты позволяют из однофазного тока с напряжением 220 В получить трехфазный ток с линейным напряжением 220 В, с плавно регулируемой в широком диапазоне частотой от 0 до 200 (400; 800) Гц для двигателей, с мощностью от 0.2 до 2.2 кВт. В то же самое время для получения высоких энергетических показателей асинхронного двигателя преобразователи обеспечивают одновременно с частотой f_1 изменение и подводимого напряжения U_1 в зависимости от характеристики момента сопротивления M_c машин по 3-м законам: $M_c = const - U_1/f_1 const$; нагрузка вентиляторная – $U_1/f_1^2 = const$ (кондиционеры, пылесосы, отжим белья, швейные машины); нагрузка нелинейно убывающая – $U_1/\sqrt{f_1^2} = const$ (деревообрабатывающие станки), а также по программируемой зависимости. При этом механические характеристики обладают высокой жесткостью, т. е. стабильностью скорости, с небольшими потерями мощности. Также при необходимости осуществляется эффективное электрическое торможение, что требуется по правилам техники безопасности при работе на деревообрабатывающих станках, в стиральных машинах в процессе отжима белья.

Во-вторых, трехфазный асинхронный двигатель

имеет неоспоримые преимущества как перед однофазными асинхронными, так и коллекторными двигателями.

Так коллекторным двигателям присущ ряд существенных недостатков: сложная конструкция и относительно высокая стоимость; нестабильность скорости с изменением нагрузки из-за мягкой механической характеристики двигателя; наличие щеточно-коллекторного узла, что, в свою очередь, обуславливает: пониженную надежность, сильное искрение на коллекторе из-за коммутации и связанные с этим радиопомехи и пожароопасность, высокий уровень шума.

Однофазные асинхронные двигатели (ОАД) в сравнении с трехфазными (ТАД), в свою очередь, имеют следующие недостатки: 1) отсутствие начального (пускового) момента и тем самым необходимость фазосдвигающих элементов; 2) меньшие перегрузочная способность, пусковой момент и энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности); 3) мощность составляет 40÷45% от мощности ТАД при одинаковых габаритах; 4) частота вращения даже при холостом ходе меньше из-за тормозящего действия обратного магнитного поля; 5) круговое поле только в номинальном режиме работы, в остальных режимах, включая пусковой, эллиптическое; 6) габариты конденсаторов у конденсаторных ОАД (КОАД) сопоставимы с габаритами двигателя; 7) в случае работы с пусковым конденсатором КОАД возможен резонанс напряжений и тем самым пробой конденсаторов и выход из строя двигателя.

Однако асинхронный электродвигатель основного исполнения не рекомендуется использовать в составе частотно-регулируемого привода по следующим причинам [13]: снижается КПД и требуется завышение установленной мощности двигателя; из-за высших гармоник напряжения и тока на выходе преобразователя частоты возрастают потери в двигателе; снижается срок службы изоляции обмотки статора; при уменьшении скорости вращения снижается эффективность охлаждения; при увеличении скорости повышается шум вентилятора, а также падает перегрузочная способность двигателя; через подшипники начинают протекать паразитные (вихревые) токи, разогревающие и разрушающие как смазку, так и подшипники.

Промышленность выпускает специальные частотно-регулируемые асинхронные двигатели (ЧРД) для работы в составе регулируемого привода с преобразователями частоты (ПЧ) серий АИР [13], ДАР [14], RA [15] и АДЧР [16] (таблица 7).

Таблица 6

Основные приводные характеристики рассмотренных машин

№ п/п	Бытовая машина	Технологическая характеристика					Тип установ- ленного двига- теля	Мощность двигателя, Вт	Нагрузочная характеристи- ка (режим ра- боты)	Механиче- ская харак- теристика
		Диапазон регули- рования, об/мин	Направление регулирования от естественной характеристики	Стабильность регулиро- вания, ±%	Плавность регулирования, K _{пл.ср.}	Плавность регулирования, K _{пл.ср.}				
1	Деревообра- батывающие станки	382:1:1318= 2.9:1	Двухзонное – как выше, так и ниже	34	1.26 – плавное	Асинхронный	750÷2200	Повторно- кратковре- менный	Нелинейно убывающая	
2	Кондиционеры	1460:590=2.5:1 – в режиме охлаждения 1520:350=4.3:1 – в режиме обогрева	Двухзонное – в основном ниже	–	1.13 – плавное 1.21 – плавное	Асинхронный одно- и многоско- ростной	10÷57	Длительный с переменной на- грузкой	Вентилятор- ная	
3	Отжим белья на барабанных стираль- ных машинах	850:450=1.89:1	Однозонное – вниз	3.03	1.2 – плавное	Асинхронный двухскоростной	120÷180 и более	Повторно- кратковре- менный	Вентилятор- ная	
4	Швейные машины	960:250=3.84:1 (1.63:1)	Двухзонное – как выше, так и ниже	–	1.1 – плавное	Коллекторный	80÷115	Повторно- кратковре- менный	Линейно возрастаю- щая	
5	Пылесосы	15000:9000= 1.67:1	Двухзонное – как выше, так и ниже	6.6	1.19 – плавное	Коллекторный	100÷2000 и более	Длительный с постоянной на- грузкой	Вентилятор- ная	

Таблица 7

Частотно-регулируемые трехфазные АД с короткозамкнутым ротором малой мощности ($P_{\text{н}} \leq 4,0$ кВт)

№	Серия двигателя (эл. габариты) (число полюсов)	2р=2 ($n_1=3000$ об/мин)		2р=4 ($n_1=1500$ об/мин)		2р=6 ($n_1=1000$ об/мин)		Способ охлаждения; (С – самовентиляция; НВ – независимая вентиляция от однофазного АД (ОАД)) с мощностью $P_{\text{н}}$
		Мощность кВт	Допустимая частота вращения об/мин (Гц)	Мощность кВт	Допустимая частота вращения об/мин (Гц)	Мощность кВт	Допустимая частота вращения об/мин (Гц)	
1	А или АИР (56÷100 мм) (2, 4, 6, 8) [13]	0,18÷4,0	4500÷4500 (75)	0,12÷4,0	4500÷4500 (150)	0,18÷4,0	3000÷3000 (150)	НВ (ОАД $P_{\text{н}}=14$; 16 Вт)
2	ДАР (56÷100 мм) (2, 4, 6, 8, 10) [14]	0,18÷4,0	–	0,12÷4,0	–	0,18÷4,0	–	С и НВ (ОАД $P_{\text{н}}=19$; 45 Вт)
3	РА (71÷112 мм) (2, 4, 6, 8) [15]	0,37÷4,0	6000÷6000 (100)	0,25÷4,0	4500÷4500 (150)	0,75÷4,0	4000÷4000 (200)	С и НВ (ОАД $P_{\text{н}}=19$; 46 Вт)
4	АДЧР (56÷100 мм) (2, 4, 6, 8, 10, 12) [16]	0,18÷4,0	4500÷4500 (75)	0,12÷4,0	4500÷4500 (150)	0,18÷4,0	3000÷3000 (150)	С и НВ (ОАД $P_{\text{н}}=19$; 46 Вт)

Структура обозначения ЧРД: например, АИР90L4RBУ3, опции: 05, 13, 23 – (R) общего применения (В серия 1) с термистором в обмотке статора на 130°С (05), с независимой вентиляцией (13), с датчиком скорости (энкодером) на 12 В, 1000 импульсов (23); ДАР90L4Б1У3-ИТ-О – с температурной защитой обмоток статора и датчиками температуры подшипников (Б1), инкрементальным энкодером (ИТ), самовентиляцией (О); РА90L4ФИБУ3: F – для работы с ПЧ, И – с энкодером, Б – встроенными датчиками температуры; АДЧР90L4-Т-С – с электромагнитным тормозом (Т), статический для удержания вала двигателя после остановки (С).

Применение частотно-регулируемого привода позволяет: 1. Регулировать скорость без обратных связей в широком диапазоне для двигателей: с самовентиляцией от 5 до 50 (60) Гц с диапазоном 1:10, с независимой вентиляцией от 0 до 50 (60) Гц с диапазоном до 1:20...40 [16]. При этом допустимая максимальная скорость (таблица 7) составляет при $2p=2$ для двигателей АИР, АДЧР до 4500 об/мин (75 Гц), для RA – до 6000 об/мин (100 Гц), при $2p=4$ соответственно для АИР, АДЧР, RA – 4500 об/мин (150 Гц) и при $2p=6$ – 4500 об/мин (200 Гц) для RA и 3000 об/мин (150 Гц) для АИР и АДЧР. 2. За счет установки оптимальной скорости и обеспечения ее стабильности, благодаря жесткой механической характеристике двигателя на всех частотах, повысить качество выпускаемой продукции. 3. Экономить электроэнергию благодаря высоким КПД и особенностям управления ПЧ и плавному пуску [15]. 4. Обеспечить плавность пуска и ограничить пусковые токи. 5. Увеличить срок эксплуатации, надежность и термическую перегрузочную способность за счет применения изоляции класса нагревостойкости F. 6. Обеспечить высокую перегрузочную способность и тем самым устойчивую работу в широком диапазоне регулирования [15]. 7. Снизить акустические показатели [15]. 8. Применять для двигателей малой мощности стандартные подшипники, так как протекание токов по контуру через подшипники наблюдается у двигателей больших габаритов, начиная с мощности $P_n \geq 90$ кВт [13, 14, 15, 16].

Кроме этого, по заказу потребителя ЧРД может быть скомплектован: температурной защитой обмоток статора и подшипников, контролем температуры с помощью термопреобразователей обмоток статора и подшипников, датчиками скорости (энкодерами), с самовентиляцией (кроме серии АИР) или независимой вентиляцией и электротормозом.

Из проведенного анализа следует, что для техники сервиса перспективным является регулируемый электропривод на базе системы «трехфазный асинхронный двигатель – преобразователь частоты», которая удовлетворяет всем основным требованиям рабочих машин к приводу.

Список литературы

1. *Браславский И.Я.* Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.М. Поляков / Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
2. *Ильинский Н.Ф.* Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш.

учеб. заведений [Текст] / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.

3. *Электротехника: учебное пособие для вузов.* В 3-х книгах. Книга III. Электроприводы. Электроснабжение [Текст] / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 639 с.

4. *Глебов И.Т.* Деревообработка: учеб. пособие / И.Т. Глебов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. – 305 с.

5. *Электронный ресурс.* – Режим доступа: <http://www.wood.ru/dorez.html>.

6. *Коляда В.В.* Кондиционеры, принципы работы, монтаж, установка, эксплуатация. Рекомендации по ремонту [Текст] / В.В. Коляда. – М.: Пресс, 2002. – 240 с.

7. *Акимова Н.А.* Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования [Текст] / Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленц, И.И. Сентюрихин. – М.: Изд-во «Мастерство», 2002. – 296 с.

8. *Лебедев В.С.* Основные процессы, машины и аппараты предприятий бытового обслуживания: учебник для вузов [Текст] / В.С. Лебедев. – М.: Легкая индустрия, 1976. – 399 с.

9. *Электронный ресурс.* – Режим доступа: www.td-kommash.ru. – Оборудование для прачечной и химчистки: промышленные стиральные машины.

10. *ГОСТ 19930–91* Машины швейные бытовые.

11. *Электронный ресурс.* – Бытовые швейные машины. – Режим доступа: <http://shveinye-machines.ru/article/articles/bytovye-shveinye-mashiny/19/html>.

12. *Вальдберг А.Ю.* Технология пылеулавливания [Текст] // А.Ю. Вальдберг, Э.Я. Исянов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1985. – 192 с.

13. *Электронный ресурс.* – ООО «СЗЭМО «Электродвигатель»: Технический каталог по двигателям для работы в составе ЧРП. – Режим доступа: http://szemo.ru/doc/catalog-crpt_07.05.pdf.

14. *Электронный ресурс.* – ООО «ЭЛРЕ»: Каталог электродвигателей для частотного регулирования ЭЛРЕ (ДАР). – Режим доступа: http://www.электродвигатели-редукторы.рф/files/elre/katalog_elre_2012_ru.pdf.

15. *Электронный ресурс.* – ОАО «Ярославский электромашиностроительный завод» (ОАО «ELDIN»): Асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором серии «А» и «РА» для работы с ЧРП для различного назначения. – Режим доступа: http://www.eldin.ru/files/other/katalog_dvig_dlya_rab_s_PCh.pdf.

16. *Электронный ресурс*. – ООО «ЭЛРЕ»: Электродвигатели АДЧР Русэлпром-Мехатроника. – Режим доступа: <http://www.электродвигатели-редукторы.рф/images/мехатроника/katalog-mehatronika.pdf>.

References

1. *Braslavskij I.Ja.* Jenergosberegajushhij asinhronnyj jelektroprivod: ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij [Tekst] / I.Ja. Braslavskij, Z.Sh. Ishmatov, V.M. Poljakov / Pod red. I.Ja. Braslavskogo. – M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2004. – 256 s.
2. *Il'inskij N.F.* Jelektroprivod: jenergo- i resursosberezhenie: ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij [Tekst] / N.F. Il'inskij, V.V. Moskalenko. – M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2008. – 208 s.
3. *Jelektrotehnika: uchebnoe posobie dlja vuzov*. – V 3-h knigah. Kniga III. Jelektroprivody. Jelektrosnabzhenie [Tekst] / Pod red. P.A. Butyrina, R.H. Gafijatullina, A.L. Shestakova. – Cheljabinsk: Izd-vo JuUrGU, 2005. – 639 s.
4. *Glebov I.T.* Derevoobrabotka: ucheb. posobie / I.T. Glebov. – Ekaterinburg: Ural. gos. lesotehn. un-t, 2009. – 305 s.
5. *Elektronniy resurs*. – Rezhim dostupa: <http://www.wood.ru/dorez.html>.
6. *Koljada V.V.* Kondicionery. principy raboty, montazh, ustanovka, jekspluatacija. Rekomendacii po remontu [Tekst] / V.V. Koljada. – M.: Press, 2002. – 240 s.
7. *Akimova N.A.* Montazh, tehničeskaja jekspluatacija i remont jelektricheskogo i jelectromehaničeskogo oborudovanija [Tekst] / N.A. Akimova, N.F. Kotelenc, I.I. Sentjurihin. – M.: Izd-vo «Masterstvo», 2002. – 296 s.
8. *Lebedev V.S.* Osnovnye processy, mashiny i apparaty predpriyatij bytovogo obsluzhivanija: uchebnik dlja vuzov. [Tekst] / V.S. Lebedev. – M.: Lekgaja industrija, 1976. – 399 s.
9. *Elektronniy resurs*. – Rezhim dostupa: www.td-kommash.ru. – Oborudovanie dlja prachečnoj i himčistki: promyšlennye stiral'nye mashiny.
10. *GOST 19930–91* Mashiny shvejnyj bytovye.
11. *Elektronniy resurs*. – Bytovye shvejnye mashiny. – Rezhim dostupa: <http://shveinye-mashines.ru/article/articles/bytovye-shvejnye-mashiny/19/html>.
12. *Val'dberg A.Ju.* Tehnologija pyleulavlivanija [Tekst] // A.Ju. Val'dberg, Je.Ja. Isjanov. – L.: Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie, 1985. – 192 s.
13. *Elektronniy resurs*. – ООО «SZJeMO «Jelektrodivigatel'»: Tehničeskij katalog po divigateljam dlja raboty v sostave ChRP. – Rezhim dostupa: http://szemo.ru/doc/catalog-crpt_07.05.pdf.
14. *Elektronniy resurs*. – ООО «JeLRE»: Katalog jelektrodivigatelej dlja častotnogo regulirovanija JeLRE (DAR). – Rezhim dostupa: http://www.jelektrodivigateli-reduktory.rf/files/elre/katalog_elre_2012_ru.pdf.
15. *Elektronniy resurs*. – OAO «Jaroslavskij jelektromashinostroitel'nyj zavod» (OAO «ELDIN»): Asinhronnye trehfaznye jelektrodivigateli s korotkozamknutym rotorom serii «A» i «RA» dlja raboty s ChRP dlja različnogo naznachenija. – Rezhim dostupa: http://www.eldin.ru/files/other/katalog_dvig_dlya_rab_s_PCh.pdf.
16. *Elektronniy resurs*. – ООО «JeLRE»: Jelektrodivigateli ADChR Rusjelprom-Mehatronika. – Rezhim dostupa: <http://www.jelektrodivigateli-reduktory.rf/images/mehatronika/katalog-mehatronika.pdf>.



Славутский А.Л.

Slavutski A.L.

*аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»,
Россия, г. Чебоксары*

УДК 621.311.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ УЗЛА НАГРУЗКИ С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

Статья посвящена моделированию переходных процессов в узлах нагрузки энергосистемы. Акцент сделан на узлы нагрузки, содержащие мощные асинхронные двигатели. Представлена методика расчета переходных процессов в электрических цепях через синтетические схемы постоянного тока (алгоритм Г. Доммеля). Рассмотрена динамическая модель асинхронного двигателя в фазных координатах. Модель двигателя позволяет отслеживать изменение угловой скорости и электромагнитного момента на валу ротора, а также – варьировать механический момент сопротивления. Применение модели позволяет детально рассмотреть процессы, связанные с изменением скорости вращения электродвигателя при изменении параметров сети или механической нагрузки на валу ротора. Примененный подход дает возможность рассматривать взаимное влияние двигателя и сети в базисе фазных координат и работать с мгновенными значениями токов и напряжений. Это позволяет оценить искажение формы сигналов и изменение частоты сети при сложных переходных процессах, например, во время выбега двигателя с рекуперацией энергии в сеть. Использование методики показано на примере моделирования режимов узла нагрузки 10 кВ, содержащего асинхронный двигатель, статическую нагрузку, устройство компенсации реактивной мощности в виде батареи конденсаторов. Рассматриваемый подход обладает рядом важных достоинств: применение алгоритма Г. Доммеля дает возможность учитывать различные виды нелинейностей элементов системы и не накладывает ограничений на форму и гармонический состав сигналов в модели. Кроме того, алгоритм позволяет менять параметры и конфигурацию схемы на временном диапазоне моделирования, что увеличивает спектр рассматриваемых режимов. При рассмотрении узла нагрузки в базисе фазных координат легко моделируются различные виды несимметрии и сложных повреждений. Модель асинхронного двигателя обладает высокой гибкостью и дает хорошие результаты при моделировании динамических режимов.

Ключевые слова: узел нагрузки, переходные процессы, асинхронный двигатель, фазные координаты, динамическая модель, пуск, выбег, мгновенные значения.

MODELING TRANSIENTS IN THE LOAD NODES CONTAINING THE INDUCTION MOTORS IN PHASE COORDINATES

The article concentrates on the modeling of transients in the power system load nodes. Under consideration the load nodes contains the powerful induction motors. Methodology for calculation transients in electrical circuits using the direct current synthetic schemes (Dommel algorithm) is recommended. We consider the dynamic model of the induction motor in phase coordinates. The model enables to study the angular velocity and electromagnetic torque of motor and variation of the mechanical torque. The application of the model enables the detailed studying of processes associated with change of motor velocity when changing network parameters or mechanical torque on rotor shaft. The approach makes it possible to consider the mutual influence of the motor and the network in the basis of the phase coordinates and to work with instantaneous values of currents and voltages. This allows us to estimate the distortion of the signals form and frequency in complex network transients, for example, during the run-down of the motor with regenerative power supply. Using the techniques illustrated by simulation mode of the

load node containing 10 kV induction motor, static load, reactive power compensation in the form of a capacitor bank. The considered approach has several important advantages: the using of the Dommel algorithm allows to considerate different types of non-linear elements of the system and does not impose restrictions on the forms and harmonic composition of the signals in the model. Moreover, the algorithm allows to change the parameters and configuration of the circuit in the time range of modeling, which increases the number of the modes. The considering of the load centers in the basis of the phase coordinates, the different types of asymmetry and complex faults can be easily modeled. Model of induction motor has high flexibility and gives good results in the simulation of dynamic modes.

Key words: load node, transient process, induction motor, phase coordinates, dynamic model, start, run-down, instantaneous values.

Моделирование переходных режимов узлов нагрузки требует применения методик расчета, учитывающих динамические свойства электрических элементов и позволяющих применять динамические модели элементов энергосистем. Узел нагрузки как электрическую цепь можно описать с определенными допущениями [1] системой дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа. Для некоторых элементов, например, электродвигателей, в эту систему включаются уравнения для механической части [2, 3].

Динамические модели электродвигателей обычно представлены в многофазной системе координат. Моделирование несимметричных режимов узла нагрузки не позволяет применять однолинейные схемы замещения. Совокупность этих фактов приводит к целесообразности использования базиса фазных координат.

При расчете переходных процессов на ЭВМ часто используется метод переменных состояния. Данный метод требует записи системы дифференциальных уравнений для всей цепи. Такой подход приводит к получению систем с большим количеством переменных, что усложняет вычисления и снижает стабильность расчетов для больших цепей с нелинейными элементами [1].

В работе применена методика сведения расчетов переходного процесса в электрической цепи к расчету синтетических схем постоянного тока [1]. В зарубежной практике данная методика известна как алгоритм Германа Доммеля (Herman Dommel) [4, 5]. Этот алгоритм имеет ряд преимуществ при программной реализации, что доказано его широким использованием при создании продуктов на-

шими зарубежными коллегами. Алгоритм имеет следующие преимущества: в отличие от метода переменных состояния [6] он не приводит к записи дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа, а позволяет сразу перейти к уравнениям цепи постоянного тока. Получившаяся цепь постоянного тока и исходная цепь имеет одинаковую топологию, что повышает удобство и наглядность метода. Метод не накладывает ограничений на форму сигналов источников и позволяет относительно легко учесть нелинейные характеристики элементов. Следует отметить, что данный метод дает на выходе мгновенные значения токов и напряжений во всех ветвях и узлах схемы.

Методика разделяется на несколько основных этапов:

1. Аппроксимация дифференциальных уравнений отдельных элементов цепи разностными уравнениями, с которыми сопоставляют чисто резистивные схемы.
2. Формирование на каждом шаге расчета систем алгебраических уравнений, соответствующих резистивным схемам замещения цепей.
3. Решение систем алгебраических уравнений, получаемых на шаге 2.

Проведем разностную аппроксимацию уравнений накопительных элементов:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}, u_L = L \frac{di_L}{dt},$$

где C – емкость, Φ ; L – индуктивность, Гн; i_L и i_C – ток индуктивности и ток емкости, u_C и u_L – напряжение на емкости и напряжение на индуктивности. Согласно методу трапеций [7]

$$\frac{u_{Ln+1} + u_{Ln}}{2} = \frac{i_{Ln+1} - i_{Ln}}{h} L \Rightarrow u_{Ln+1} = \frac{2L}{h} i_{Ln+1} - \frac{2L}{h} i_{Ln} - u_{Ln}; \quad (1)$$

$$\frac{i_{Cn+1} + i_{Cn}}{2} = \frac{u_{Cn+1} - u_{Cn}}{h} C \Rightarrow u_{Cn+1} = \frac{h}{2C} i_{Cn+1} + \frac{h}{2C} i_{Cn} + u_{Cn}, \quad (2)$$

где u_{Ln+1} – напряжение на индуктивности в момент времени $t = t_{n+1}$, i_{Ln+1} и i_{Ln} – ток в индуктивности в моменты времени $t = t_{n+1}$ и $t = t_n$ соответственно, i_{Cn+1} – ток в емкости в момент времени $t = t_{n+1}$, u_{Cn+1} и u_{Cn} – напряжение на емкости в моменты времени $t = t_{n+1}$ и $t = t_n$ соответственно, h – шаг дискретизации.

Полученные выражения определяют двухполюсники, состоящие из сопротивления $R_L = \frac{2L}{h}$, $R_C = \frac{h}{2C}$ и ЭДС $E_C = u_{Cn} + \frac{h}{2C}i_{Cn}$, $E_L = \frac{2L}{h}i_n + u_{Ln}$ соединенных последовательно (рис. 1). Используя формулы (1) и (2) на $n+1$ шаге расчета для нахождения параметров схем, представленных на рис. 1, получим схемы замещения накопительных элементов на текущем шаге расчета. Затем составим схему той же топологической структуры, что и исходная, из полученных схем замещения соответствующих элементов. Рассчитаем эту схему любым методом, например, контурных токов или узловых потенциалов [8].

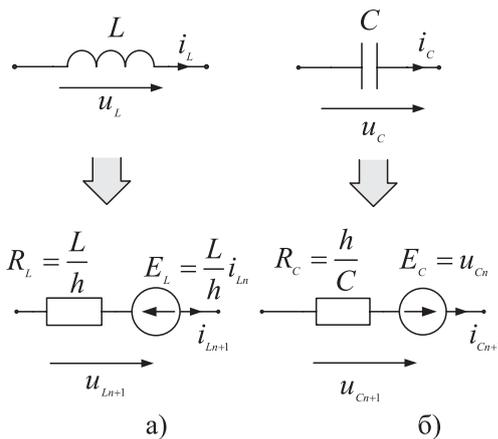


Рис 1. Переход от накопительного элемента

к его резистивной схеме замещения для расчета переходного процесса: а – для индуктивности, б – для емкости

Применим приемы макромоделирования для эквивалентирования ветви с взаимной индуктивностью (рис. 2).

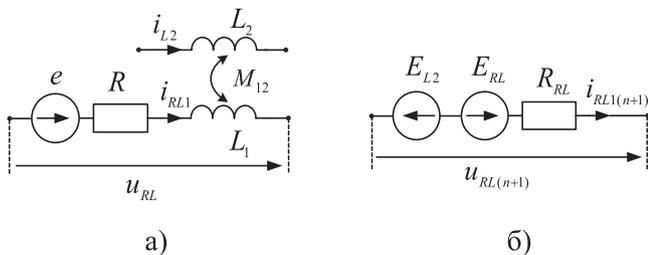


Рис. 2. Ветвь, имеющая взаимную индуктивность

с соседней: а – схема ветви; б – эквивалентная резистивная схема для расчета переходного процесса

Уравнение (3) описывает ветвь с взаимной индуктивностью. Аппроксимируя уравнение (3) методом трапеций, получим уравнение (4):

$$-u_{RL} = -e + i_{RL1}R + L_1 \frac{di_{RL1}}{dt} + M_{12} \frac{di_{L2}}{dt}, \quad (3)$$

$$u_{RL(n+1)} = u_{RL(n)} + e_{n+1} + e_n + i_{RL1(n)} \left(\frac{2L}{h} - R \right) + \frac{2M_{12}}{h} i_{L2(n)} - i_{RL1(n+1)} \left(\frac{2L}{h} + R \right) - \frac{2M_{12}}{h} i_{L2(n+1)}, \quad (4)$$

где M_{12} – коэффициент взаимной индукции, Гн.

Резистивная схема, соответствующая выражению (4), приведена на рис. 2, б. В этой схеме:

$$E_{RL} = u_{RL(n)} + e_{n+1} + e_n + i_{RL1(n)} \left(\frac{2L}{h} - R \right) + \frac{2M_{12}}{h} i_{L2(n)}, \quad R_{RL} = \frac{2L}{h} + R.$$

Легко заметить, что при наличии индуктивной связи выражение для E_{RL} включает в себя дополнительный член $\frac{2M_{12}}{h} i_{L2(n)}$, позволяющий учесть влияние ЭДС, наведенной от ветви, индуктивно связанной с данной. Кроме того, схема содержит дополнительную ЭДС $E_{L2} = \frac{2M_{12}}{h} i_{L2(n+1)}$, с помощью которой в схеме учитывается взаимное влияние ветвей друг на друга на текущем шаге расчета.

Расчет переходного процесса в схеме осуществляется путем решения системы линейных алгебраических уравнений сгенерированной цепи постоянного тока для каждого момента времени $t = t_{n+1}$. При этом топология цепи постоянного тока не изменяется, меняются только значения ЭДС ветвей с реактивными элементами в зависимости от предыдущих рассчитанных значений и мгновенных значений источников напряжения. Для нелинейных элементов или элементов с изменяющимися во времени параметрами могут изменяться значения сопротивлений на каждом шаге дискретизации. Например, для моделей электродвигателей, где взаимные индуктивности между цепью статора и ротора изменяются в зависимости от положения ротора.

Для расчета переходного процесса в асинхронной машине существуют различные методики ее учета в схеме. Самые распространенные методы учета электродвигателя в электрической цепи – это учет его в виде Т- или Г-обратной схемы замещения [9]. При этом активное сопротивление ветви ротора зависит от скольжения в двигателе. Такой подход

является наиболее простым при учете двигателя в схеме сети и компактности математической модели машины. Стоит отметить, что простота модели связана с множеством допущений и приводит к низкой точности результатов, особенно при моделировании нестационарных режимов. Данная модель изначально ориентирована на применение в расчетах стационарных режимов. Эта модель не подходит для применения совместно с алгоритмом Доммеля, поскольку предполагает использование действующих значений тока при расчете механических параметров машины – момента, угловой скорости и т. д. Динамические модели асинхронных двигателей, как правило, имеют более сложную структуру и представлены в координатах, связанных с ротором или статором машины, например, координаты $(d, q, 0)$, (x, y, z) и т. д. [2, 3]. В данной работе применена модель в фазных координатах. Такой выбор связан с простотой согласования модели сети и модели двигателя – сеть и двигатель моделируются как трехфазные системы, что позволяет напрямую подключить зажимы модели двигателя к трехфазной модели сети без дополнительных преобразований систем

координат [3]. Система фазных координат удобна своей наглядностью и позволяет легко моделировать сложные симметричные и несимметричные режимы многофазной сети.

Модель асинхронного двигателя в фазных координатах описывается системой уравнений в матричной форме [2]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s + p\mathbf{L}_s & p\mathbf{L}'_{sr} \\ p(\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{R}'_r + p\mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}'_r \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где p – оператор дифференцирования: $p = \frac{d}{dt}$; \mathbf{u}_s и \mathbf{u}'_r – векторы столбцы напряжений ветвей статора и ротора; \mathbf{i}_s и \mathbf{i}'_r – векторы столбцы токов ветвей статора и ротора:

$$\mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}'_r = \begin{bmatrix} u'_{ra} \\ u'_{rb} \\ u'_{rc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}'_r = \begin{bmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{bmatrix};$$

\mathbf{R}_s и \mathbf{R}'_r – диагональные матрицы активных сопротивлений ветвей ротора и статора (Ом); \mathbf{L}_s и \mathbf{L}'_r – матрицы индуктивностей ветвей статора и ротора:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix};$$

L_{ls} и L'_{lr} – собственные индуктивности ветвей статора и ротора (Гн), L_{ms} – индуктивность намагничивания ветви статора (Гн);

\mathbf{L}'_{sr} – матрица взаимных индуктивностей между ветвями статора и ротора:

$$\mathbf{L}'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix};$$

θ_r – угол поворота ротора двигателя относительно статора (рад).

С указанной системой уравнений для асинхронной машины можно сопоставить трехфазную схему замещения, содержащую 6 ветвей, индуктивно связанных между собой (рис. 3).

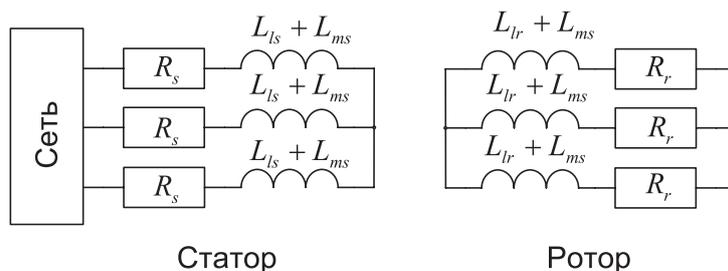


Рис 3. Схема замещения асинхронного двигателя в фазных координатах. Все ветви индуктивно связаны. Индуктивные связи на рисунке не указаны

Величины момента, угловой скорости ротора и угла его поворота относительно статора связаны между собой следующими выражениями [2, 3, 10, 11, 12]:

$$T_e = \frac{z}{2} (\mathbf{i}_s)^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [\mathbf{L}'_{sr}] \mathbf{i}'_r, \quad (6)$$

$$T_e = J \left(\frac{2}{z} \right) \frac{\partial \omega_r}{\partial t} + T_m, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} = \omega_r, \quad (8)$$

где T_e – электромагнитный момент на валу ротора, z – число полюсов двигателя, ω_r – угловая скорость вращения ротора, J – момент инерции ротора, T_m – механический момент сопротивления на валу ротора.

Численно решая уравнения (6) – (8) для величин T_e , ω_r и θ_r на каждом новом шаге дискретизации по времени $t = t_{n+1}$ и подставляя новое значение θ_r в систему (5), получаем динамическую модель асинхронного двигателя, которая легко согласуется с алгоритмом Доммеля.

После дискретизации уравнений (6) – (8) по правилу трапеций они решаются относительно величин T_e , ω_r и θ_r на каждом временном шаге $t = t_{n+1}$ совместно с уравнениями для электрической цепи, составленными согласно алгоритму Доммеля [11, 12].

Модель силового понижающего трансформатора представлена двумя индуктивно связанными ветвями для каждой фазы.

Выбранный подход к моделированию узла нагрузки с асинхронным двигателем позволяет производить расчет большого спектра режимов. Динамическая модель двигателя дает возможность моделировать режимы пуска, выбега и установившегося режима машины. Возможен учет изменяющегося во времени, или от угловой скорости, момента сопро-

тивления на валу ротора. Модель позволяет вести расчет генераторного режима при выбега двигателя. Поскольку модель задана в фазных координатах, возможно без дополнительных преобразований моделировать несимметричные режимы сети и двигателя. Поскольку согласно алгоритму Доммеля расчет производится для всех узлов и ветвей схемы, можно отследить взаимное влияние режимов работы двигателя и нагрузки. Используемая модель трансформатора исключает необходимость приведения параметров схемы к одному классу напряжения, поскольку трансформатор моделируется как набор индуктивно связанных ветвей. Такой подход дает возможность оценить влияние переходных процессов на стороне низкого напряжения на состояние сети стороны высокого напряжения.

Для примера рассмотрим модель узла нагрузки 10 кВ, показанного на рис. 4.

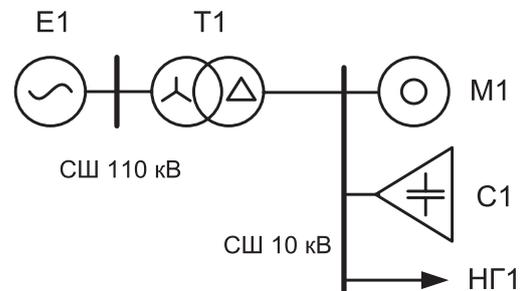


Рис. 4. Схема исследуемого узла нагрузки

Параметры узла следующие: $E_1 = 110 \sin(2 \cdot 50 \cdot \pi)$, параметры трансформатора Т1 описаны в табл. 1. Параметры двигателя М1 в табл. 2, нагрузка: $S_{НГ1} = 1 \text{ МВА}$, $\cos \varphi_{НГ1} = 0,9$, компенсирующее устройство имеет мощность $Q_{C1} = 840 \text{ кВАР}$. Параметры обмоток трансформатора рассчитаны приблизительно, из паспортных данных.

Таблица 1

Параметры трансформатора Т1

S, МВА	$U_{ВН}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	ΔP_{K2} , кВт	u_{K2} , %	ΔP_{X2} , кВт
16	110	11	85	10.5	18
I_{X2} , %	$R_{ВН}$, Ом	$L_{ВН}$, Гн	$R_{НН}$, Ом	$L_{НН}$, Гн	$M_{В-Н}$, Гн
0.7	2.21	1.3933	0.22	0.0139	0.1393

Таблица 2

Параметры асинхронного двигателя М1 (АЗМП-5000)

$P_{НОМ}$, кВт	$U_{ПИТ}$, кВ	n , об/мин	z	s	$I_{СНОМ}$, А	КПД, %
5000	10	2985	1	0.005	330	98
$\cos \varphi_{НОМ}$	$k_{П}$	R_s , Ом	R'_r , Ом	L_s , Гн	L'_r , Гн	L_{sr} , Гн
0.9	7	0.13	0.112	0.1959	0.1992	0.1898

Для демонстрации работы методики произведено моделирование двух режимов работы указанного узла нагрузки: пуск двигателя на вентиляторную нагрузку при работающем узле нагрузки и выбег двигателя при отключении питания узла нагрузки с последующим возобновлением питания.

1. Пуск двигателя на вентиляторную нагрузку

при работающем узле осуществляется при механической характеристике момента сопротивления на валу двигателя, заданной по формуле (9). Пуск происходит в момент времени $t = 0,1$ с.

$$T_M = \omega^2 / 6.6 \quad (9)$$

Ток на шинах и скольжение двигателя показаны на рис. 5.

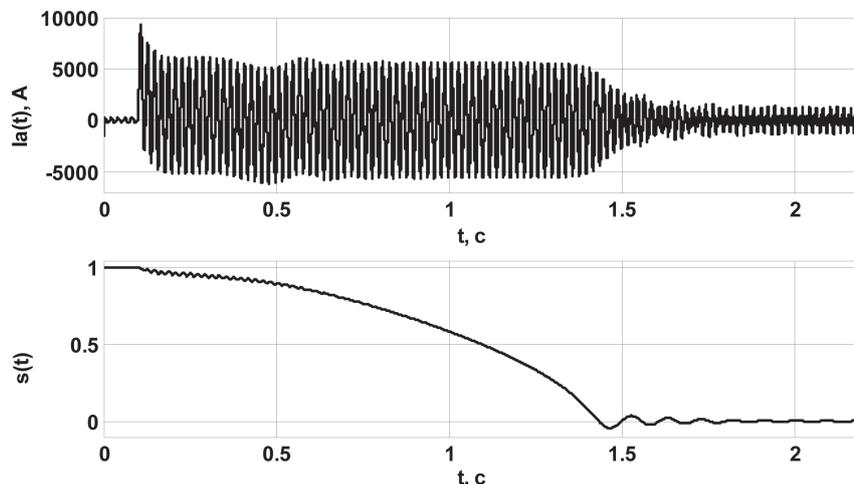


Рис. 5. График тока фазы А на шинах узла нагрузки и скольжения асинхронного двигателя при его пуске

Графики рис. 5 иллюстрируют работу методики при переходных процессах в узле нагрузки, связанных с нестационарными режимами электродвигателя. При разгоне двигателя в статоре и сети течет пусковой ток, амплитуда которого начинает уменьшаться только при достижении скольжения, близкого к номинальному. Следует отметить, что изменения амплитуды напряжения на стороне 10 кВ незначительны, в силу достаточной мощности трансформатора и питающей системы.

2. Выбег двигателя при отключении питания узла нагрузки с последующим возобновлением питания.

Данный режим показан при начальных условиях установившегося режима работы узла. В момент времени $t = 0,1$ с происходит отключение питания трансформатора на стороне 110 кВ. Затем происходит включение питания на стороне 110 кВ в момент времени $t = 1,5$ с. Графики показаны на рис 6.

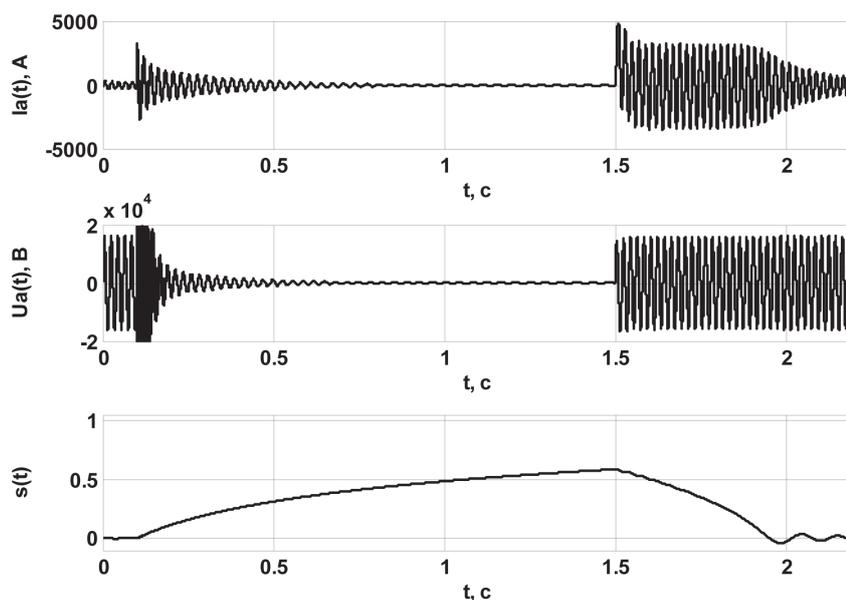


Рис. 6. График тока фазы А статора электродвигателя М1, напряжения на шинах узла нагрузки и скольжения двигателя М1

На рисунке 6 показан ток в статоре двигателя, поскольку в момент выбега именно двигатель является источником напряжения и через него течет суммарный ток узла. Из графиков видно, что, как и предполагается, напряжение в узле пропадает не мгновенно, а начинает постепенно спадать. При этом частота сети зависит от частоты вращения ротора двигателя, поскольку двигатель работает в генераторном режиме. Кроме того, переходный процесс при отключении верхней стороны трансформатора приводит к появлению высших гармоник на резонансной частоте индуктивной составляющей нагрузки и емкостью устройства компенсации реактивной мощности.

Выводы

Представленная методика позволяет моделировать узлы нагрузки в фазных координатах, что дает возможность с легкостью учитывать различные виды несимметрии трехфазных сетей и нагрузок.

Применение алгоритма Доммеля дает возможность учитывать различные виды нелинейности в элементах моделируемой энергосистемы, задавать форму сигналов источников произвольной формы и частоты. Поскольку моделирование происходит во временной области и в мгновенных величинах, частотная область исследования переходных процессов ограничивается только частотными свойствами моделей элементов и размером шага моделирования. Это позволяет легко моделировать переходные процессы с различным гармоническим составом токов и напряжений. Алгоритм позволяет менять параметры и конфигурацию схемы на временном диапазоне моделирования, что увеличивает спектр рассматриваемых режимов.

Модель асинхронного двигателя в фазных координатах, в совокупности с алгоритмом Доммеля, имеет следующие важные достоинства:

- возможность моделирования несимметричных режимов;
- отдельные цепи статора и ротора, связанные матрицей индуктивных связей, что позволяет рассматривать и оценивать состояния этих цепей в отдельности;
- расчет состояния механических переменных двигателя во времени, что дает возможность отследить угловую скорость, электромагнитный момент и скольжение двигателя во время переходных процессов;
- совокупность модели двигателя и методики расчета переходного процесса позволяет моделировать режим выбега АД в режиме рекуперации, что дает возможность оценить влияние данного режима на сеть;

– методика позволяет задавать момент сопротивления на валу двигателя переменным в зависимости от различных величин модели: времени, угловой скорости ротора или других.

Список литературы

1. *Бутырин П.А.* Моделирование и машинный расчет электрических цепей: Учеб. пособ. [Текст] / П.А. Бутырин, К.С. Демирчан. – М.: Высш. шк., 1988. – 335 с.
2. *Krause Paul C.* Analysis of the machinery and drive systems [Text] / Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff. – New York: IEEE PRESS. – 2002. – 630 p.
3. *Виноградов А.Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст] / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
4. *Dommel H.W.* Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks [Text] / H.W. Dommel // IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. – 1969. – VOL. PAS-88. – № 4. – С. 388–399.
5. *Watson Neville.* Power System Electromagnetic Transients Simulation. London [Text] / Neville Watson, Jos Arillaga. – The Institution of Engineering and Technology. – 2007. – 621 p.
6. *Чернин А.Б.* Расчет электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности [Текст] / А.Б. Чернин, С.Б. Лосев. – М.: Энергия, 1972. – 144 с.
7. *Плотников П.В.* Основы численных методов [Текст] / П.В. Плотников, Л.И. Турчак – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 с.
8. *Демирчан К.С.* Теоретические основы электротехники. В 3 томах. Т 1 [Текст] / К.С. Демирчан, Н.В. Коровкин, Л.Р. Нейман, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 443 с.
9. *Москаленко В.В.* Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
10. *Marti J.R.* Phase-domain induction motor model for power system simulators. IEEE WESCANEX '95 PROCEEDING. – P. 276–282.
11. *Wang L.* Method of interfacing rotating machine models in transient simulation programs [Text] / L. Wang, J. Jatskevich, V. Dinavahi et al. // IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. – VOL. 25. – №. 2. – APRIL 2010. – P. 891–903.
12. *Wang L.A.* voltage-behind-reactance induction machine model for the EMTP-type solution [Text]

/ L. Wang, J. Jatskewich, C. Wang, P. Li. // IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. – VOL. 23. – № 3. – AUGUST 2008. – P. 1226–1238.

References

1. *Butyrin P.A.* Modelirovanie i mashinnyj raschet jelektricheskikh cepej: Ucheb. posob. [Tekst] / P.A. Butyrin, K.S. Demirchan. – M.: Vyssh. shk., 1988. – 335 s.

2. *Krause Paul C.* Analysis of the machinery and drive systems [Text] / Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff. – New York: IEEE PRESS. – 2002. – 630 p.

3. *Vinogradov A.B.* Vektornoe upravlenie jelektroprivodami peremennogo toka [Tekst] / A.B. Vinogradov. – Ivanovo: GOUVPO «Ivanovskij gosudarstvennyj jenergeticheskij universitet imeni V.I. Lenina», 2008. – 298 s.

4. *Dommel H.W.* Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks [Text] / H.W. Dommel // IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. – 1969. – VOL. PAS-88. – № 4. – P. 388 – 399.

5. *Watson Neville.* Power System Electromagnetic Transients Simulation. London [Text] / Neville Watson, Jos Arillaga. – The Institution of Engineering and Technology. – 2007. – 621 p.

6. *Chernin A.B.* Raschet jelektromagnitnyh perehodnyh processov dlja relejnoj zashhity na linijah bol'shoj protjazhennosti [Tekst] / A.B. Chernin, S.B. Losev. – M. : Jenergija, 1972. – 144 s.

7. *Plotnikov P.V.* Osnovy chislennyh metodov [Tekst] / P.V. Plotnikov, L.I. Turchak – M.: FIZMATLIT, 2003. – 304 s.

8. *Demirchjan K.S.* Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki. V 3 tomah. T 1 [Tekst] / K.S. Demirchjan, N.V. Korovkin, L.R. Nejman, V.L. Chechurin. – SPb.: Piter, 2003. – 443 s.

9. *Moskalenko V.V.* Jelektricheskij privod: uchebnik dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij [Tekst] / V.V. Moskalenko. – M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2007. – 368 s.

10. *Marti J.R.* Phase-domain induction motor model for power system simulators. IEEE WESCANEX '95 PROCEEDING. – P. 276–282.

11. *Wang L.* Method of interfacing rotating machine models in transient simulation programs [Text] / L. Wang, J. Jatskevich, V. Dinavahi et al. // IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. – VOL. 25. – № 2. – APRIL 2010. – P. 891–903.

12. *Wang L.A.* voltage-behind-reactance induction machine model for the EMTP-type solution [Text] / L. Wang, J. Jatskevich, C. Wang, P. Li. // IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. – VOL. 23. – № 3. – AUGUST 2008. – P. 1226–1238.



Карабельская И.В.

Karabel'skaya I.V.

аспирант кафедры «Физика», доцент кафедры
«Информатика и ИКТ» ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный
университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 537.3-047.37

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СИСТЕМАХ СО СЛОЖНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В статье сформулирована математическая модель самосогласованной краевой задачи, описывающей электрические поля с цилиндрическими неоднородностями, электродами и изоляторами; вычислительные алгоритмы понижения размерности задачи; рассмотрены примеры, иллюстрирующие возможности использования бесконечных интегральных преобразований для понижения размерности данной краевой задачи.

Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложными и геометрическими

параметрами имеют важное научно-техническое и экономическое значение при геофизических поисках глубокозалегающих полезных ископаемых методом электроразведки, скважинной и межскважинной электроразведки на постоянном токе. Подобные электрические поля возникают также в электрохимических методах защиты и обработки металлов [1–12].

Постоянно растущие требования к повышению точности, надежности и оперативности результатов исследований выдвигают на первый план в качестве метода исследования – математическое моделирование и вычислительный эксперимент на базе использования информационно-вычислительных комплексов [13]. Данная методология базируется на разработке математических моделей, адекватно описывающих реальные процессы и их программно-алгоритмическое обеспечение.

В настоящее время имеет место тенденция к созданию систем автоматизированных научных исследований на основе обобщенных математических моделей, универсальных алгоритмов и пакетов прикладных программ.

Стремление к получению достоверного численного анализа математических моделей с использованием ограниченных ресурсов вычислительных средств приводит к необходимости разработки эффективных алгоритмов. Основная трудность, находящаяся на этом пути, заключается в трехмерности и многосвязности расчетных областей, нелинейности математических моделей, содержащих в качестве исходных данных гладкие и разрывные функции.

Трудности решения таких задач в общем случае приводят к необходимости разработки экономичных алгоритмов для определенного класса задач. Эти алгоритмы, как правило, основаны на комбинировании различных вычислительных методов.

В данной работе предлагаются разработанные, апробированные на ЭВМ, комбинированные алгоритмы численного анализа электрических полей, описываемых трехмерными нелинейными самосогласованными краевыми задачами в неоднородной среде с цилиндрическими неоднородными включениями, изоляторами и электродами.

Этот класс моделей охватывает достаточно широкий круг теоретических задач электрических и тепловых полей, имеющих важные практические приложения.

Ключевые слова: математическая модель, самосогласованная краевая задача, исследования электрических полей постоянного тока, системы со сложными и геометрическими параметрами.

RESEARCH THE ELECTRIC FIELD OF DIRECT CURRENT SYSTEMS WITH COMPLEX GEOMETRIC PARAMETERS

The article presents a mathematical model of self-consistent boundary value problem describing the electric field with cylindrical inhomogeneities, the electrodes and insulators; computational algorithms for dimensionality reduction tasks, examples, illustrates the use of the infinite integral transform to reduce the dimensionality of the given boundary value problem.

Research the electric field of direct current systems with complex and geometric parameters has important scientific, technical and economic importance in geophysical search of deep-seated minerals method of electrical prospecting, downhole and crosshole GPR DC. Such electric fields occur in electrochemical methods of protection and processing of metals [1–12].

Ever-increasing demands to improve the accuracy, reliability and timeliness of the research results highlight as a method of research – mathematical modeling and computational experiment based on the use of information and computing systems [13]. This methodology is based on the development of mathematical models that adequately describe the real processes and their software-algorithmic software.

Currently there is a trend towards the creation of automated systems of scientific research on the basis of the generalized mathematical models, universal algorithms and software packages.

The desire to obtain accurate numerical analysis of mathematical models using the limited computational resources of funds leads to the development of effective algorithms. The main difficulty on this path is three-dimensional and mnogosvyaznoi settlement areas, non-linear mathematical models, containing the initial data is smooth and discontinuous functions.

The difficulty of solving such problems in the General case leads to the need to develop efficient algorithms for a given class of problems. These algorithms are usually based on the combination of different computational methods.

This work offers developed, tested on PC, the combined algorithms of numerical analysis of the electric fields described three-dimensional self-consistent nonlinear boundary problems in inhomogeneous media with inhomogeneous cylindrical inclusions, insulators and electrodes.

This class of models covers a rather broad theoretical problems of electric and thermal fields with important practical applications.

Key words: mathematical model, self-consistent boundary value problem, research the electric fields DC system with complex and geometric parameters.

1. Математическая постановка задач

Пусть трехмерная электрохимическая система (ЭХС) – область интегрирования Ω состоит из M цилиндрических областей (сечение области Ω плоскостью $z = \text{const}$), имеет границы раздела сред γ ($i = 1, 2, \dots, M-1$), N_i – точечных источников поля с интенсивностями I_{ij} ($j = 1, 2, \dots, N_i$), K_i – электродов с границами S_{ik} ($k = 1, 2, \dots, K_i$) и известными поляри-

зационными зависимостями плотностей тока от разности потенциалов на границе электрод/проводящая среда, P_i – электродов с заданным распределением тока или электроизоляторов.

При этих наиболее общих условиях расчет электрического поля можно получить решением граничной задачи

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} = -\frac{1}{\sigma_i} \sum_{j=1}^{N_i} I_{ij} \delta(x-x_{ij}) \delta(y-y_{ij}) \delta(z-z_{ij}), \quad i=1,2,\dots,M \tag{1.1}$$

По координате z определим линейные граничные условия вида

$$\alpha_1 u_i - \beta_1 \sigma_i \left. \frac{\partial^2 u_i}{\partial z} \right|_{z=0} = v_{1i}(x,y), \quad \alpha_2 u_i + \beta_2 \sigma_i \left. \frac{\partial^2 u_i}{\partial z} \right|_{z=0} = v_{2i}(x,y), \tag{1.2}$$

где константы $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2 \geq 0$ и $\beta_2 \geq 0$ и < 0 , $\alpha_2 + \beta_2 \leq 0$.

Если $H = \infty$, то вместо второго условия в (1.2)

возьмем $u_i \rightarrow 0$ при $z \rightarrow \infty$. (1.3)

На электродах и на границах раздела сред определим линейные граничные условия:

$$u_i + c_{ik}(x,y) \sigma_i \left. \frac{\partial u_i}{\partial n} \right|_{S_{ik}} = \varphi_{ik}(z), \quad k = 1,2,\dots,K_i, \quad I = 1,2,\dots, M \tag{1.4}$$

$$u_i - u_{i+1} \Big|_{\gamma_i} = 0, \quad \sigma_i \left. \frac{\partial u_i}{\partial n} \right|_{\gamma_i} + \sigma_{i+1} \left. \frac{\partial u_{i+1}}{\partial n} \right|_{\gamma_i} = 0, \quad i = 1,2,\dots, M-1 \tag{1.5}$$

$$\sigma_i \left. \frac{\partial u_i}{\partial n} \right|_{l_{ip}} = \psi_{ip}(x,y,z), \quad p=1,2,\dots, P_i, \quad i = 1,2,\dots, M \tag{1.6}$$

$$0 < z < H; \quad (x,y) \in \Omega$$

В (1.1) – (1.6) δ – дельта-функция Дирака; $c_{ik}(x,y)$ – коэффициент удельной поляризуемости k -го электрода в i -й среде;

$v_{1i}(x,y), v_{2i}(x,y)$ – функции распределения потенциала или плотности тока на плоскостях $z = 0$ и $z = H$;

$\psi_{ip}(x,y,z)$ – функции распределения плотности тока на границе p -го электрода в i -й среде (при $\psi_{ip} = 0$ граница l_{ip} является электроизолятором);

$\varphi_{ik}(z)$ – распределение потенциала внешней об-

кладки двойного электрического слоя на границе протяженный электрод – проводящая среда.

Функции $\varphi_{ik}(z) = \varphi_{ik} = \text{const}$, если удельные сопротивления цилиндрических электродов и их протяженность не велики. В этом случае падением потенциала по длине протяженного электрода можно пренебречь.

Для тонких протяженных электродов функции $\varphi_{ik}(z)$ находятся из решения интегродифференциального уравнения [14–16].

$$\varphi_{ik}''(z) = \rho_{ik}(z) \sigma_i \int_{s_{ik}} \frac{\partial u_i}{\partial n} ds_{ik} + \rho'_{ik}(z) \left[I_{ik} + \int_0^z d\tau \int_{s_{ik}} \sigma_i \frac{\partial u_i}{\partial n} ds_{ik} \right] \quad (1.7)$$

или при $\rho_{ik} = \text{const}$

$$\varphi_{ik}''(z) = \rho_{ik} \sigma_i \int_{s_{ik}} \frac{\partial u_i}{\partial n} ds_{ik}$$

при краевых условиях

$$\varphi_{ik}(0) = \varphi_{ik}, \quad \varphi_{ik}'(H) = I_{ik}, \quad (1.8)$$

или при условиях Коши

$$\varphi_{ik}(0) = \varphi_{ik}, \quad \varphi_{ik}'(0) = I_{ik} \rho_{ik}(0).$$

Здесь $\rho_{ik}(z)$ – функции, описывающие сопротивление единицы длины k -го электрода, расположенного в i -й среде.

Таким образом, сформулирована самосогласованная краевая задача (1.1) – (1.6), описывающая электрические поля с цилиндрическими неоднородностями, электродами и изоляторами.

Математическая модель (1.1) – (1.8) описывает многие задачи прикладной электрохимии, электрохимической защиты протяженных металлических сооружений от коррозии и задачи электроразведки и электрокаротажа.

2. Вычислительные алгоритмы понижения размерности задачи

Условно самосогласованную задачу (1.1) – (1.8) можно записать в операторной форме

$$L_1 u = f_1(x, y, z), \quad l_1 u|_{\Gamma} = \varphi, \quad L_2 \varphi = f_2 \frac{\partial u}{\partial n}, \quad l_2 \varphi|_{\gamma} = a, \quad (2.1)$$

где $f_1(x, y, z)$ – функция; u, φ – вектор-функции; a – вектор;

L_1, L_2, l_1, l_2, f_2 – операторы; Γ – граница расчетной области;

γ – множество, состоящее из концевых точек электродов.

Задачу (2.1) удобно решать по итерационной схеме расщепления на две независимые задачи

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial y^2} - \alpha^2 \bar{u}_i = -\frac{1}{\sigma_i} \sum_{j=1}^{N_i} I_{ij} \delta(x-x_{ij})(y-y_{ij}) \delta(z-z_{ij}) P(z_{ij}) + f_i(x, y) \quad (2.6)$$

$$\bar{u}_i + c_{ik}(x, y) \sigma_i \frac{\partial u_i}{\partial n} \Big|_{s_{ik}} = \bar{\varphi}_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, K_i, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.7)$$

$$L_1 u^k = f_1, \quad L_1 u^k \Big|_{\Gamma} = \varphi^{k-1}, \quad (2.2)$$

$$L_2 \varphi^k = f_2 \frac{\partial u^k}{\partial n}, \quad l_2 \varphi^k \Big|_{\gamma} = a, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.3)$$

При $k = 1$ и заданном $\varphi^0 = \text{const}$ решением задачи определяются функции $u_i^1(x, y, z)$. Функции $u_i^1(x, y, z)$ позволяют из (2.3) определить функции $\varphi_i^1(z)$ и, таким образом, итерационную схему расщепления можно представить в виде

$$\varphi^0 \rightarrow u^1 \rightarrow \varphi^1 \rightarrow u^2 \rightarrow \varphi^2 \rightarrow \dots \quad (2.4)$$

Наиболее простой задачей в схеме (2.4) является задача (2.3), которая относится либо к краевой задаче для обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка, либо к задаче Коши для этого уравнения. Для их решения эффективны разностные схемы в сочетании с методом прогонки или, например, метод Рунге – Кутты [17]. Задача (2.2) в схеме (2.4) является краевой задачей (1.1) – (1.6) с известными функциями (z) , эти функции определяются из задачи (2.1) (или (1.7), (1.8)).

Над задачей (1.1) – (1.6) совершим некоторое преобразование по переменной z :

$$A L_1 u = A f_1, \quad A l_1 u \Big|_{\Gamma} = A \varphi, \quad (2.5)$$

понижающее размерность задачи и приводящее к граничной задаче с двумя переменными x и y

$$\overline{u}_i - \overline{u}_{i+1} \Big|_{\gamma_i} = 0, \quad \sigma_i \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial n} + \sigma_{i+1} \frac{\partial \overline{u}_{i+1}}{\partial n} \Big|_{\gamma_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M-1 \quad (2.8)$$

$$\sigma_i \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial n} \Big|_{l_{ip}} = \overline{\psi}_{ip}(x, y, z), \quad p=1, 2, \dots, P_i, \quad i = 1, 2, \dots, M; (x, y) \in \Omega \quad (2.9)$$

Искомые функции $u_i(x, y, z)$ находятся обратным преобразованием. Так что

$$u_i(x, y, z) = \mathbf{B} \overline{u}_i(x, y, \alpha), \quad \text{где } \mathbf{B} - \text{оператор, обратный оператору } \mathbf{A}.$$

Рассмотрим конкретные виды преобразований

а) Пусть $\alpha = 1, \beta_1 = 0, H = \infty$, тогда

$$\overline{u}(x, y, \alpha) = \int_0^{\infty} u(x, y, z) \sin \alpha z dz, \quad u(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \overline{u}(x, y, \alpha) \sin \alpha z d\alpha,$$

$$P(z_{ij}) = \sin \alpha z_{ij}, \quad \overline{\psi}_{ip}(x, y, \alpha) = \int_0^{\infty} \psi_{ip}(x, y, z) \sin \alpha z dz,$$

$$f_i(x, y) = -\alpha v_{li}(x, y), \quad \overline{\varphi}_{ik}(\alpha) = \int_0^{\infty} \varphi_{ik}(z) \sin \alpha z dz$$

б) При $\alpha_1 = 0, \beta_1 = 1, H = \infty$ имеем

$$\overline{u}(x, y, \alpha) = \int_0^{\infty} u(x, y, z) \cos \alpha z dz, \quad u(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \overline{u}(x, y, \alpha) \cos \alpha z d\alpha$$

$$P(z_{ij}) = \cos \alpha z_{ij}, \quad \overline{\psi}_{ip}(x, y, \alpha) = \int_0^{\infty} \psi_{ip}(x, y, z) \cos \alpha z dz$$

$$f_i(x, y) = -\frac{v_{li}(x, y)}{\sigma_i}, \quad \overline{\varphi}_{ik}(\alpha) = \int_0^{\infty} \varphi_{ik}(z) \cos \alpha z dz$$

в) Если $\alpha = 1, H = \infty, \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_M$, то

$$\overline{u}(x, y, \alpha) = \int_0^{\infty} u(x, y, z) \psi(z, \alpha) dz, \quad u(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \overline{u}(x, y, \alpha) \frac{\psi(z, \alpha)}{h^2 + \alpha^2} d\alpha$$

$$\psi(z, \alpha) = \alpha \cos \alpha x + h \sin \alpha x, \quad h = \frac{1}{\sigma_1 \beta_1}, \quad P(z_{ij}) = \psi(z_{ij}, \alpha),$$

$$\overline{\psi}_{ip}(x, y, \alpha) = \int_0^{\infty} \psi_{ip}(x, y, z) \psi(z, \alpha) dz, \quad f_i(x, y) = -\frac{v_{li}(x, y)}{\sigma_1 \beta_1},$$

$$\overline{\varphi}_{ik}(\alpha) = \int_0^{\infty} \varphi_{ik}(z) \psi(z, \alpha) dz.$$

Примеры а), б) и в) иллюстрируют возможности использования бесконечных интегральных преобразований для понижения размерности задачи (1.1) – (1.8) с условием (1.3).

Список литературы

1. Иванов В.Т. Комплекс программно-алгорит-

мического обеспечения численных исследований электрических полей в некоторых сложных системах [Текст] / В.Т. Иванов, А.М. Болотнов, Ф.Г. Гадилова, Г.Я. Кильдибекова, В.Н. Кризский, И.У. Надергулов, И.В. Карабельская // Известия ВУЗов: Электромеханика. – 1987. – № 11. – С. 21 – 26.

2. Иванов В.Т. Комплекс программно-алгорит-

мического обеспечения численных исследований электрических полей в некоторых сложных системах. I Всесоюзная конф. по теоретической электротехнике [Текст] / В.Т. Иванов, А.М. Болотнов, Ф.Г. Гадилова, Г.Я. Кильдибекова, В.Н. Кризский, И.У. Надергулов, И.В. Карабельская // Тез. докл. – Ташкент, 1987. – С. 34–35.

3. *Болотнов А.М.* Методы расчета трехмерных краевых задач для эллиптических уравнений в многосвязных областях с цилиндрическими границами [Текст] / А.М. Болотнов, В.Т. Иванов, Г.Я. Кильдибекова, И.В. Карабельская. – Деп. в ВИНТИ 4.12.86. № 8870 – В86. – Уфа: БГУ, 1986. – 49 с.

4. *Ураков А.Р.* Исследования автомодельных процессов нестационарной ЭХО [Текст] / А.Р. Ураков, В.И. Карамов, И.В. Карабельская // Современная электротехнология в машиностроении: Сб. трудов Всероссийской науч.-техн. конф. – Тула, 1997. – С. 161–162.

5. *Ротинян А.Л.* Прикладная электрохимия [Текст] / А.Л. Ротинян. – Л.: Химия, 1974. – 536 с.

6. *Иванов В.Т.* Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки [Текст] / В.Т. Иванов, В.Г. Гусев, А.Н. Фокин. – М.: Машиностроение, 1986. – 211 с.

7. *Андреев И.Н.* Коррозия металлов и их защита [Текст] / И.Н. Андреев. – Казань: Татарское кн. изд-во, 1979. – 120 с.

8. *Заборовский А.И.* Электроразведка [Текст] / А.И. Заборовский. – М.: Гостехнефиздат, 1948.

9. *Дахнов В.Н.* Электрические и магнитные методы исследования скважин [Текст] / В.Н. Дахнов. – М.: Недра, 1981. – 334 с.

10. *Козырин А.К.* Электрическая корреляция разрезов скважин [Текст] / А.К. Козырин. – М.: Недра, 1985.

11. *Иванов В.Т.* Методы решения прямых и обратных задач электрокаротажа [Текст] / В.Т. Иванов, М.С. Масютина. – М.: Наука, 1983. – 143 с.

12. *Иванов В.Т.* Некоторые проблемы вычислительной математики применительно к расчетам электрических полей в электрохимических системах [Текст] / В.Т. Иванов; препринт докл. Президиуму БФАН СССР. – Уфа: БФАН СССР, 1983. – 39 с.

13. *Самарский А.А.* Проблемы применения вычислительной техники [Текст] / А.А. Самарский // Вестник АН СССР. – 1984. – № 11. – С. 17–29.

14. *Иванов В.Т.* [Текст] / В.Т. Иванов // Тез. докл. Всесоюзной конф. «Теория информационных систем и систем управления с распределенными параметрами»: ч.1. – Уфа: БФАН СССР, 1976. – С. 19–20.

15. *Иванов В.Т.* Методы расчета трехмерных электрических полей в электролитах [Текст] / В.Т.

Иванов // Краевые задачи математической физики и их приложения. – Уфа: БФАН СССР, 1976. – С. 18–53.

16. *Иванов В.Т.* Расчет трехмерных электрических полей в неоднородной среде с протяженными тонкими цилиндрическими электродами [Текст] / В.Т. Иванов, Н.П. Глазов, М.М. Махмутов. – Электричество. – 1985. – № 6. – С. 48–52.

17. *Самарский А.А.* Введение в численные методы [Текст] / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1982. – 271 с.

References

1. *Ivanov V.T.* Kompleks programmno-algoritmicheskogo obespechenija chislennyh issledovanij jelektricheskikh polej v nekotoryh slozhnyh sistemah [Tekst] / V.T. Ivanov, A.M. Bolotnov, F.G. Gadilova, G.Ja. Kil'dibekova, V.N. Krizskij, I.U. Nadergulov, I.V. Karabel'skaja // Izvestija VUZov: Jelektromehanika. – 1987. – № 11. – S. 21–26.

2. *Ivanov V.T.* Kompleks programmno-algoritmicheskogo obespechenija chislennyh issledovanij jelektricheskikh polej v nekotoryh slozhnyh sistemah. I Vsesojuznaja konf. po teoreticheskoj jelektrotehnike [Tekst] / V.T. Ivanov, A.M. Bolotnov, F.G. Gadilova, G.Ja. Kil'dibekova, V.N. Krizskij, I.U. Nadergulov, I.V. Karabel'skaja // Tez. dokl. – Tashkent, 1987. – S. 34–35.

3. *Bolotnov A.M.* Metody rascheta trehmernyh kraevyh zadach dlja jellipticheskikh uravnenij v mnogosvjaznyh oblastjah s cilindricheskimi granicami. [Tekst] / A.M. Bolotnov, V.T. Ivanov, G.Ja. Kil'dibekova, I.V. Karabel'skaja. – Dep. v VINITI 4.12.86. № 8870 – V86. – Ufa: BGU, 1986. – 49 s.

4. *Urakov A.R.* Issledovanija avtomodel'nyh processov nestacionarnoj JeHO [Tekst] / A.R. Urakov, V.I. Karamov, I.V. Karabel'skaja // Sovremennaja jelektrotehnologija v mashinostroenii: Sb. trudov Vserossijskoj nauch.-tehn. konf. – Tula, 1997. – S. 161–162.

5. *Rotinjan A.L.* Prikladnaja jelektrohimija [Tekst] / A.L. Rotinjan. – L.: Himija, 1974. – 536 s.

6. *Ivanov V.T.* Optimizacija jelektricheskikh polej, kontrol' i avtomatizacija gal'vanoobrabotki [Tekst] / V.T. Ivanov, V.G. Gusev, A.N. Fokin. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 211 s.

7. *Andreev I.N.* Korrozija metallov i ih zashhita [Tekst] / I.N. Andreev. – Kazan': Tatarskoe kn. izd-vo, 1979. – 120 s.

8. *Zaborovskij A.I.* Jelektrozvedka [Tekst] / A.I. Zaborovskij. – М.: Gostehnefizdat, 1948.

9. *Dahnov V.N.* Jelektricheskije i magnitnye metody issledovanija skvazhin [Tekst] / V.N. Dahnov. – М.: Nedra, 1981. – 334 s.

10. *Kozyrin A.K.* Jelektricheskaia korreljacija razrezov skvazhin [Tekst] / A.K. Kozyrin. – M.: Nedra, 1985.
11. *Ivanov V.T.* Metody reshenija prjamyh i obratnyh zadach jelektrorotazha [Tekst] / V.T. Ivanov, M.S. Masjutina. – M.: Nauka, 1983. – 143 s.
12. *Ivanov V.T.* Nekotorye problemy vychislitel'noj matematiki primenitel'no k raschetam jelektricheskikh polej v jelektrorhimicheskikh sistemah [Tekst] / V.T. Ivanov; preprint dokl. Prezidiumu BFAN SSSR. – Ufa: BFAN SSSR, 1983. – 39 s.
13. *Samarskij A.A.* Problemy primeneniia vychislitel'noj tehniki [Tekst] / A.A. Samarskij // Vestnik AN SSSR. – 1984. – № 11. – S. 17–29.
14. *Ivanov V.T.* [Tekst] / V.T. Ivanov // Tez. dokl. Vsesojuznoj konf. «Teorija informacionnyh sistem i sistem upravlenija s raspredelennymi parametrami» ch.1. – Ufa: BFAN SSSR, 1976. – S. 19–20.
15. *Ivanov V.T.* Metody rascheta trehmernykh jelektricheskikh polej v jelektrolitah [Tekst] / V.T. Ivanov // Kraevye zadachi matematicheskoi fiziki i ih prilozhenija, Ufa: BFAN SSSR, 1976. – S. 18–53.
16. *Ivanov V.T.* Raschet trehmernykh jelektricheskikh polej v neodnorodnoj srede s protjazhennymi tonkimi cilindricheskimi jelektrodami [Tekst] / V.T. Ivanov, N.P. Glazov, M.M. Mahmutov. – Jelektrichestvo. – 1985. – № 6. – S. 48–52.
17. *Samarskij A.A.* Vvedenie v chislennye metody [Tekst] / A.A. Samarskij. – M.: Nauka, 1982. – 271 s.



Исмагилов Ф.Р.
Ismagilov F.R.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



Саттаров Р.Р.
Sattarov R.R.

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



Гайсин Б.М.
Gaisin B.M.

преподаватель кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



Гумерова М.Б.
Gumerova M.B.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



Андроников Д.А.
Andronikov D.A.

главный технолог ООО «НТЦ ТПТ», Россия, г. Санкт-Петербург

УДК 621.311.25, 621.311.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СРЕДНИХ ШИРОТ РОССИИ

Статья посвящена исследованию характеристик автономных источников электроэнергии на основе фотоэлектрических модулей (ФЭМ), выполненных по разным технологиям, в условиях средних широт России. Изучен вопрос эффективности применения возобновляемых источников электроэнергии на основе фотоэлектрических элементов по номинальным и эксплуатационным техническим показателям и характеристикам. Описаны основные номинальные эксплуатационные параметры ФЭМ обоих типов, а также принцип работы и взаимодействие элементов тестовой фотоэлектрической системы. Все измерения выполнены при условиях наиболее близких к стандартным условиям испытаний. Произведено сравнение измеренных данных номинальной мощности по отношению к паспортным данным ФЭМ. Исследована эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую для каждого ФЭМ. Построены характеристики минимального, максимального и среднего значений температуры окружающей среды. Изучено

воздействие температуры окружающей среды на эффективность (КПД) преобразования солнечной энергии в электрическую. В ходе эксперимента произведено сравнение показателей среднемесячного уровня солнечной радиации с табличными данными по базам NASA. Сформулированы сравнительные выводы эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую для обоих ФЭМ, а также сравнение полученных результатов с паспортными данными ФЭМ.

Ключевые слова: автономные солнечные электростанции, автономные источники электроэнергии, солнечная энергетика, фотоэлектрические модули.

STUDY OF CHARACTERISTICS AUTONOMOUS SOURCES OF ELECTRICITY FROM PHOTOVOLTAIC MODULES UNDER MIDLATITUDES RUSSIA

The article investigates the performance of independent sources of electricity from photovoltaic modules (FEM), performed by different technologies in a middle latitudes of Russia. Explored the effectiveness of renewable electricity from photovoltaic cells in nominal and operational and technical performance characteristics. The basic nominal operating parameters of the PEM of both types, as well as the operation and interaction of the elements of the test photovoltaic system. All measurements were made under conditions as close to the standard test conditions. A comparison of the measured data nominal power in relation to the passport data of the PEM. The efficiency of conversion of solar energy into electrical energy for each PEM. Built characteristics of the minimum, maximum and average values of the ambient temperature. An effect of ambient temperature on the efficiency conversion of solar energy into electrical energy. In the experiment performed comparison of the average monthly level of solar radiation with tabular data bases NASA. Formulated comparative conclusions conversion efficiency of solar energy into electricity for both FEM and results are compared with published data of FEM.

Key words: autonomous solar power station, solar power energy, autonomous sources of electricity, photovoltaic modules.

Общеизвестно, что традиционные источники энергии являются невозобновляемыми, их запасы ограничены. В настоящее время растет интерес к альтернативным системам электроснабжения (АСЭС), использующим энергию возобновляемых источников энергии – ветра, солнца и воды. Несмотря на то, что стоимость электроэнергии, получаемой от АСЭС значительно выше, такие системы обладают рядом преимуществ перед традиционными: общедоступностью и неисчерпаемостью источника, большей экологичностью. С этой точки зрения наиболее предпочтительным является применение фотоэлектрических солнечных электростанций или фотоэлектростанций (ФЭС). Если оценивать долгосрочные перспективы, то можно отметить, что ФЭС при относительно высоких первоначальных капитальных затратах в процессе эксплуатации практически не требуют дополнительных вложений, т. к. источник энергии неисчерпаем и солнечные фотоэлектрические элементы имеют длительный срок службы.

Недостатки ФЭС также общеизвестны:

- низкая плотность солнечной энергии,
- зависимость от географической широты и климата местности,
- необходимость аккумуляции энергии,
- низкая эффективность солнечных фотоэлек-

трических элементов и их нагрев.

С учетом указанных достоинств и недостатков ФЭС принято выделять области применения солнечной электроэнергетики, в том числе географические.

В настоящее время наблюдается существенный прогресс и динамика в разработке, производстве и применении солнечных фотоэлектрических элементов, что приводит к расширению области применения ФЭС. Поэтому представляется целесообразным провести исследование современных солнечных панелей в «полевых» условиях не только по номинальным техническим показателям, но и эксплуатационным характеристикам. Для РФ наиболее важным является оценка целесообразности и эффективности применения ФЭС в средних широтах (находящихся между 40 и 65° северной широты), характеризующихся продолжительными зимами (5 месяцев), высокой облачностью в течение года. С этой целью в рамках совместных научных исследований в области возобновляемой энергетики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ) и ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе» была установлена тестовая ФЭС (ТФЭС), показанная на рисунке 1, работающая в реальных условиях [1–4]. Угол установки солнечных панелей 39°.

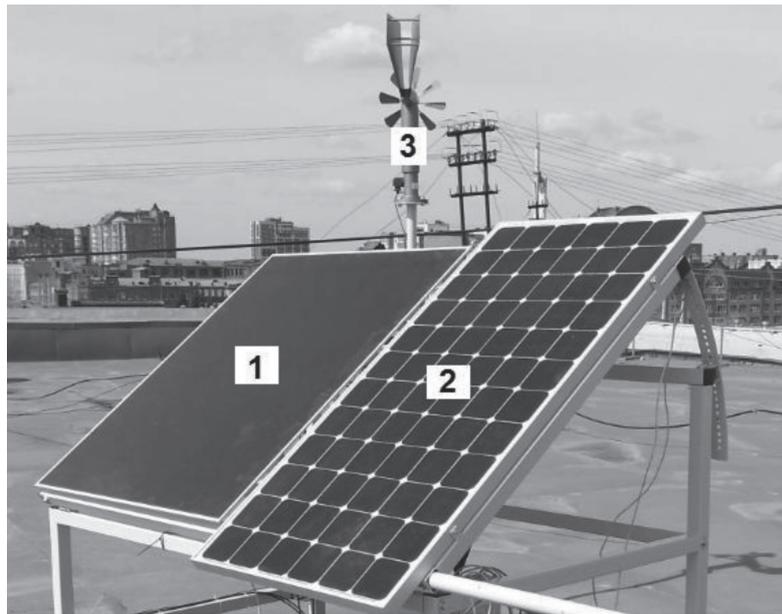


Рис. 1. Тестовая ФЭС: 1) тонкопленочный солнечный модуль Pramac Luce; 2) кристаллический кремниевый солнечный модуль на основе пластин Sun Power с металлизацией на задней поверхности TCM-210SB; 3) датчик скорости и направления ветра

Наиболее часто в производстве фотоэлектрических элементов используются кристаллический и аморфный кремний [5]. Соответственно объектами мониторинга являются два фотоэлектрических модуля, изготовленных по различным технологиям.

Первый объект мониторинга – тонкопленочный фотоэлектрический модуль Pramac Luce (ФЭМ 1), изготовленный по микроморфной технологии и являющийся прототипом фотоэлектрических модулей, производимых на заводе ООО «Хэвел», г. Новочебоксарск. Конструктивно микроморфный модуль состоит из фронтального стекла с нанесенными на него контактными и фотопреобразующими активными слоями на основе аморфного и микрокристаллического кремния, в которых происходит

преобразование световой энергии в электрическую, тыльного отражателя и заднего стекла, обеспечивающего дополнительную прочность конструкции.

Второй объект исследования – фотоэлектрический модуль TCM-210SB научно-производственного предприятия ЗАО «Телеком-СТВ», г. Зеленоград, собранный из пластин кристаллического кремния по технологии фирмы Sun Power, обеспечивающей максимальный коэффициент преобразования световой энергии в электрическую (КПД) среди фотоэлектрических модулей на основе пластин кристаллического кремния (ФЭМ 2) [6].

Основные номинальные эксплуатационные параметры фотоэлектрических модулей обоих типов приведены в таблице.

Таблица

Эксплуатационные параметры фотоэлектрических модулей

Параметр	Наименование ФЭМ	
	Pramac Luce (ФЭМ 1)	TCM-210SB (ФЭМ 2)
Номинальная мощность	125 Вт	223 Вт
Напряжение холостого хода	72,5 В	44 В
Рабочее напряжение	55 В	38 В
Рабочий ток	2,27 А	5,87 А (5,5 А)
КПД	8,74%	17,34%
Площадь поверхности	1,43 м ²	1,286 м ²
Габаритные размеры	1300 x 1100 x 6,8	1578x815x43
Масса	20 кг	15 кг
Стоимость	10 000 руб.	25 000 руб.

Отбор энергии от фотоэлектрического модуля обеспечивается системой, состоящей из контроллера заряда EPSolar Tracer MPPT 2210 с удержанием точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля, аккумулятора и резистивной электрической нагрузки. Система позволит производить круглогодичное измерение характеристик фотоэлектрических модулей, работающих в реальных условиях.

Для измерения основных электрических параметров фотоэлектрических модулей и погодных условий используется система мониторинга на базе электронного регистратора «Параграф PL2», который обеспечивает круглосуточный сбор, хранение данных о мощностных, температурных характеристиках, уровне солнечной иррадиации, а также обеспечивает доступ к этим данным посредством подключения к сети Internet. Электронный регистратор фиксирует значения следующих параметров в энергонезависимой памяти:

- 1) Вырабатываемый ток и напряжение в точке оптимальной мощности двух фотоэлектрических модулей.
- 2) Вырабатываемая электрическая мощность.
- 3) Температура на тыльной поверхности фотоэлектрических модулей.

4) Уровень солнечной иррадиации, измеренной кремниевым фотоприемником, работающим в режиме короткого замыкания.

5) Температура окружающей среды.

6) Скорость и направление ветра.

Измерение сигналов производится с точностью не менее 0,2% в диапазоне напряжений 0–100 Вольт и в диапазоне токов 0–10 Ампер.

Система рассчитана на автономное хранение полученных данных (данных системы мониторинга и фотоснимков), собранных в течение одного года, что делает ее крайне малочувствительной к потерям связи. Каждые 15–30 секунд сервер опрашивает все системы и собирает текущие измеряемые данные. В случае временного обрыва канала связи с какой-либо системой – сервер проводит синхронизацию данных за время отсутствия связи (после восстановления связи) с данными, сохраненными во внутренней памяти электронного регистратора и сетевого жесткого диска.

Для обеспечения круглогодичной регистрации данных управляющий блок устанавливается в термощкаф с постоянной температурой, рисунок 2.

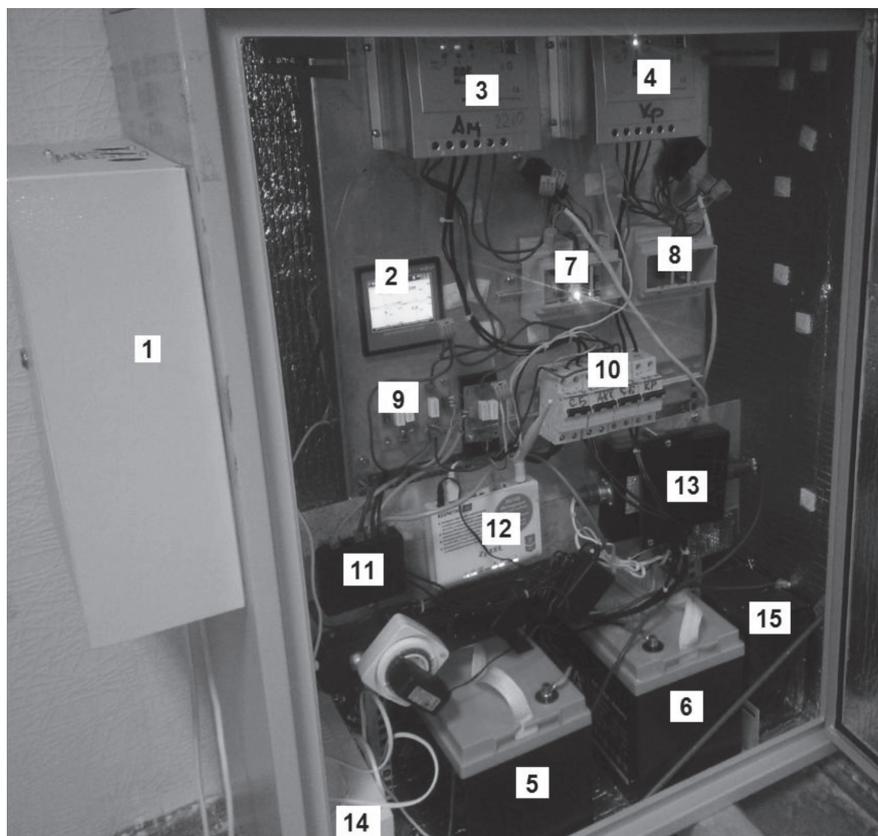


Рис. 2. Термощкаф с обозначениями размещенных в нем компонентов системы управления, регистрации и передачи данных

На рисунке 2 представлены: 1 – блок электрической нагрузки; 2 – электронный регистратор данных; 3 – контроллеры заряда АКБ ФЭМ 1; 4 – контроллеры заряда АКБ ФЭМ 2; 5 – АКБ ФЭМ 1; 6 – АКБ ФЭМ 2; 7 – контроллер разряда АКБ ФЭМ 1; 8 – контроллер разряда АКБ ФЭМ 2; 9 – измерительная плата; 10 – предохранительные автоматы; 11 – сетевой коммутатор; 12 – роутер с поддержкой 3G-модема; 13 – устройство согласования сигнала датчика ветра; 14 – блок бесперебойного питания; 15 – сетевой диск.

Для обеспечения удаленного доступа к системе сбора данных и для передачи накопленных данных на централизованный сервер осуществлено подключение системы к телекоммуникационным сетям с выделением системе «внешнего» фиксированного

IP-адреса (к сети Internet, передача данных осуществляется через сотовые сети с помощью 3G-модема). Доступ к данным осуществляется через web-сервер с ограничением доступа к данным.

На основе полученных данных был сделан анализ эффективности работы и сравнение полученных показателей для фотоэлектрических модулей за период с мая 2013 г. по июль 2014 г.

Среди важных параметров, оказывающих влияние на эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую являются показатели температуры окружающей среды. Чем выше температура ФЭМ, тем большему снижению КПД они подвержены. В ходе мониторинга определены минимальные, максимальные и средние значения температуры окружающей среды (°C), рисунок 3.

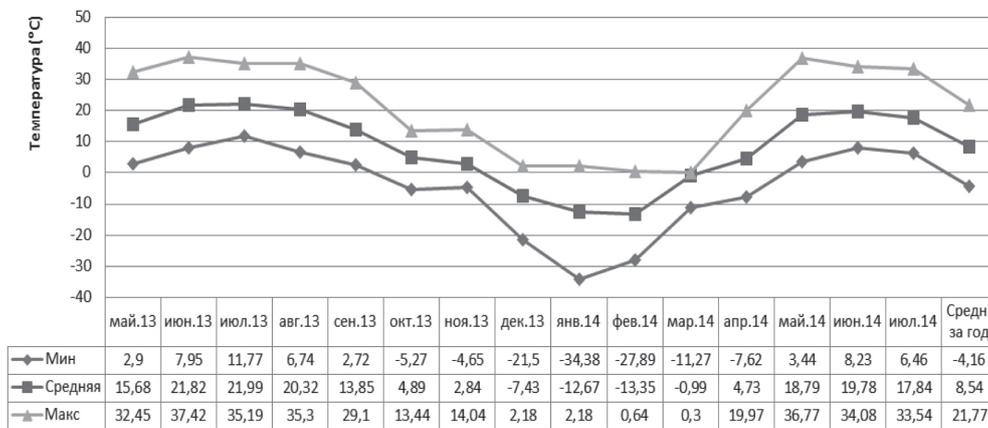


Рис. 3. Минимальные, максимальные и средние значения температуры окружающей среды в точках мониторинга (°C)

В ходе эксперимента произведено сравнение показателей среднемесячного уровня солнечной радиации ((кВт*ч/м²)*сутки), рисунок 4 с табличными данными по базам NASA. В среднем отклонение

измеренных величин от табличных не превышает 13%. Отклонение измеренных величин от табличных в меньшую сторону в зимние месяцы связано, в том числе, с наличием осадков в виде снега.

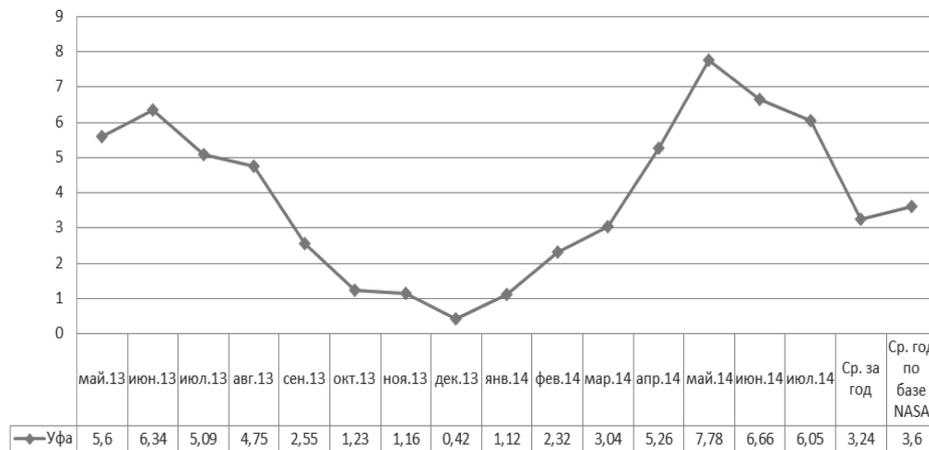


Рис. 4. Среднемесячный уровень солнечной радиации ((кВт*ч/м²)*сутки)

Произведено сравнение эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую ФЭМ 1, где паспортное значение составляет 8,74 %, измеренное 7,6 %. Для ФЭМ 2 паспортное значение составляет 17,34 %, измеренное 17 %. Измерения выполнены при условиях наиболее близких к стандартным условиям испытаний (СУИ) (1000 Вт/м², 25 °С). При этом используются удельные показатели выработки электроэнергии с 1 м², отнесенные к номинальной площади ФЭМ (кВт*ч/м²). Более низкие измеренные значения КПД модулей Pramac и TSM 210SB в сравнении с исходными связаны с частичной деградацией эффективности ФЭМ.

Также для исследуемых ФЭМ произведено сравнение измеренных данных номинальной мощности по отношению к паспортным при условиях наиболее близких к СУИ (1000 Вт/м², 25 °С). Так, для модуля Pramac значение номинальной мощности составило 109 Вт, что на 16 Вт меньше заявленного паспортного значения. Для модуля TSM-210SB значение измеренной номинальной мощности составило 219 Вт, что также ниже паспортного значения на 4 Вт. Такое отклонение, по всей видимости, связано с наличием световой деградации ФЭМ.

Анализ полученных данных показал, что за весь период мониторинга с температурами окружающей среды, опускавшимися до -34 °С, выхода из строя ФЭМ не зафиксировано. Также наблюдалась корреляция по величинам удельной энерговыработки со среднемесячным уровнем солнечной радиации.

За период мониторинга измеренный уровень солнечной радиации в среднем с отклонениями не выше 13% соответствовал значениям из базы данных NASA. Величины удельной энерговыработки ФЭМ полностью коррелировали с измеренным уровнем солнечной радиации. Величины удельной энерговыработки модулей Pramac превышали величины удельной энерговыработки модулей TSM-210SB в летний период и несколько уступали им в зимний период.

Значения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую для модуля Pramac оказались меньше номинальной (8,74 %) на 1,14 %. Для модуля TSM-210SB оказались меньше номинальной (17,34 %) на 1,96 %. Разброс средних измеренных значений связан как с величиной исходного значения эффективности, так и с рабочей температурой модуля, но явной зависимости величины измеренной эффективности от рабочей температуры модулей не наблюдается.

Список литературы

1. Крюченко Ю.В. Моделирование изменения

характеристик солнечных элементов на основе a-si: h в течение светового дня [Текст] / Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко, А.В. Бобыль, В.П. Костылев и др. // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – № 11. – С. 78–85.

2. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах : Учеб. для вузов по спец. «Электромеханика» [Текст] / Г.А. Сипайлов, Д.И. Сальников, В.А. Жадан. – М. : Высшая школа, 1989. – 238 с.

3. Крюченко Ю.В. Годовые зависимости генерируемой мощности и электроэнергии для солнечных элементов на основе А-Si:H [Текст] / Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко, А.В. Бобыль, В.П. Костылев и др. // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – № 11. – С. 86–91.

4. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / В.А. Балагуров. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с.

5. Rummyantsev V.D. Evaluation of the solar cell internal resistance in i-v measurements under flash illumination [Text] / V.D. Rummyantsev, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy and others // AIP conference proceedings ser. «8th international conference on concentrating photovoltaic systems, CPV 2012». – 2012. – С. 152–156.

6. Rummyantsev V.D. Solar simulator for characterization of the large-area hcpv modules [Text] / V.D. Rummyantsev, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy and others // AIP conference proceedings ser. «7th international conference on concentrating photovoltaic systems, CPV-7». – 2011. – С. 212–215.

7. Афанасьев В.П. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния [Текст] / В.П. Афанасьев, Е.И. Теруков, А.А. Шерченков; 2-е изд. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.

8. Сайт Научно-производственного предприятия ЗАО «Телеком-СТВ», г. Зеленоград [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.telstv.ru/show.php?page=ru_solar_modules.

References

1. Krjuchenko Ju.V. Modelirovanie izmenenija harakteristik solnechnyh jelementov na osnove a-si: h v techenie svetovogo dnja [Tekst] / Ju.V. Krjuchenko, A.V. Sachenko, A.V. Bobyl', V.P. Kostylev i dr. // Zhurnal tehnicheckoj fiziki. – 2013. – Т. 83. – № 11. – С. 78–85.

2. Sipajlov G.A. Teplovyje, gidravlicheskie i ajerodinamicheskie raschety v jelektricheskix mashinah : Ucheb. dlja vuzov po spec. «Jelektromehanika» [Tekst] / G.A. Sipajlov, D.I. Sal'nikov, V.A. Zhadan. – М. : Vysshaja shkola, 1989. – 238 s.

3. *Krjuchenko Ju.V.* Godovye zavisimosti generiruemoj moshhnosti i jelektrojenergii dlja solnechnyh jelementov na osnove A-SI:H [Tekst] /Ju.V. Krjuchenko, A.V. Sachenko, A.V. Bobyl', V.P. Kostylev i dr. //Zhurnal tehniceskoy fiziki. – 2013. – T. 83. – № 11. – S. 86–91.

4. *Balagurov V.A.* Proektirovanie special'nyh jelektricheskikh mashin peremennogo toka: ucheb. posobie dlja studentov vuzov [Tekst] / V.A. Balagurov. – M.: Vyssh. shkola, 1982. – 272 s.

5. *Rumyantsev V.D.* Evaluation of the solar cell internal resistance in i-v measurements under flash illumination [Text] / V.D. Rumyantsev, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy and others // AIP conference proceedings ser. «8th international conference on concentrating photovoltaic systems, CPV

2012». – 2012. – S. 152–156.

6. *Rumyantsev V.D.* Solar simulator for characterization of the large-area hcpv modules [Text] / V.D. Rumyantsev, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy and others // AIP conference proceedings ser. «7th international conference on concentrating photovoltaic systems, CPV-7». – 2011. – S. 212–215.

7. *Afnas'ev V.P.* Tonkoplenochnye solnechnye jelementy na osnove kremnija [Tekst] / V.P. Afnas'ev, E.I. Terukov, A.A. Sherchenkov; 2-e izd. – SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2011. – 168 s.

8. *Sait Nauchno-proizvodstvennogo predpriyatiya ZAO «Telekom-STV», g. Zelenograd [Electronniy resurs].* – Rezhim dostupa: http://www.telstv.ru/show.php?page=ru_solar_modules.



***Aunov P.S.
Aipov R.S.***

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и электрооборудование» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Россия, г. Уфа



***Akchurin S.V.
Akchurin S.V.***

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электрические машины и электрооборудование» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Россия, г. Уфа



***Pugachev V.V.
Pugachev V.V.***

преподаватель кафедры «Электротехнологии и электрооборудование» ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», Россия, г. Оренбург

УДК 621-133.33

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРОПРИВОДА С ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

В народном хозяйстве широко распространено технологическое оборудование с колебательным движением рабочего органа. Линейный асинхронный двигатель (ЛАД) позволяет просто получить возвратно-поступательное движение. Особый интерес с точки зрения простоты аппаратурной реализации представляет вибропривод с ЛАД (ВЛАД), работающий в режиме вынужденных колебаний.

Цель исследовательской работы – выработка рекомендаций для управления режимами колебаний ВЛАД.

На примере обобщенной кинематической схемы ВЛАД приведен анализ установившихся режимов вынужденных колебаний методом гармонической линеаризации. Представлены силовая характеристика упругих элементов, характеристики силы сухого и вязкого трения, силы ЛАД, изменяющейся во времени по периодическому закону.

С учетом, что сила ЛАД имеет неизменное направление при ее включении, для анализа установив-

шихся режимов вынужденных колебаний принято, что индуктор ЛАД смещается относительно центра. Предложена форма записи нелинейной функции в виде уравнения гармонической линеаризации и в относительных единицах.

Получено уравнение амплитудно-частотной характеристики ВЛАД. Эксперименты показали, что количественные расхождения частоты и амплитуды вынужденных колебаний ВЛАД от расчетных достигают 30–40%, что объясняется принятыми упрощающими допущениями. Однако, как свидетельствуют эксперименты, для режима вынужденных колебаний полученные аналитические зависимости дают правильное представление о характере процессов и физических свойствах ВЛАД.

Ключевые слова: математическая модель, вибропривод, линейный двигатель, технологические машины, вынужденные колебания, установившийся режим, упругие элементы, амплитудно-частотная характеристика.

MATHEMATICAL MODEL OF VIBRATORY DRIVE WITH LINEAR INDUCTION MOTOR

Technological equipment with an oscillatory movement of the working body is widespread in the national economy. Linear induction motor (LIM) allows to obtain a reciprocating movement. Vibratory drive with LIM (VLIM) working in the mode of forced oscillations is of particular interest from the point of view of simplicity of hardware realization.

The purpose of research work – development of recommendations for management of the modes of oscillations of VLAD.

Analysis of the steady-state modes of forced oscillations is shown in the example of the generalized kinematic scheme VLAD, harmonic linearization method applied. Power characteristics of elastic elements, characteristics of the dry and viscous friction, LIM forces, changing in time under the periodic law are presented.

It is considered that force of LIM has the invariable direction at its inclusion. For the analysis of the steady-state modes of the forced oscillations it is accepted that the inductor of LIM is displaced concerning the center. The form of record of nonlinear function in the form of the equation of harmonious linearization and in relative units proposed.

The equation of the amplitude-frequency characteristic of VLAD is received. Experiments showed that quantitative divergences of frequency and amplitude of the forced oscillations of VLAD from the settlement reach 30–40%. It is explained by the accepted simplifying assumptions. However, as experiments testify, for the mode of the compelled fluctuations the received analytical dependences give the correct idea of nature of processes and physical properties of VLAD.

Key words: mathematical model, vibratory drive, linear motor, technological machines, forced oscillations, steady-state mode, elastic elements, the amplitude-frequency characteristic.

В последние годы повысился интерес к применению в приводе технологических машин с колебательным движением рабочего органа линейных асинхронных двигателей (ЛАД) [1]. ЛАД отличается простотой в изготовлении, надежностью в работе, возможностью получения поступательного движения без применения преобразователей вида движения [2].

Большинство известных виброприводов с ЛАД (ВЛАД) можно свести к следующей кинематической модели (рисунок 1).

Особый интерес с точки зрения простоты аппаратной реализации представляет ВЛАД, работающий в режиме вынужденных колебаний [3]. Математическое моделирование процессов в рассматриваемом приводе методом припасовывания приводит к трудоемкости вычислений. Отсутствие аналитической зависимости параметров колебаний от харак-

теристик элементов привода делает необходимым укрупненное исследование параметров установившихся колебаний.

Цель – выработка рекомендаций для управления режимами колебаний ВЛАД.

Для анализа установившихся режимов вынужденных колебаний ВЛАД воспользуемся методом гармонической линеаризации [4]. С учетом нелинейностей динамику ВЛАД можно отразить следующим нелинейным уравнением:

$$m\ddot{x} = F(t) - \beta \cdot \dot{x} - c \cdot x - F_c(\dot{x}), \quad (1)$$

где x , \dot{x} , \ddot{x} – путь, пройденный индуктором ЛАД, его первая и вторая производные по времени;

$F(t)$ – сила, развиваемая ЛАД;

β – коэффициент вязкого трения;

c – коэффициент жесткости упругих элементов;

$F_c(\dot{x})$ – сила сухого трения.

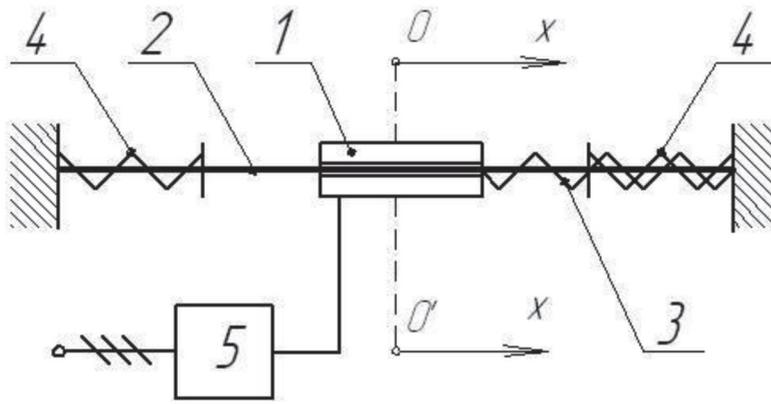


Рис. 1. Кинематическая модель ВЛАД: 1 – индуктор ЛАД; 2 – вторичный элемент ЛАД; 3 – упругий элемент с коэффициентом жесткости c_2 ; 4 – упругие элементы с коэффициентом жесткости c_1 ; 5 – блок управления (тиристорный коммутатор); x – путь, пройденный индуктором ЛАД относительно центра $0'0$ кинематической модели

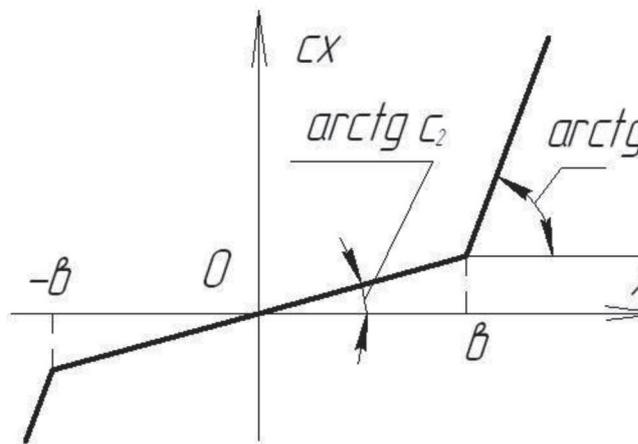


Рис. 2. Силовая характеристика упругих элементов: b – половина расстояния между упругими элементами с коэффициентами жесткости c_1

По закону Гука силовая характеристика упругих элементов имеет следующий вид (рисунок 2).

Характеристику силы сухого трения можно представить в виде зависимости на рисунке 3. Сила ЛАД изменяется во времени по периодическому закону, ее можно представить в виде зависимости на рисунке 4.

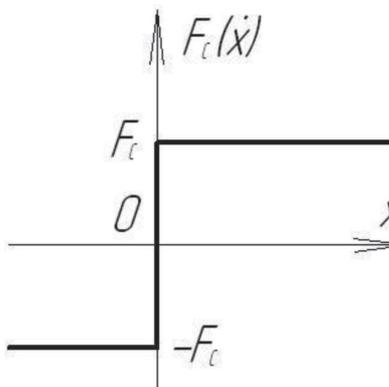


Рис. 3. Нелинейная характеристика силы сухого трения

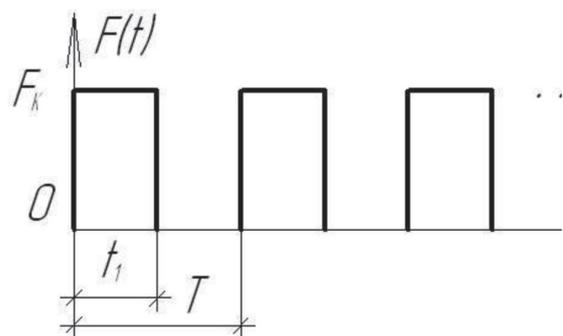


Рис. 4. График изменения силы ЛАД во времени: t_1 – время включения; T – период включения; F_k – максимальная сила ЛАД

Для анализа установившихся режимов вынужденных колебаний примем, что индуктор ЛАД смещается относительно центра (рисунок 1) кинематической модели с частотой и содержит постоянную составляющую, обусловленную тем, что сила ЛАД имеет неизменное направление при ее включении:

$$x = x_0 + a_x \sin \omega t, \quad (2)$$

где x_0 – постоянная составляющая (динамический уход); a_x – амплитуда колебаний; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота установившихся колебаний.

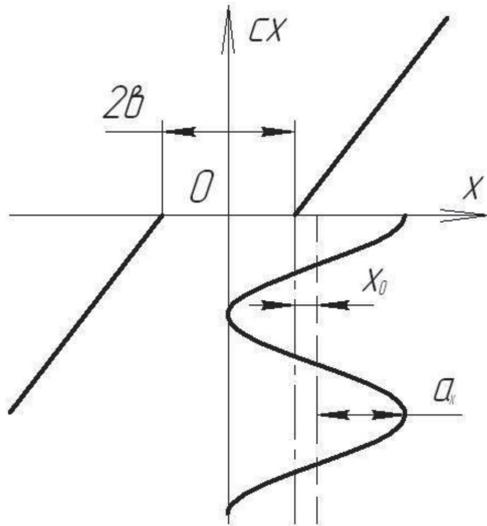


Рис. 5. График зависимостей $c(x)$ и $x=f(t)$

На рисунке 5 приведено пояснение этой зависимости.

При этом нелинейную функцию $F(t)$, выделив постоянную составляющую и основную гармонику, заменим приближенным уравнением гармонической линеаризации:

$$F(x) = f_0 + f_1 \sin \omega t, \quad (3)$$

где f_0 – постоянная составляющая силы ЛАД; f_1 – амплитуда переменной составляющей вынуждающей силы.

Уравнение (1) при постановке гармонически линеаризованных функций $c(x)$, F_c [4] и при $c_2 \ll c_1$ может быть записано в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \frac{c_1 a_x}{\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{a_x}\right)^2} - \frac{c_1 x_0}{2} + \frac{c_1 x_0}{2} \arcsin \frac{x_0}{a_x}, \\ F(p) &= [mp^2 + (\beta - k'_N)p + k_C] x(p), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $x(p) = a_x \sin \omega t$; $F(p) = f_1 \sin \omega t$; $k'_N = \frac{4F_C}{\pi}$;

$$k_C = \frac{c_1}{2} - \frac{c_1}{\pi} \arcsin \frac{x_0}{a_x} - \frac{c_1 x_0}{\pi a_x} \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{a_x}\right)^2}.$$

Для возможности более общего анализа ВЛАД уравнение (4) целесообразно представить в относительных единицах:

$$\left. \begin{aligned} \frac{A^*}{\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{x_0^*}{A^*}\right)^2} - \frac{x_0^*}{2} + \frac{x_0^*}{\pi} \arcsin \frac{x_0^*}{A^*} &= f_0^* \\ \left[\frac{1}{\Omega_0^2} p^2 + \frac{1}{T_M \Omega_0^2} p + K_c^* \right] F_c^*(p) &= \Delta F^*(p) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $A^* = \frac{a_x}{a_\delta} = \frac{a_x c_1}{F_K}$ – амплитуда периодической составляющей (2), в относительных единицах;

$a_\delta = \frac{F_K}{c_1}$ – базовая амплитуда;

$x_0^* = \frac{x_0}{x_\delta} = \frac{x_0 c_1}{F_K}$ – постоянная составляющая решения (2), отнесенная к базовой амплитуде a_δ ;

$f_0^* = \frac{f_0}{F_K}$ – постоянная составляющая вынуждающей силы, отнесенная к силе F_K ;

$$K_c^* = \frac{K_c}{C} = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{x_0^*}{A^*} - \frac{x_0^*}{\pi A^*} \sqrt{1 - \left(\frac{x_0^*}{A^*}\right)^2};$$

$F_c^*(p) = \frac{c_1 x^*(p)}{F_K}$ – первая гармоника упругой силы, отнесенная к базовой силе F_K ;

$$T_M = \frac{m}{\beta + K'_N}; \quad \Omega_0 = \sqrt{\frac{c_1}{m}};$$

$$\Delta F^*(p) = \frac{f_1}{F_K} \sin \omega t = \Delta F_m^* \sin \omega t.$$

В уравнении (5) в качестве базовой величины принято максимальное значение силы ЛАД F_K , выбранное с учетом допустимых нагрузок в технологической машине.

Из (5) получим уравнение амплитудно-частотной характеристики ВЛАД:

$$A(\omega) = \frac{T_M \Omega_0}{\sqrt{T_M^2 \Omega_0^2 \left(K_c^* - \frac{\omega^2}{\Omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\Omega_0^2}}}. \quad (6)$$

Расчет амплитудно-частотной характеристики ВЛАД может быть проведен графоаналитическим путем. Для этого при заданных параметрах электро-механической системы необходимо с помощью формулы (6) рассчитать семейство зависимостей $A = f(K_c^*)$ при $\omega = const$. Используя соотношение $A^* = A \Delta F_m^*$, это семейство следует преобразовать в зависимость $A = f(K_c^*)$ при $\omega = const$ в одних координатах с зависимостями $K_c^* = f(A^*)$ при $f_0^* = const$, в точках пересечения этих семейств получим решение задачи в виде ряда значений A^* , f_0^* , ω . Зависимость коэффициента K_c^* от относительной амплитуды A^* при значениях относительной постоянной составляющей силы $f_0^* = const$ определяется решением уравнения (5). Коэффициенты (5) не зависят от частотных параметров электропривода, поэтому путем их решения можно получить обобщенные зависимости относительно K_c^* . Рассчитанные обобщенные зависимости $K_c^* = f(A^*)$ при $f_0^* = const$ приведены на рисунке 6.

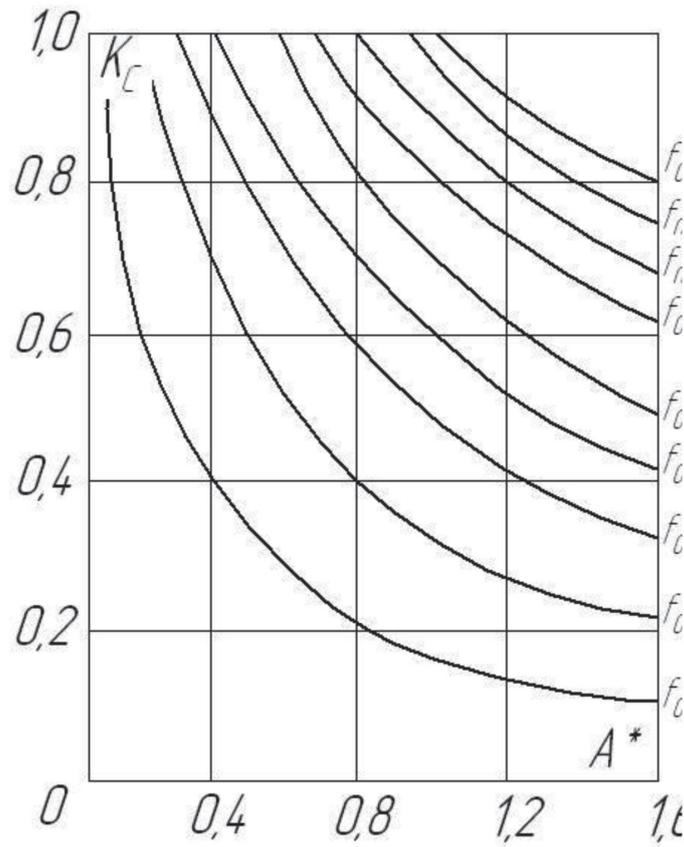


Рис. 6. Обобщенные зависимости $K_c^* = f(A^*)$ при $f_0^* = const$

На рисунке 7 приведены для сравнения расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды вынужденных колебаний ВЛАД.

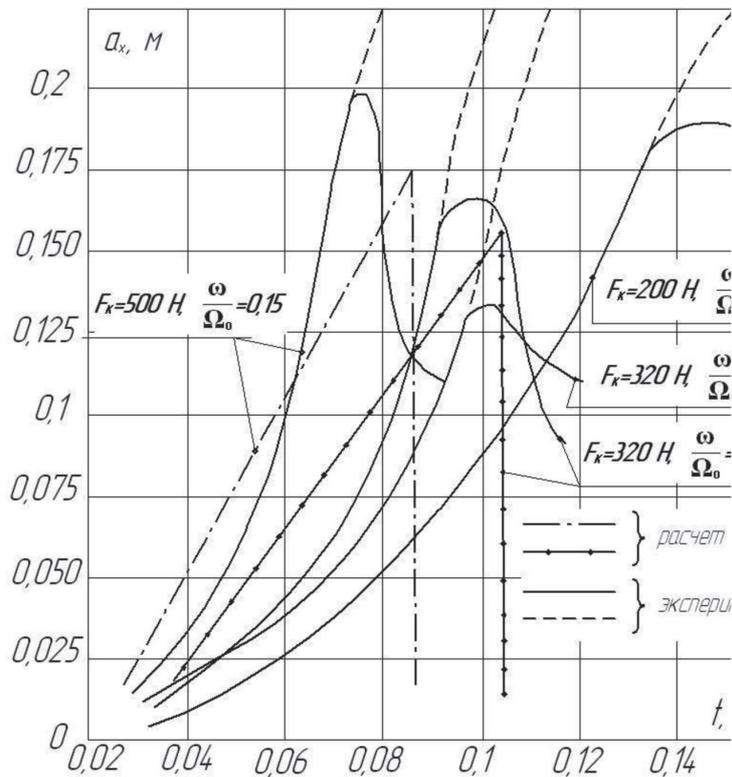


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные амплитудно-частотные характеристики вынужденных колебаний ВЛАД: $m = 119 \text{ кг}$; $c_1 = 28\,720 \text{ Н/м}$; $N = 28 \text{ Н}$, $\beta = 30 \text{ Нс/м}$

Эксперименты показывают, что количественные расхождения частоты и амплитуды вынужденных колебаний ВЛАД от расчетных достигают 30–40%, что объясняется принятыми упрощающими допущениями. Однако, как свидетельствуют эксперименты, для режима вынужденных колебаний (рисунков 7) полученные аналитические зависимости дают правильное представление о характере процессов и физических свойствах ВЛАД.

Список литературы

1. *Аипов Р.С.* Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин [Текст] / Р.С. Аипов, А.В. Линенко – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – 308 с.

2. *Веселовский О.Н.* Линейные асинхронные двигатели [Текст] / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.

3. *Аипов Р.С.* Основы построения и теории линейных асинхронных приводов с упругими накопи-

телями энергии [Текст] / Р.С. Аипов. – Уфа: БашГАУ, 2006. – 295 с.

4. *Бессекерский В.А.* Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бессекерский, Е.П. Попов. – М.: Профессия, 2002. – 752 с.

References

1. *Aipov R.S.* Linejnye jelektricheskie mashiny i linejnye asinhronnye jelektroprivody tehnologicheskikh mashin [Tekst] / R.S. Aipov, A.V. Linenko. – Ufa: Bashkirskij GAU, 2013. – 308 s.

2. *Veselovskij O.N.* Linejnye asinhronnye dvigateli [Tekst] / O.N. Veselovskij, A.Ju. Konjaev, F.N. Sarapulov. – M.: Jenergoatomizdat, 1991. – 256 s.

3. *Aipov R.S.* Osnovy postroeniya i teorii linejnyh asinhronnyh privodov s uprugimi nakopiteljami jenergii [Tekst] / R.S. Aipov. – Ufa: BashGAU, 2006. – 295 s.

4. *Bessekerskij V.A.* Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Tekst] / V.A. Bessekerskij, E.P. Popov. – M.: Professija, 2002. – 752 s.



Лопатин В.П.
Lopatin V.P.

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



Ишмухамедов И.К.
Ishmukhamedov I.K.

магистрант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г. Уфа

УДК 621.316.37

СОВРЕМЕННОЕ ЭЛЕГАЗОВОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОДСТАНЦИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

В современном элегазовом высоковольтном электрооборудовании подстанций системы электрооборудования элегаз используется для электрической изоляции токоведущих частей и как средство гашения электрической дуги в коммутационных аппаратах. В статье приведены результаты обзора и анализа информации об элегазовых силовых трансформаторах, выключателях, комплектных распределительных устройствах и газонаполненных токопроводах. Отображены особенности эксплуатации высоковольтных элегазовых выключателей, заключающиеся в том, что под влиянием высокой температуры электриче-

ской дуги, возникающей при коммутации цепи, происходит частичное разложение элегаза с образованием химически активных соединений, некоторые из которых являются токсичными. Продукты разложения могут вызвать разрушение изоляционных и конструкционных материалов коммутационного аппарата и при достаточной концентрации токсичных продуктов разложения оказывать отрицательное воздействие на здоровье обслуживающего персонала подстанции при попадании элегаза в атмосферу помещения. Большая часть продуктов разложения и влага адсорбируются специальными адсорбентами, например, активированным оксидом алюминия, помещенным в корпус выключателя, или молекулярными сетками. При разложении элегаза кроме активных газов образуются порошкообразные металлические фториды с низкой электропроводностью. Продукты разложения элегаза содержат также углерод, кремний, кислород, водород, вольфрам, медь и другие элементы, что обусловлено конструкционными материалами выключателя.

Предложена методика контроля состояния элегаза в высоковольтном выключателе при воздействии температуры электрической дуги, в которой учитываются факторы, влияющие на процесс разложения элегаза: энергия и время горения дуги, значение тока короткого замыкания, количество коммутаций и давление элегаза. Разработана компьютерная программа, позволяющая выполнить расчет концентраций продуктов разложения элегаза для различных сочетаний исходных факторов. Система контроля может быть задействована в автоматизированной системе управления электроснабжением объекта на базе современных средств телемеханики, позволяющих автоматически контролировать параметры процесса коммутации цепи.

Ключевые слова: подстанция, электрооборудование, элегаз, продукты разложения, концентрация, программа.

MODERN GAS-INSULATED SUBSTATIONS ELECTRIC POWER SYSTEMS AND ITS OPERATING FEATURES

In modern gas-insulated high-voltage electric equipment of substations of system of power supply sulfur hexafluoride it is used for electric isolation of current carrying parts and as means of clearing of an electric arch in switching devices. Results of the review and analysis of information on gas-insulated power transformers, switches, complete distributing devices and gas-filled current distributors are given in article. The features of operation of high-voltage gas-insulated switches which are that under the influence of high temperature of the electric arch arising when switching a chain there is a partial decomposition of an sulfur hexafluoride to formation of chemically active connections are displayed, some of which are toxic. Products of decomposition can cause destruction of insulating and constructional materials of the switching device and at sufficient concentration of toxic products of decomposition to make negative impact on health of the service personnel of substation at hit of an sulfur hexafluoride in the atmosphere of the room. The most part of products of decomposition and moisture is adsorbed by special adsorbents, for example, the activated aluminum oxide placed in the switch case, or molecular grids. At decomposition of a sulfur hexafluoride except active gases powdery metal fluorides with low conductivity are formed. Products of decomposition of a sulfur hexafluoride contain also carbon, silicon, oxygen, hydrogen, tungsten, copper and other elements that is caused by constructional materials of the switch.

The technique of control of a condition of an sulfur hexafluoride in the high-voltage switch at influence of temperature of an electric arch in which the factors influencing process of decomposition of an sulfur hexafluoride are considered is offered: energy and time of burning of an arch, value of current of short circuit, quantity of switch and pressure of an sulfur hexafluoride. The computer program allowing executing calculation of concentration of products of decomposition of a sulfur hexafluoride for various combinations of initial factors is developed. The monitoring system can be involved in an automated control system for power supply of object on the basis of the modern means of telemechanics allowing controlling automatically parameters of process of switching of a chain.

Key words: substation, electrical, sulfur hexafluoride, decomposition products, the concentration of the program.

Электрические подстанции, входящие в систему электроснабжения промышленных предприятий в последние годы, комплектуются современным высоковольтным электрооборудованием с элегазовым заполнением. К нему относятся: силовые трансформаторы, комплектные распределительные устрой-

ства, высоковольтные выключатели, выключатели нагрузки, трансформаторы тока и напряжения, электрические конденсаторы и токопроводы [1].

Элегаз SF_6 (шестифтористая сера) в высоковольтном электрооборудовании подстанций используется в качестве изоляционной среды и средства, обеспечивающего эффективное дугогашение в коммутационных аппаратах. При давлении элегаза 0,3–0,4 МПа его электрическая прочность выше, чем у трансформаторного масла.

Элегаз обладает повышенной теплоотводящей способностью и является хорошей дугогасительной средой, позволяющей производить отключение больших токов короткого замыкания при больших скоростях восстановления напряжения. Кроме перечисленных свойств следует отметить высокую термостойкость элегаза (до 800 °С). Он не образует взрывоопасных смесей и является хорошим акустическим изолятором, не подвергается старению, химически не активен [2].

Главной особенностью эксплуатации элегазового электрооборудования является частичное разложение элегаза при воздействии дугового или коронного разрядов. Продукты разложения могут вызвать разрушение изоляционных и конструкционных материалов коммутационного аппарата и оказывать отрицательное воздействие на здоровье обслуживающего персонала подстанции.

Кроме того, следует отметить низкую температуру сжижения элегаза – минус 64 °С, которая

при повышении давления увеличивается. Поэтому эксплуатация выключателя при таких условиях требует устройства подогрева.

Цель. Выполнить обзор и анализ существующего высоковольтного элегазового электрооборудования подстанций системы электроснабжения предприятий, разработать методику диагностики состояния элегаза при воздействии электрической дуги, включая контроль концентраций продуктов разложения элегаза.

В элегазовых выключателях, используемых на современных электрических подстанциях, гашение электрической дуги происходит при ее интенсивном охлаждении потоком газа. В элегазе канал столба дуги обладает высокой электрической проводимостью, и его разрушение не происходит до естественного перехода тока через нуль, что исключает появление перенапряжений, например, при отключении ненагруженных трансформаторов. Высокая способность элегаза гасить дугу обусловлена его свойством захватывать свободные электроны перед переходом тока через нуль. При этом количество свободных электронов в столбе дуги уменьшается, и дуга гаснет [3].

Элегазовый выключатель представляет собой замкнутую систему без выброса газа наружу. Элегаз в выключателе находится при небольшом избыточном давлении. Бакый элегазовый выключатель типа ВГБ фирмы «Электроаппарат» (г. Санкт-Петербург) изображен на рисунке 1.

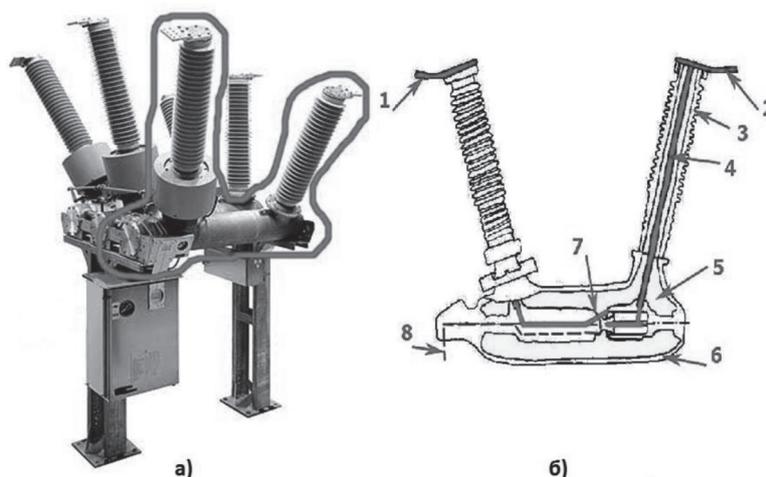


Рис. 1. Бакый элегазовый выключатель
а) внешний вид; б) вид в разрезе

1, 2 – выводы для присоединения высоковольтного провода; 3 – изолятор;
4 – токопровод; 5 – элегаз; 6 – бак; 7 – контакты; 8 – механическая связь с приводом

Элегазовые выключатели выпускают отечественные предприятия «Уралэлектротяжмаш», «Электроаппарат», «Завод электротехнического оборудования» (ЗЭТО), а также фирмы «ABB», «ABB-SACE», «Schneider Electric» и др.

В элегазовом выключателе серии LF 6,10 кВ фирмы «Schneider Electric» применен принцип вращения дуги в элегазе и принцип автогенерации давления, что создает наилучшие условия для гашения дуги. Повышение эффективности дугогашения способствует увеличению напряжения на один разрыв выключателя [3].

Анализ технических характеристик различных

фирм – производителей элегазовых выключателей позволяет сделать вывод, что элегазовые выключатели компании «ABB» имеют наибольшее быстродействие и выдерживаемое напряжение импульса, а компании «Siemens» – наибольшие токи отключения и термической стойкости.

В электроэнергетике начали применяться герметизированные комплектные распределительные устройства (КРУЭ) (см. рисунок 2), в которых все электрооборудование (токоведущие части, выключатели, разъединители и др.) расположено внутри герметической оболочки, заполненной элегазом под давлением.

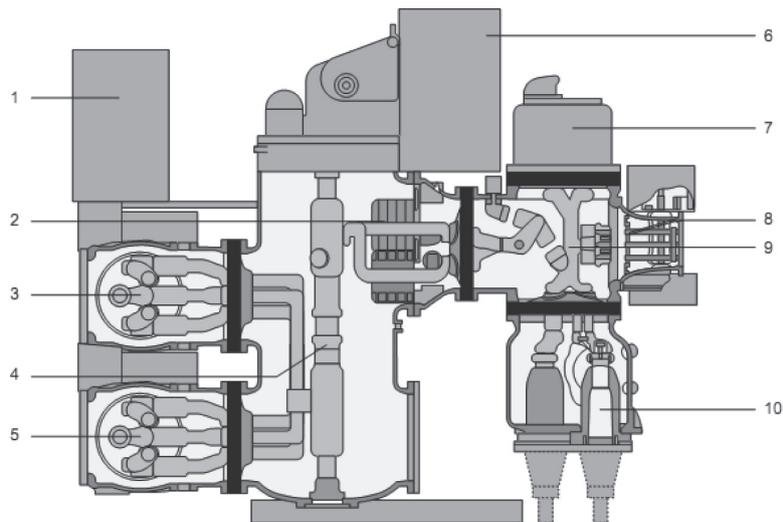


Рис. 2. Ячейка КРУЭ компании «Siemens» с двойной системой сборных шин

1 – шкаф управления; 2 – трансформатор тока; 3, 5 – сборные шины с разъединителями и заземлителями; 4 – дугогасительная камера; 6 – пружинный привод; 7 – трансформатор напряжения; 8 – быстродействующий заземлитель; 9 – модуль линии с разъединителем и заземлителем; 10 – концевая кабельная муфта

Элегазовые комплектные распределительные устройства уменьшают площади и объемы подстанций, занимаемые оборудованием, повышают уровень защиты персонала от воздействия электрических и магнитных полей и его электробезопасность, устраняют атмосферное воздействие на изоляцию электрооборудования. Кроме того, снижается уровень шума при работе оборудования (элегаз хороший акустический изолятор), устраняются радиопомехи, обеспечивается высокая надежность и сейсмостойкость.

КРУЭ изготавливаются как комплекс различных функциональных ячеек, каждая из которых выполняет функцию какой-либо электрической схемы распределительного устройства. Ячейки, выполняются в трехфазном исполнении и состоят из отдельных блоков, заключенных в герметичную металлическую оболочку цилиндрической или шаровой формы, заполненной элегазом при небольшом избыточном давлении. По функциональному назначению

ячейки КРУЭ могут быть линейными и секционными, с одной или двумя системами сборных шин.

При эксплуатации КРУЭ следует учитывать возможность внутреннего короткого замыкания на корпус при горении дуги и повышения давления в оболочке. В связи с этим повышаются требования к оболочкам элементов. Для обеспечения электробезопасности предусмотрено заземление конструкции отдельных элементов и всего распределительного устройства.

КРУЭ с элегазовой изоляцией выпускают «Завод электротехнического оборудования» (ЗЭТО), фирмы «ABB», «Hyundai», «Siemens» и др.

Из сопоставления основных технических характеристик распределительных устройств (см. табл.) следует, что КРУЭ компании «ABB» по токам отключения короткого замыкания превосходят другие компании, но улучшение характеристик привело к увеличению габаритов распределительного устройства.

Технические характеристики современных КРУЭ

№	Технические характеристики:	Компания:		
		ABB	Hyundai	Siemens
1	Расчетное номинальное напряжение, кВ	72,5	72,5	72,5
2	Расчетное кратковременное испытательное переменное напряжение (1 мин.), кВ	140	140	140
3	Расчетное выдерживаемое напряжение грозового импульса (1,2 / 50 мкс), кВ	325	325	325
4	Расчетный рабочий ток сборной шины/фидера, А	2500	2000	2500
5	Расчетный ток отключения короткого замыкания, кА	50	40	31,5
6	Расчетный ударный ток, кА	125	81,9	85
7	Расчетный кратковременный ток термической стойкости, кА	31,5	31,5	31,5
8	Привод силового выключателя	пружинно-гидравлический	пружинно-моторный	пружинный
9	Габариты ячейки, мм/мм/мм	1000/3600 /2700	-	650/800 /1200

Силовые трансформаторы с элегазовой изоляцией (см. рисунок 3) впервые были разработаны в США фирмой «Вестингауз» в конце 50-х годов прошлого столетия. Широкое использование в электроэнергетике элегазового оборудования привело к воз-

врату интереса к данному виду трансформаторов. Кроме силовых трансформаторов элегаз используется в измерительных трансформаторах тока и напряжения.

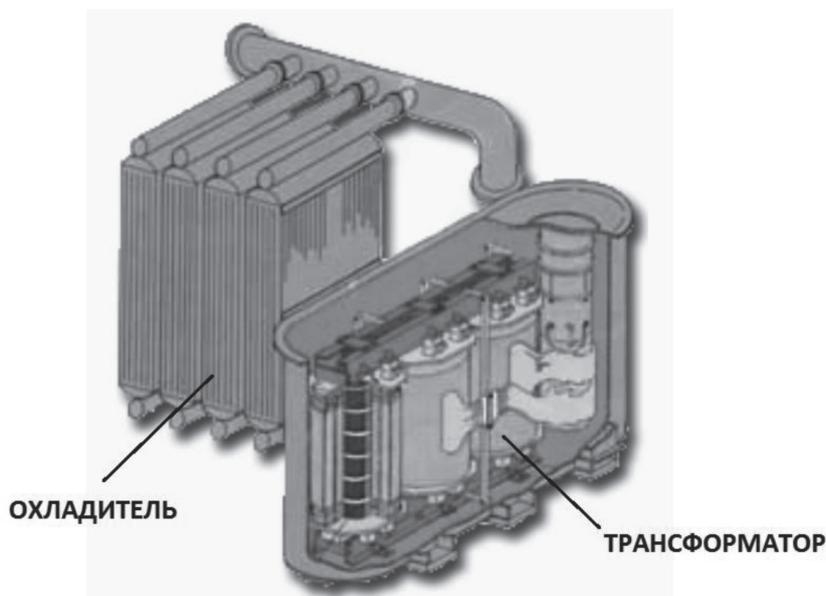


Рис. 3. Конструкция элегазового силового трансформатора

Элегазовые трансформаторы являются пожаро- и взрывобезопасными, малошумными, обладают высоким уровнем герметичности. Проверка исправности и анализ причин неисправности может производиться с использованием газовой хроматографии. Если в силовом элегазовом трансформаторе возникнет электрическая дуга, то из-за сжимаемости элегаза внутреннее давление в корпусе повысится намного меньше, чем в масляном. Это снижает угрозу потери герметичности бака [4].

Охлаждение элегазовых трансформаторов происходит в процессе принудительной циркуляции элегаза через охлаждающие устройства выносного типа. Широко используется система водяного охлаждения. Элегазовые силовые и измерительные трансформаторы производят такие фирмы, как

«Электрум», «Завод электротехнического оборудования», «Уралэлектротяжмаш», «Toshiba», «ABB», «Siemens» и др.

Широкому внедрению элегазового оборудования на современных электрических подстанциях будет способствовать использование газоизолированных линий (ГИЛ), в которых токоведущий элемент расположен в оболочке, заполненной элегазом под избыточным давлением [5]. Это позволит обеспечить внутривнутриподстанционное соединение элегазового электрооборудования в КРУЭ и приведет к снижению электрических потерь при передаче электроэнергии на большие расстояния.

В случае однофазного исполнения газоизолированной линии токоведущая жила и оболочка располагаются коаксиально (см. рисунок 4).

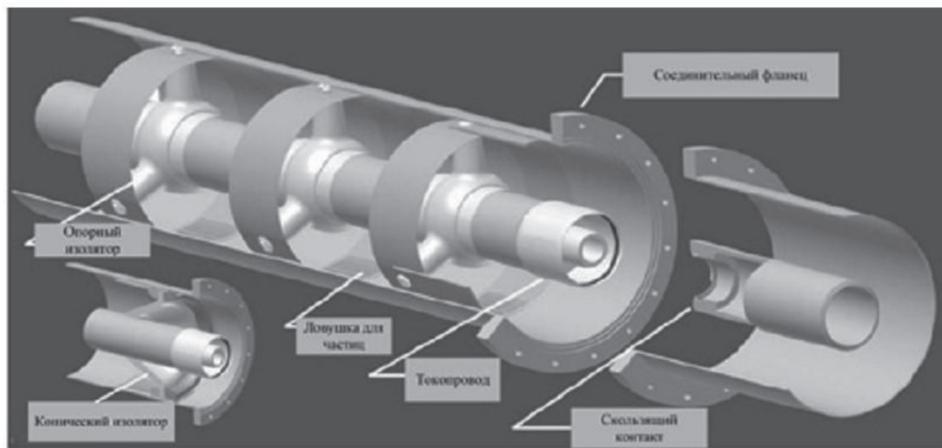


Рис. 4. Газоизолированные линии (ГИЛ)

Стальная или алюминиевая оболочка обеспечивает герметизацию газового объема, защиту от воздействия электрических и магнитных полей. Для компенсации теплового расширения корпуса используются специальные сильфоны или скользящая система контактов.

Говоря об экологических аспектах особенностей эксплуатации элегазового электрооборудования, следует иметь в виду то, что в высоковольтных выключателях под воздействием высокой температуры электрической дуги происходит частичное разложение элегаза и образование химически активных соединений, которые могут вызывать разрушение изоляционных и конструкционных материалов электрического аппарата. Кроме того, возможно образование токсичных соединений, которые при достаточной концентрации будут оказывать отрицательное влияние на здоровье обслуживающего персонала подстанции при попадании элегаза в атмосферу помещения.

Газообразные продукты разложения элегаза в высоковольтных выключателях, установленные с использованием хроматографии и масс-спектрометрии, в зависимости от внешних условий (наличия или отсутствия адсорбента) могут иметь следующий состав: фтористоводородную кислоту – HF; диоксид углерода – CO₂; диоксид серы – SO₂; тетрафторид углерода – CF₄; тетрафторид кремния – SiF₄; фторид тионила – SOF₂; фторид двуокиси серы – SO₂F₂; дисерный декафторид – S₂F₁₀; тетрафторид серы – SF₄ и др. [6, 7]. Продукты разложения элегаза содержат также углерод, кремний, кислород, водород, вольфрам, медь и другие элементы, что обусловлено конструкционными материалами, из которых изготовлено электрооборудование, в том числе и контакты выключателя. Большая часть продуктов разложения и влага адсорбируются специальными адсорбентами, например, активированным оксидом алюминия, помещенным в корпус выключателя. При разложении элегаза кроме активных газов обра-

зуются порошкообразные металлические фториды с низкой электропроводностью, которые аккумулируются в специальных полостях дугогасительной камеры и не влияют на электробезопасность.

При оценке токсичности газообразных продуктов разложения элегаза следует выделить фторид тионила SOF_2 , который характеризуется высокой нормой выработки (объем в литрах на энергию дуги в килоджоулях) в сочетании с его уровнем токсичности. Вкладами в общую токсичность продукта разложения элегаза серного фторида (SO_2F_2) и дисерного декафторида (S_2F_{10} (самого ядовитого)) можно пренебречь [6].

Необходимость контроля уровня загрязнения элегаза в выключателе продуктами разложения при воздействии электрической дуги обусловлена следующими факторами:

- возможность ухудшения состояния конструктивных и изоляционных материалов при воздействии химически активных продуктов разложения;
- возможностью попадания элегаза и газообразных продуктов разложения в атмосферу помещения электрической подстанции, например, при утечке элегаза из корпуса выключателя, а также при работе с элегазом при техническом обслуживании коммутационного аппарата.

Предельно допустимая концентрация элегаза в производственных помещениях, где рабочие находятся до восьми часов в день пять раз в неделю не должна превышать (6000 мг/м^3) [6]. Загрязненный продуктами разложения элегаз может быть очищен и пущен в повторную эксплуатацию при соблюдении критериев качества.

Существуют приборы фирмы «DIL0», которые используются для непрерывного контроля окружающего воздуха в помещении электрической подстанции на наличие недопустимо высокого содержания элегаза, а также для выявления утечек элегаза из электрооборудования. Они подают сигнал при концентрации элегаза в контрольной точке выше 2,0 % от объема помещения.

Для оперативного контроля состояния элегаза в выключателе при воздействии электрической дуги разработана программа, позволяющая выполнить расчет концентраций продуктов разложения элегаза. В качестве факторов, влияющих на интенсивность процесса разложения элегаза, использованы энергия электрической дуги, ток короткого замыкания, количество циклов коммутации и давление элегаза в выключателе. При этом рассмотрены варианты наличия или отсутствия адсорбента. Алгоритм расчета представлен на рисунке 5.

В программу вводятся следующие исходные

данные: объем корпуса выключателя – $V_в$; давление элегаза в выключателе – $P_в$; ток короткого замыкания – $I_{кз}$; напряжение дуги – $U_д$; время горения дуги – $t_д$; количество коммутаций – N .

Объем элегаза $V_{эл}$ в корпусе выключателя в литрах определяется по формуле [2]:

$$V_{эл} = \frac{V_в \cdot P_в}{P_{oc}} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где P_{oc} – давление окружающей среды, Па.

Энергия дуги электрической ($W_д$) определяется по формуле:

$$W_д = I_{кз} \cdot U_д \cdot t_д \cdot N. \quad (2)$$

Концентрацию (C_i) i -го продукта разложения элегаза можно определить по формуле:

$$C_i = \frac{K \cdot E_i \cdot W_д}{V_{эл}} \cdot 100, \quad (3)$$

где K – коэффициент, учитывающий наличие адсорбента; E_i – норма выработки i -го вещества.

Остаточный объем элегаза ($V_{эл}'$) в выключателе после очередной коммутации цепи может быть найден по формуле:

$$V_{эл}' = \frac{V_{эл} \cdot (100 - \sum_{i=1}^n C_i)}{100}. \quad (4)$$

При увеличении количества коммутаций элегазового выключателя объем продуктов разложения возрастает (на 1–2 %), а остаточный объем чистого элегаза уменьшается.

Например, если выполнить расчет продуктов разложения для исходных данных: $U_д = 400 \text{ В}$, $t_д = 30 \text{ мс}$, $N = 2$, $I_{кз} = 30 \text{ кА}$, $P_в = 250 \text{ кПа}$, то получим уменьшение объема чистого элегаза на 1 %.

В работе [8] регламентируется количество примесей, находящихся в элегазе, превышение которого влияет на коммутационные свойства и техническое состояние выключателя. Эта цифра не должна превышать 5–10 % от общего объема выключателя, для различных технических характеристик аппарата.

Пример результатов компьютерной обработки данных приведен на рисунке 6.

Система может быть задействована в автоматизированной системе управления электроснабжением на базе современных средств телемеханики, позволяющих автоматически вводить исходные данные в компьютерную программу, с учетом фактических значений параметров, характеризующих процесс коммутации цепи.

Оперативный контроль состояния элегаза в высоковольтном коммутационном электрооборудовании при его эксплуатации будет способствовать оптимизации сроков и объемов технического обслуживания и ремонта.

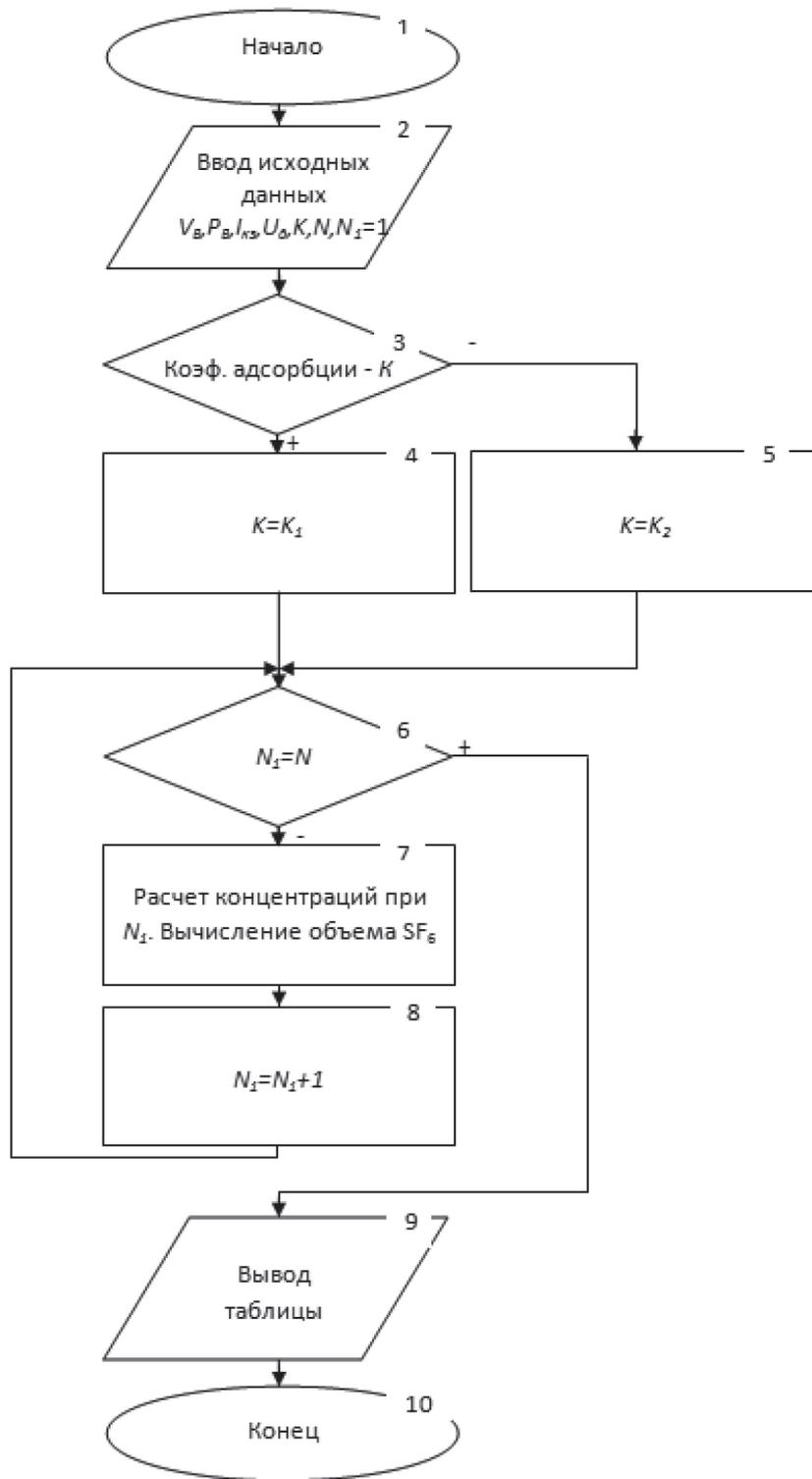
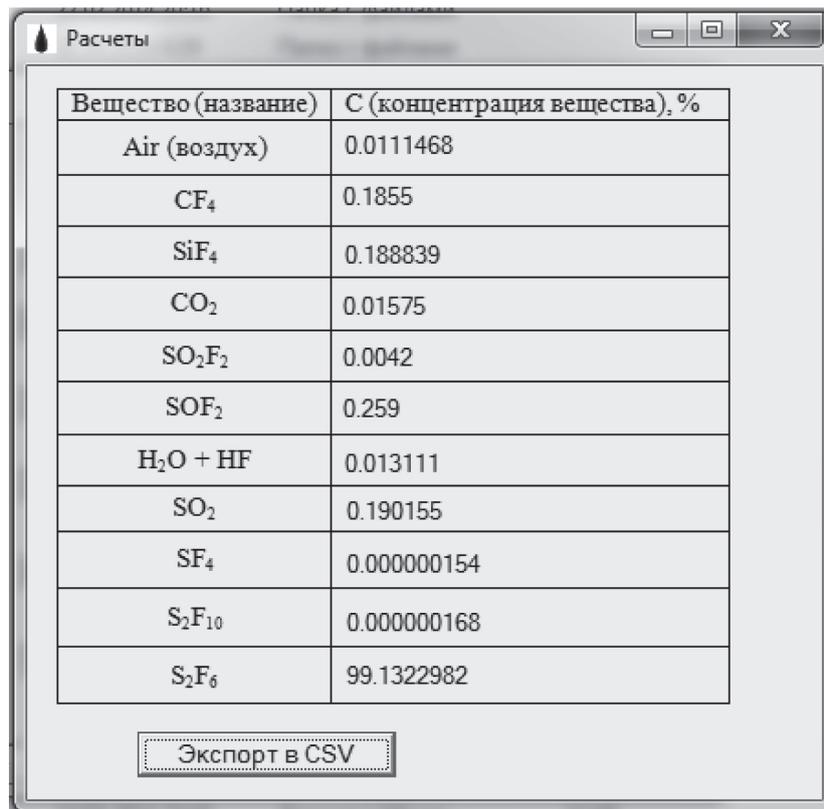


Рис. 5. Алгоритм расчета концентраций продуктов разложения элегаза



Вещество (название)	С (концентрация вещества), %
Air (воздух)	0.0111468
CF ₄	0.1855
SiF ₄	0.188839
CO ₂	0.01575
SO ₂ F ₂	0.0042
SOF ₂	0.259
H ₂ O + HF	0.013111
SO ₂	0.190155
SF ₄	0.000000154
S ₂ F ₁₀	0.000000168
S ₂ F ₆	99.1322982

Экспорт в CSV

Рис. 6. Результаты компьютерной обработки данных

Выводы:

1. Выполнен обзор и анализ современного элегазового высоковольтного электрооборудования подстанций системы электроснабжения промышленных объектов.

2. Разработан алгоритм программы расчета концентраций продуктов разложения элегаза при воздействии электрической дуги в элегазовом выключателе и выполнена экспериментальная проверка.

3. При увеличении количества коммутаций элегазового выключателя объем продуктов разложения возрастает (на 1–2 %), а остаточный объем чистого элегаза уменьшается.

4. Система диагностики состояния элегаза в высоковольтном выключателе может быть использована для оперативного контроля в автоматизированной системе управления электроснабжением.

Список литературы

1. Шабанов В.А. Высоковольтное электрооборудование подстанций промышленных предприятий: учеб. пособие [Текст] / В.А. Шабанов, В.П. Лопатин. – Уфа: РИЦ УГНТУ. – 2013. – 157 с.

2. Кох Д. Свойства SF₆ и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высоко-

го напряжения [Текст] / Д. Кох // Техническая кол- лекция Schneider Electric. – 2003. – № 2. – С. 22.

3. *Электрические* и электронные аппараты. В 2 т. – Т 1. Электромеханические аппараты: учебник для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / Под ред. А.Г. Годжелло, Ю.К. Розанова. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 352 с.

4. Гура Ю.Л. Силовой трансформатор с элегазовым заполнением [Текст] / Ю.Л. Гура // Электрик. – 2009. – № 1–2, 9.

5. Вариводов В.Н. Компактные высоковольтные линии электропередачи [Текст] / В.Н. Вариводов // Электро. – 2006. – № 2. – С. 2–6.

6. *Свойства* элегаза и его использование в коммутационном оборудовании (на базе технического отчета Международной электротехнической комиссии МЭК 1634 «Оборудование высокого напряжения – использование элегаза (SF₆) в аппаратах высокого напряжения») [Электронный ресурс]. – URL: ukrelektrik.com (дата обращения 02.09.2013).

7. Аракелян В.Г. Исследование распада шестифтористой серы в разряде [Текст] / В.Г. Аракелян, И.М. Бортник // Электротехническая промышленность. Сер. АВН. – 1976. – Вып. 5 (61). – С. 10.

8. *РД-16.066-05*. Элегазовое электротехническое оборудование. Технические требования к производ-

ству для обеспечения качества элегаза в оборудовании и меры обеспечения санитарно-гигиенической и экологической безопасности [Текст]. – М., 2005. – 47 с.

References

1. *Shabanov V.A.* Vysokovol'tnoe jelektrorobudovanie podstancij promyshlennyh predpriyatij: ucheb. posobie [Текст] / V.A. Shabanov, V.P. Lopatin. – Ufa: RIC UGNTU. – 2013. – 157 s.
2. *Koh D.* Svojstva SF6 i ego ispol'zovanie v kommutacionnom oborudovanii srednego i vysokogo naprjazhenija [Текст] / D. Koh // Tehniceskaja kollekcija Schneider Electric. – 2003. – № 2. – S. 22.
3. *Jelektricheskie i jelektronnye apparaty.* V 2 t. – T 1. Jelektromehaniceskie apparaty: uchebnik dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij [Текст] / Pod red. A.G. Godzhello, Ju.K. Rozanova. – М.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2010. – 352 с.
4. *Gura Ju.L.* Silovoj transformator s jelegazovym zapolnieniem [Текст] / Ju.L. Gura // Jelektrik. – 2009. – № 1–2, 9.
5. *Varivodov V.N.* Kompaktnye vysokovol'tnye linii jelektroreredachi [Текст] / V.N. Varivodov // Jelektro. – 2006. – № 2. – S. 2–6.
6. *Svojstva jelegaza i ego ispol'zovanie v kommutacionnom oborudovanii (na baze tehniceskogo otcheta Mezhdunarodnoj jelektrrotehniceskoj komissii MJeK 1634 «Oborudovanie vysokogo naprjazhenija – ispol'zovanie jelegaza (SF6) v apparatah vysokogo naprjazhenija») [Jelektronnyj resurs].* – URL: ukrelektrik.com (data obrashhenija 02.09.2013).
7. *Arakeljan V.G.* Issledovanie raspada shestifloristoj sery v razrjade [Текст] / V.G. Arakeljan, I.M. Bortnik // Jelektrotehniceskaja promyshlennost'. Ser. AVN. – 1976. – Vyp. 5 (61). – S. 10.
8. *RD-16.066-05.* Jelegazovoe jelektrrotehniceskoe oborudovanie. Tehniceskie trebovanija k proizvodstvu dlja obespechenija kachestva jelegaza v oborudovanii i mery obespechenija sanitarno-gigieniceskoj i jekologiceskoj bezopasnosti [Текст]. – М., 2005. – 47 с.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS



Козловский В.Н.
Kozlovskiy V.N.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Современное естествознание» ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса», Россия, г. Тольятти



Дебелов В.В.
Debelov V.V.

аспирант кафедры «Современное естествознание» ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса», Россия, г. Тольятти



Пьянов М.А.
Pjanov M.A.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Современное естествознание» ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса», Россия, г. Тольятти

УДК 629.113

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Работа посвящена разработке и реализации перспективного электротехнического и программного комплекса управления двигателем внутреннего сгорания легкового автомобиля. Интеграция в единый комплекс штатных электронных систем управления, таких как «Старт – Стоп», регулирование скорости движения, управления фазами газораспределения, а также реализация новой системы измерения показателя вязкости масла двигателя, обеспечивает условия для повышения эффективности как процесса управления двигателем легкового автомобиля, так и дальнейшего развития систем управления в рамках электронной системы управления двигателем. В последние десятилетия наблюдается существенный рост электротехнических систем управления на транспорте. При этом в силу исторических особенностей развития некоторые системы управления до сих пор не интегрированы в единый комплекс управления. Представленная работа решает данную задачу. Следующей важной задачей, решенной в работе, является создание комплекса унифицированных виртуальных имитационных моделей электротехнических систем управления с возможным расширением функциональных областей. Разработанные модели могут быть использованы для создания соответствующих систем управления не только для легковых автомобилей, но и для других видов автотранспорта. Для этого необходимо в структуре моделей обозначить группу условий и количественных критериев, определяющих тип двигателя внутреннего сгорания. Модели организованы в математической программной среде MATLAB и позволяют формировать программные коды на языке C++, что обеспечивает реализацию программ непосредственно в рамках контроллера электронной системы управления двигателем автомобиля. Не менее важной задачей, решенной в работе, является экспериментальная отработка полученных при имитационном моделировании результатов. Для этого проводились эксперименты, позволяющие определить эксплуатационную эффективность разработанного электротехнического и программного комплекса в сравнении с серийно устанавливаемой на автомобили

электронной системой управления двигателем одного из крупнейших автопроизводителей в России. Таким образом, в статье разработан эффективный комплекс управления двигателем современного автомобиля.

Ключевые слова: электротехнический и программный комплекс управления, двигатель внутреннего сгорания, автомобиль.

ELECTRICAL AND SOFTWARE INTERNAL COMBUSTION ENGINE CONTROL CAR

The work is dedicated to the development and implementation of long-term electrical and software control complex internal combustion engine car. Integration into a single set of standard electronic control systems, such as "Start – Stop", speed control, valve timing control, as well as the implementation of a new system of measuring the viscosity of engine oil, provides the conditions for improving the efficiency of the process as the motor control of the car and further development of control systems within the electronic engine management system. In recent decades there has been a significant increase in electrical control systems in transport. In this case, because of the historical features of the development, some control systems have not yet been integrated into a single control system. This work addresses this problem. The next important task solved in the work is the creation of unified complex virtual simulation models of electrical control systems with a possible extension of the functional areas. The developed model can be used to establish appropriate control systems not only for cars, but also for other types of vehicles. To do this, the structure of the models indicate a group of conditions and quantitative criteria that determine the type of internal combustion engine. Organized in mathematical models, software environment MATHLAB and let you create software code in C ++ that ensures the implementation of the programs directly under the controller's electronic engine management system of the car. An equally important task solved in the paper is the experimental development obtained by simulation results. For this purpose, experiments were conducted to help you determine the operational effectiveness of the developed electrical and software complex in comparison with the standard established for cars, electronic engine control system, one of the largest car manufacturers in Russia. Thus, in operation, developed an effective control system of a modern car engine.

Key words: electrical engineering and management suite, an internal combustion engine, vehicle.

Повышение качества функционирования современного легкового автомобиля неразрывно связано с решением комплекса задач по улучшению безопасности, надежности, комфорта, экологичности при одновременном сохранении динамических характеристик. Для решения обозначенных задач мировые лидеры автопрома активно занимаются разработкой и внедрением электротехнических систем управления, которые обеспечивают их эффективное решение.

Качество функционирования автомобиля определяется рядом технических параметров, существенная часть которых обеспечивает эффективность работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Потребитель в Западной Европе весьма требователен к вопросам топливной экономичности и вредным выбросам. Но при этом автомобиль не должен терять динамические характеристики и гарантировать высокий уровень комфорта.

Сегодня на отечественных автомобилях активно внедряется и совершенствуется комплекс электрон-

ной педали акселератора и электронного привода дроссельной заслонки. Конструкторами разрабатывается новая система сдвига фаз газораспределения ДВС, реализуется система «Старт – Стоп» и обосновываются принципы регулирования скорости легкового автомобиля.

Кроме этого, серьезной проблемой, препятствующей дальнейшему развитию систем управления силовой установкой автомобиля, является их модульная организация, при которой проявляется эффект децентрализации функций управления.

Использование же современных средств математического имитационного моделирования обеспечивает возможности для проведения комплексных работ, связанных с теоретическим анализом, а также проектированием сложных электротехнических систем автомобилей.

Таким образом, становится актуальной важная научно-техническая задача разработки математических моделей новейших систем определения вязкости моторного масла, регулирования фаз газораспре-

деления двигателя внутреннего сгорания, системы «Старт – Стоп» и системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости с оптимальными параметрами.

Цель настоящей работы состоит в разработке комплекса математических имитационных электротехнических и программных систем управления двигателем легкового автомобиля для создания эффективной системы с единым комплексным управлением.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ концепций существующих систем определения вязкости масла, системы регулирования фаз газораспределения, системы «Старт – Стоп» и системы поддержания скорости автомобиля;
- разработать математические модели этих систем;
- провести экспериментальные комплексные исследования с применением математического и имитационного моделирования, а также на действующем образце легкового автомобиля, сравнить полученные результаты и дать рекомендации по применению моделей.

Важным аспектом в решении задач по разработке электротехнических систем управления ДВС является их интеграция в рамках единого комплекса с обеспечением возможности повышения эффективности дальнейших работ, связанных с развитием, а также улучшением их взаимодействия в рамках единой концепции, определяющей общность систем.

Представленная на рис. 1 структура концепции программного обеспечения контроллера системы управления двигателем (КСУД) позволяет описать взаимосвязи модулей программного обеспечения и их функции, а также иерархию программного обеспечения и привязку к аппаратным ресурсам систем управления ДВС.

Особенностью концепции является возможность ее соблюдения как в рамках одного программного продукта на уровне математических моделей с добавлением вставок программного кода, так и на базе проектов. Совместимость достигается за счет преобразований сигналов и типов величин, а проект представляет собой элементы программного кода, полученного с помощью различных инструментов компьютерного моделирования и трансляции его в программные коды.

Система измерения вязкости масла ДВС автомобиля [7, 10, 11].

Динамические характеристики чувствительного элемента, управляемого катушкой с током, описываются системой уравнений:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dl}{dt}; \quad (1)$$

$$P_{\delta} = -\frac{1}{2} (iN)^2 \frac{d\Lambda_n}{d\delta}; \quad (2)$$

$$P_3 = (m + m') \frac{d^2x}{dt^2} + A \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + B \frac{dx}{dt} + C_x, \quad (3)$$

где U – напряжение источника питания; i – ток; R – сопротивление обмотки; L – индуктивность катушки; N – число витков обмотки управления; Λ_n – полная магнитная проводимость системы; P_3 – электромагнитное усилие; m – приведенная масса контакт-детали; t – время, x – перемещение; δ – текущее значение зазора; A – коэффициент гидродинамического сопротивления; B – коэффициент вязкого трения; C – жесткость контактдетали.

Уравнение (3) использует метод присоединенных масс и учитывает эффекты гидродинамического сопротивления жидкости при движении контактдетали и демпфировании тонкой жидкостной пленки в области перекрытия. Здесь к массе чувствительного элемента m прибавляется «присоединенная» масса жидкости, которая находится на поверхности контактдетали:

$$m = k_{\phi 1} \pi k_{\gamma} \gamma_{\rho} (B/2)^2 \ell_u,$$

где γ_{ρ} – плотность жидкости; k_{γ} – температурный коэффициент плотности жидкости; B – ширина изгибающейся части; ℓ_u – длина изгибающейся части контактдетали; $k_{\phi 1}$ – коэффициент формы контактдетали.

Величины L , P_3 , Λ_n определяются через магнитные проводимости – внешнюю $\Lambda_{\text{вн}}$ и внутреннюю $\Lambda_{\text{вн}}$ и параметры обмотки и геркона.

Экспериментальная установка для определения вязкости моторного масла (рис. 2) состоит из следующих элементов: источник питания постоянного напряжения 12 В; отладочная плата с микроконтроллером; катушка управления и геркон как чувствительный элемент; макетная плата с подключенным LCD-дисплеем и датчиком температуры; вспомогательная макетная плата, на которой располагается схема управления катушкой; соединительные провода.



Рис. 1. Концепция архитектуры программного обеспечения КСУД

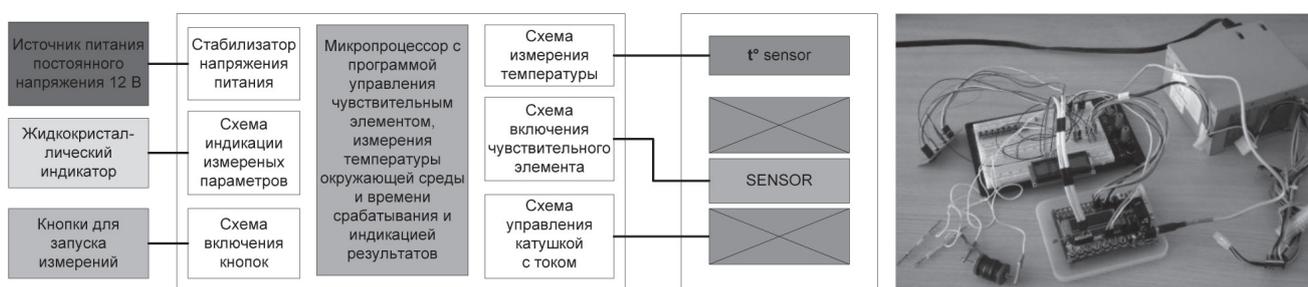


Рис. 2. Структурная схема и внешний вид экспериментальной установки

После моделирования и проведения эксперимента были определены временные параметры срабатывания контакт-деталей при температуре 26 °С окружающего воздуха.

Для определения истинного значения вязкости масла был проведен опыт на вискозиметре вибрационного типа SV-10 компании AND. Вязкость чистого моторного масла составила 1230 мПа·с.

С использованием математической модели с полученным значением вязкости было рассчитано время движения контактной группы, которое составило 3114 мкс. Погрешность измерения вязкости составила 3,8 %.

Проведен эксперимент с заполнением контактной пары чувствительного элемента отработанным

моторным маслом после его эксплуатации на автомобиле. Пробег легкового автомобиля на данном масле составил 9 тыс. км.

Для определения истинного значения вязкости отработанного масла был проведен опыт на вискозиметре вибрационного типа SV-10. Вязкость чистого моторного масла составила 865 мПа·с.

С использованием математической модели с полученным значением вязкости было рассчитано время движения контактной группы, которое составило 1663 мкс. Погрешность измерения вязкости составила 4,1 %.

Математическое и имитационное моделирование позволило установить взаимосвязь между геометрическими параметрами чувствительного эле-

мента, силами, действующими на чувствительный элемент, и вязкостью, которая является важным критерием при анализе углеводородных жидкостей. Модель описывает взаимосвязи и позволяет вычислить вязкость жидкости, способствует решению обратной задачи, подбору оптимального геометрического соотношения чувствительного элемента и помогает выбрать оптимальную схему управления.

После проведения экспериментов можно прийти к выводу, что метод, основанный на движении пластины в жидкости, позволяет давать количественную и качественную оценку вязкости моторного масла. Результаты измерения времени срабатывания геркона, с его различным заполнением, сходны по величине с результатами, получаемыми в математической модели. Отклонение полученной величины составило не более 4,5 %, что позволяет сделать вывод о применимости математической модели для

определения вязкости масла в минимальном объеме, в течение небольшого интервала времени.

Система регулирования фазами газораспределения ДВС. В рамках концепции (рис. 3) системы регулирования фазами газораспределения в составе контроллера системы управления двигателем (КСУД) разработана математическая имитационная модель, которая позволяет обеспечить оптимальную работу ДВС.

При моделировании системы описаны метод синхронизации двигателя с использованием аппаратных ресурсов процессора, позволяющих делать прерывание по сигналам от датчиков положения коленчатого вала и фаз (ДПКВ или ДФ), а также метод повышения точности синхронизации за счет применения дискретных зубьев.

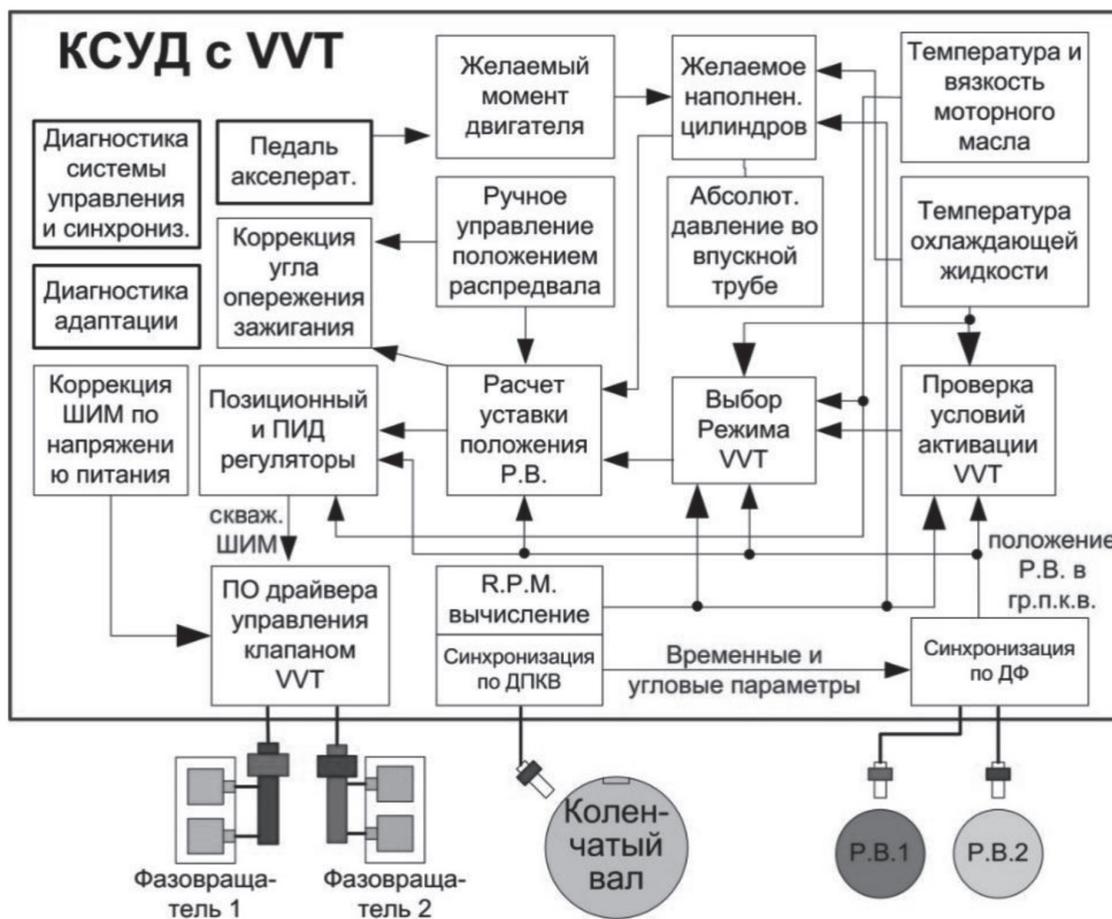


Рис. 3. Концепция системы управления фазами газораспределения

Контроллер управления двигателем посредством изменения скважности управляющего сигнала, подаваемого на клапан OCV, заставляет пере-

мещаться фазер. Система синхронизации позволяет отслеживать положение распредвала, которое используется при расчете отклонения текущего по-

ложения распределительного вала (РВ) от уставки, при этом формула расчета отклонения распределительного вала от условного нулевого положения по фронтам РВ:

$$\Delta X = \frac{\Delta T}{T_{zub}} \cdot \alpha_{zub}, \quad (5)$$

где ΔX – угол между двумя соседними активными фронтами коленчатого вала и распределительного вала; ΔT – интервал времени между двумя соседними активными фронтами коленчатого вала и распределительного вала; T_{zub} – последний измеренный период следования зубьев по коленчатому валу; α_{zub} – угол поворота коленчатого вала, который соответствует одному периоду следования двух соседних зубьев по коленчатому валу без учета выбитых.

Текущее измеренное положение распределительного вала относительно условного нуля, выбранного за систему отсчета, определяется по формуле:

$$X_{n izm.} = N_{zub.izm.} \cdot \alpha_{zub} + \Delta X, \quad (6)$$

где $X_{n izm.}$ – угол поворота распределительного вала относительно условного нулевого положения до выбранного фронта распределительного вала; $N_{zub.izm.}$ – количество зубьев коленчатого вала между условным нулем и выбранным фронтом распределительного вала с учетом пропущенных.

Отклонение от условного нулевого положения – входной параметр для системы управления фазами газораспределения, определяется по формуле:

$$\Delta X_{n izm.} = X_n - X_{n izm.}, \quad (7)$$

где $\Delta X_{n izm.}$ – отклонение от условного нулевого положения в градусах поворота коленчатого вала; X_n – табличный параметр, который определяет положение фронтов в системе отсчета, связанной с коленчатым валом.

Для определения адаптационных весовых коэффициентов выполняется расчет ошибки для каждого из фронтов распределительного вала:

$$\Delta \Theta_n = X_n - \frac{\sum_{i=0}^n X_{n izm.}}{n}, \quad (8)$$

где $\Delta \Theta_n$ – ошибка отклонения распределительного вала от условного нулевого положения по фронтам; $\sum_{i=0}^n X_{n izm.}$ – результат нескольких измерений величины отклонения для каждого из фронтов распределительного вала.

Определение условного нулевого положения выполняется по формуле:

$$X_{n apt} = X_n - \Delta \Theta_n \quad (9)$$

Величина допустимой ошибки определяется по формуле:

$$\Delta \Theta_{n max} = \Theta_{crk} + \Theta_{cam} + \Theta_{shk} + \Theta_{pos}, \quad (10)$$

где Θ_{crk} – допуск на изготовление зубчатого колеса синхронизации коленчатого вала; Θ_{cam} – допуск на изготовление колеса синхронизации распредвала; Θ_{shk} – допуск на крутильные колебания коленчатого вала по отношению к распределительному валу; Θ_{pos} – допуск на погрешность сборки и установки зубчатого колеса.

Адаптированное положение активных фронтов зубчатого колеса распределительного вала находится по формуле:

$$X_{n ret apted} = X_n - (\Delta \Theta_n \mp \Delta \Theta_{n max}), \quad (11)$$

где $X_{n ret apted}$ – адаптированное крайнее позднее положение. Для позднего положения ошибка установки ремня ГРМ допустима в небольшом пределе как в раннюю, так и в позднюю сторону.

Адаптированные положения пределов регулирования для раннего упора могут быть найдены из соотношения:

$$X_{n adv apted} = X_n - X_{n reg range} - (\Delta \Theta_n \mp \Delta \Theta_{n max} + \Delta \Theta_{n reg max}), \quad (12)$$

где $\Delta \Theta_{n reg max}$ – максимальная ошибка регулирования; $X_{n reg range}$ – предел регулирования фаз, определяющий максимальный угол поворота распредвала, при котором обеспечивается отсутствие встречи клапана с поршнем во всем диапазоне управления фазами.

Для оценки качества математической модели были проведены физические эксперименты, позволившие оценить погрешность работы разработанной системы (рис. 4). В рамках работы разработано электронное устройство, позволяющее имитировать сигналы ДПКВ и ДФ и смещение сигнала датчика фаз. Выполнена настройка и проверка математической модели в составе программного обеспечения контроллера управления двигателем.

Система «Старт – Стоп» [2, 4, 8, 9, 11]. Система использует ряд штатных компонентов автомобиля, входящих в состав различных систем управления, таких как: электронная система управления двигателем, система комфорта, шасси и других (рис. 5). Основные модули системы связаны между собой интерфейсными шинами для передачи данных. По ним передаются необходимые параметры с заданной частотой обновления и требуемой точностью.

В рамках работы спроектирована модель формирования условия разрешения работы системы. Все условия разделены по приоритетам. Это необходимо для деления условия по функциональным признакам.

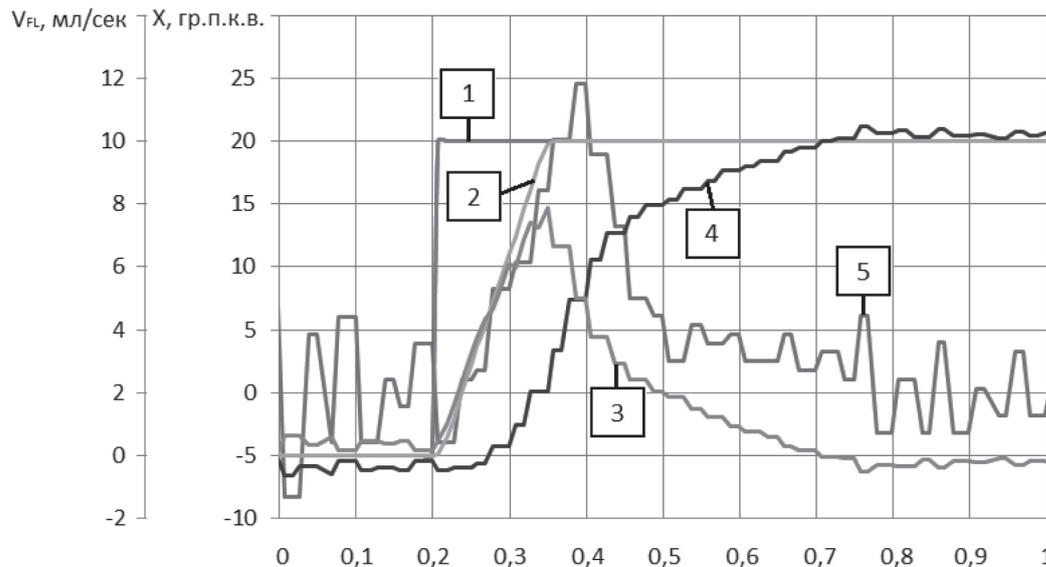


Рис. 4. Изменение положения распределительного вала с помощью системы управления фазами газораспределения:

- 1 – уставка положения распределительного вала относительно коленчатого вала;
 2 – фильтрованная уставка положения РВ; 3 – разница между текущим положением и фильтрованной уставкой;
 4 – текущее положение распредвала по отношению к коленчатому валу; 5 – расход масла через масляный клапан

Для обеспечения безопасного для стартера пуска двигателя в режиме «Старт – Стоп» применяется специальная модель управления. Запрет прокрутки стартером связан с требованиями ISO к безопасности и качеству работы системы.

При формировании признака «Старт» управление передается функции, которая отвечает за запуск двигателя, разрешение включения топливного насоса, выполняет расчет момента и подачу искры зажигания, включение реле-стартера, после чего двигатель запускается.

Экспериментальные исследования времени пуска для контроллера со стандартной прошивкой составили 0,92 с. При реализации системы «Старт – Стоп» соответствующий результат составил 0,35 с (рис. 6).

Система регулирования скорости [1, 3, 6, 8, 9, 11]. В состав системы регулирования включены модули, которые отвечают за управление и безопасность. Разработанная модель системы состоит из фильтра скорости; компоненты определения режима регулирования и управления уставкой и типом функции регулирования; компоненты регулирования положения дроссельной заслонки; компоненты приостановки процесса регулирования скорости при изменении номера передачи трансмиссии; компоненты расчета длительности отклонения от заданной скорости; компоненты деактивации.

Условие постоянного движения описывается выражением:

$$C_VS_{diff\ neg} < VS_{diff\ fraw} < C_VS_{diff\ pos} \quad (13)$$

замедление ускорение

Для трех режимов движения представлена формула VS_{diff} :

- режим постоянного движения:

$$VS_{diff} = VS_{diff\ raw} \cdot C_VS_{diff\ fac}; \quad (14)$$

- режим ускорения:

$$VS_{diff} = VS_{diff\ fraw} \cdot C_VS_{diff\ fac} + C_VS_{diff}; \quad (15)$$

- режим замедления:

$$VS_{diff} = VS_{diff\ raw} \cdot C_VS_{diff\ fac} - C_VS_{diff}. \quad (16)$$

В составе базового компонента ПИ-регулирования имеется функция инициализации интегратора, которая обеспечивает плавную передачу управления от педали к системе регулирования. При активации режима поддержания или ограничения скорости интегратор ПИ-регулятора инициализируется начальным значением, которое определяется коэффициентом $K_{int\ ini}(freq, gear)$ зависимости от частоты вращения двигателя и текущего номера передачи.

Интегральная часть общая для трех режимов регулирования.

Общая формула ПИ-регулятора положения виртуальной педали акселератора имеет вид:

$$Q_{pid}(VS_{diff}) = P_{pid}(VS_{diff}) + I_{pid}(VS_{diff});$$

$$K_{pid\ min} < Q_{pid}(VS_{diff}) < K_{pid\ max}. \quad (17)$$

P – часть ПИ-регулятора в нормальном режиме рассчитывается по формуле:

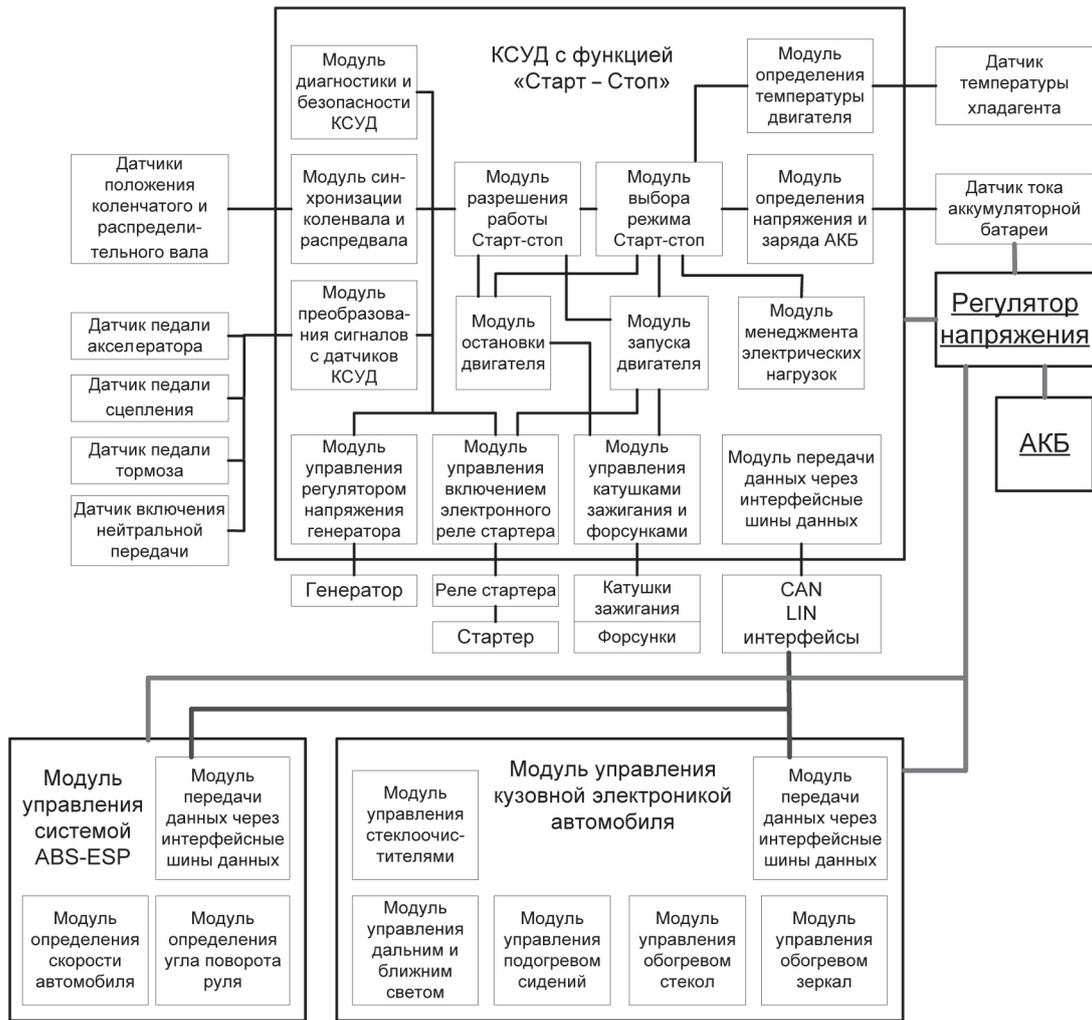
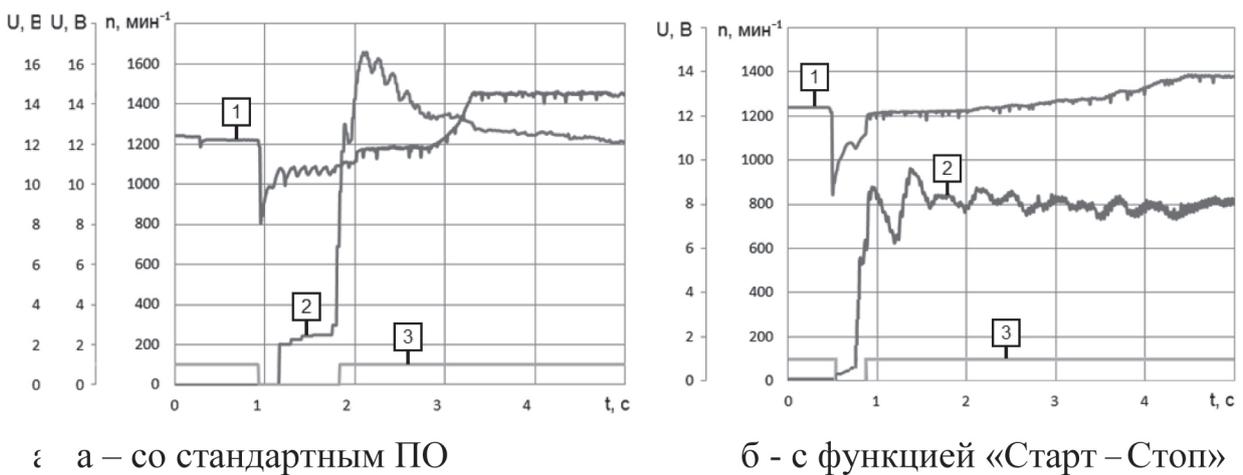


Рис. 5. Концепция системы «Старт – Стоп»



а – со стандартным ПО

б - с функцией «Старт – Стоп»

Рис. 6. Диаграмма пуска двигателя со стандартным ПО:
 1 – напряжение бортовой сети автомобиля; 2 – частота вращения двигателя;
 3 – бит прокрутки двигателя стартером

$$P_{pid}(VS_{diff}) = VS_{diff} \cdot K_{p\,fac}(freq);$$

$$K_{p\,min} < P_{pid}(VS_{diff}) < K_{p\,max}. \quad (18)$$

P – часть ПИ-регулятора при работе модели в режиме ускорения рассчитывается по формуле:

$$P_{pid\,acc}(VS_{diff}) = VS_{diff} \cdot (K_{p\,fac}(freq) + K_{p\,fac}(freq, VS_{acc}));$$

$$K_{p\,min} < P_{pid}(VS_{diff}) < K_{p\,max}. \quad (19)$$

P – часть ПИ-регулятора при работе модели в режиме замедления рассчитывается по формуле:

$$P_{pid\,dec}(VS_{diff}) = VS_{diff} \cdot (K_{p\,fac}(freq) + K_{p\,fac}(freq, VS_{dec}));$$

$$K_{p\,min} < P_{pid}(VS_{diff}) < K_{p\,max}. \quad (20)$$

I – часть ПИ-регулятора рассчитывается по формуле:

$$I_{pid}(VS_{diff}) = VS_{diff} \cdot K_{i\,fac}(gear) \cdot K_{i\,fac}(freq);$$

$$K_{i\,min} < I_{pid}(VS_{diff}) < K_{i\,max}. \quad (21)$$

Для оценки адекватности математической модели выполнен имитационный эксперимент работы системы. Результаты работы показывают, что полученная плавность изменения значения фильтрованной скорости позволяет устранить хлопки дроссельной заслонки и уменьшить вероятность отказа и быстрого износа деталей исполнительных элементов. Запаздывание фильтрованной скорости от действительного значения составляет 150 мс (рис. 7).

Кроме этого, в работе проведено имитационное моделирование режима ограничения скорости, особенность которого заключается в реализации функции набора скорости до значения уставки под управлением водителя и ограничении ее, несмотря на нажатие педали акселератора, требующее увеличения момента (рис. 8).

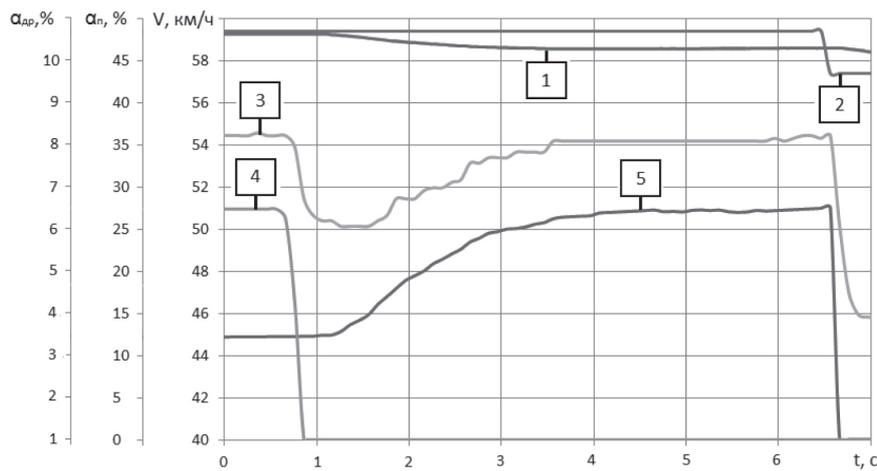


Рис. 7. Процесс передачи управления от водителя к системе:

- 1 – уставка скорости; 2 – фильтрованная скорость; 3 – процент открытия дроссельной заслонки;
- 4 – процент нажатия педали акселератора; 5 – результирующее воздействие (эквивалент педали акселератора)

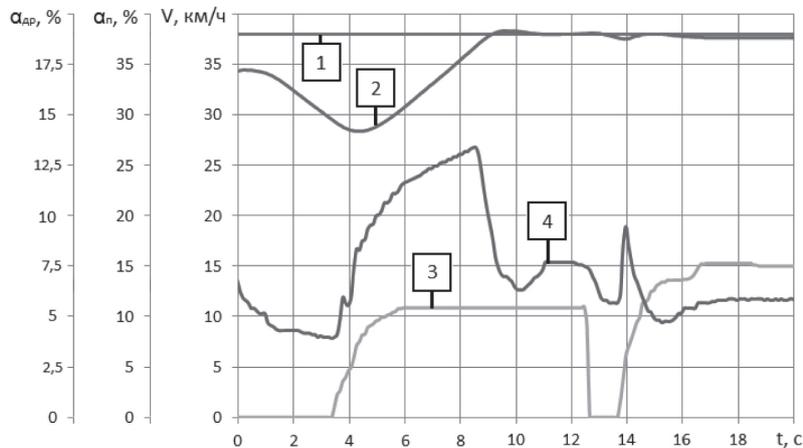


Рис. 8. Режим ограничения скорости:

- 1 – уставка ограничения скорости; 2 – фильтрованная скорость; 3 – процент открытия дроссельной заслонки

Выводы

- В настоящее время основные разработки сложных комплексов ведутся без привязки к конкретной модификации автомобиля, что приводит к проявлению эффекта децентрализации функций управления. В представленной работе выполнены комплексные исследования по созданию общей концепции, обеспечивающей единый подход в реализации алгоритмов управления, на основе которой в дальнейшем разработаны математические модели систем;

- проведенные теоретические исследования показали возможность применения для определения вязкости моторного масла в качестве параметра времени движения контактной группы чувствительного элемента;

- разработана математическая модель определения вязкости масла, описывающая взаимосвязь между геометрическими параметрами чувствительного элемента, силами, действующими на электрические контакты, и вязкостью жидкости, находящейся между контактами. Предлагаемое устройство определения вязкости позволяет произвести измерения с малой погрешностью за короткий промежуток времени, используя минимальный объем диагностируемой жидкости;

- предложена математическая модель системы регулирования фаз газораспределения, позволяющая повысить скорость достижения требуемого момента ДВС автомобиля и расширить диапазон частот вращения двигателя с получением максимального крутящего момента. Экспериментальные исследования показали, что регулирование фаз газораспределения позволило увеличить скорость достижения максимального момента на 12 %;

- разработана математическая модель системы «Старт – Стоп», позволяющая производить быстрый запуск двигателя с минимальными энергетическими потерями. Используя алгоритмы системы «Старт – Стоп», удалось снизить время прокрутки двигателя с 0,9 до 0,3 с. и обеспечить более быстрое определение момента искрообразования и топливоподачи;

- предложенная математическая имитационная модель системы регулирования скорости автомобиля позволяет осуществлять управление углом открытия дроссельной заслонки через контроллер системы управления ДВС без применения дополнительных блоков управления, что позволяет обеспечить непосредственное воздействие на исполнительные механизмы;

- создание математических имитационных моделей электротехнических систем и их реализация

на базе общей концепции построения программно-аппаратного комплекса может позволить производить модернизацию и расширение функций электротехнических систем управления без существенных капиталовложений.

Статья выполнена в рамках работы над грантом Президента РФ по поддержке молодых ученых – докторов наук на 2014–2015 гг., МД-2782.2014.8.

Список литературы

1. Дебелов В.В. Электронная система регулирования скорости движения автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости [Текст] / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.В. Иванов, В.Е. Строганов, В.Е. Ютт // Грузовик. – 2013. – № 12. – С. 19–23.

2. Дебелов В.В. Электронная система управления автомобиля «Start – Stop» [Текст] / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 2. – С. 6–9.

3. Дебелов В.В. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1 [Текст] / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.И. Строганов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – № 1. – С. 40–48.

4. Дебелов В.В. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2 [Текст] / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, М.А. Пьянов, В.И. Строганов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – № 2. – С. 19–28.

5. Дебелов В.В. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля [Текст] / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, М.А. Пьянов, В.И. Строганов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 4 – С. 5–12.

6. Дебелов В.В. Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости [Текст] / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.В. Иванов, В.И. Строганов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 6. – С. 2–7.

7. Дебелов В.В. Имитационное моделирование электронной системы определения вязкости масла в силовом агрегате автомобиля [Текст] / А.М. Слукин, В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.В. Иванов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 5. – С. 2–5.

8. Козловский В.Н. Моделирование электро-

оборудования автомобилей в процессах проектирования и производства: монография [Текст] / В.Н. Козловский. – ФГБОУ ВПО «ТГУ», 2009. – 227 с.

9. *Козловский В.Н.* Обеспечение качества и надежности электрооборудования автомобилей: монография [Текст] / В.Н. Козловский. – ФГБОУ ВПО «ТГУ», 2009. – 274 с.

10. *Инновационные методы исследования качества и надежности электромобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой: монография [Текст] / В.И. Строганов, В.Н. Козловский. – МАДГТУ «МАДИ», 2012. – 228 с.*

11. *Строганов В.И.* Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: монография [Текст] / В.И. Строганов, В.Н. Козловский. – МАДГТУ «МАДИ», 2014. – 264 с.

References

1. *Debelov V.V.* Jelektronnaja sistema regulirovanija skorosti dvizhenija avtomobilja v rezhimah podderzhanija i ogranichenija skorosti [Tekst] / V.V. Debelov, V.N. Kozlovskij, V.V. Ivanov, V.E. Stroganov, V.E. Jutt // Gruzovik. – 2013. – № 12. – S. 19–23.

2. *Debelov V.V.* Jelektronnaja sistema upravlenija avtomobilja «Start – Stop» [Tekst] / V.V. Debelov, V.N. Kozlovskij, V.E. Jutt // Jelektronika i jelektooborudovanie transporta. – 2014. – № 2. – S. 6–9.

3. *Debelov V.V.* Kompleks jelektronnyh sistem upravlenija dvizheniem legkovogo avtomobilja s kombinirovannoj silovoj ustanovkoj. Chast' 1. [Tekst] / V.V. Debelov, V.N. Kozlovskij, V.I. Stroganov, M.A. P'janov // Jeletrotehicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2014. – № 1. – S. 40–48.

4. *Debelov V.V.* Kompleks jelektronnyh sistem upravlenija dvizheniem legkovogo avtomobilja s kombinirovannoj silovoj ustanovkoj. Chast' 2 [Tekst]

/ V.V. Debelov, V.N. Kozlovskij, V.V. Ivanov, V.E. Stroganov // Jeletrotehicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2014. – № 2. – S. 19–28.

5. *Debelov V.V.* Modelirovanie jelektronnoj sistemy VVT upravlenija dvigatelem legkovogo avtomobilja [Tekst] / V.V. Debelov, V.N. Kozlovskij, V.V. Ivanov, V.E. Stroganov // Jelektronika i jelektooborudovanie transporta. – 2014. – № 4 – S. 5–12.

6. *Debelov V.V.* Modelirovanie jelektronnoj sistemy regulirovanija skorosti dvizhenija legkovogo avtomobilja v rezhimah podderzhanija i ogranichenija skorosti [Tekst] / V.V. Debelov, V.N. Kozlovskij, V.V. Ivanov, V.E. Stroganov // Jelektronika i jelektooborudovanie transporta. – 2013. – № 6. – S. 2–7.

7. *Debelov V.V.* Imitacionnoe modelirovanie jelektronnoj sistemy opredelenija vjazkosti masla v silovom agregate avtomobilja [Tekst] / A.M. Slukin, V.V. Debelov, V.N. Kozlovskij, V.V. Ivanov // Jelektronika i jelektooborudovanie transporta, 2014. – № 5. – S. 2–5.

8. *Kozlovskij V.N.* Modelirovanie jelektooborudovanija avtomobilej v processah proektirovanija i proizvodstva: monografija [Tekst] / V.N. Kozlovskij. – FGBOU VPO «TGU», 2009. – 227 s.

9. *Kozlovskij V.N.* Obespechenie kachestva i nadezhnosti jelektooborudovanija avtomobilej: monografija [Tekst] / V.N. Kozlovskij. – FGBOU VPO «TGU», 2009. – 274 s.

10. *Innovacionnye metody issledovanija kachestva i nadezhnosti jelektooborudovanija i avtomobilej s gibridnoj silovoj ustanovkoj: monografija [Tekst] / V.I. Stroganov, V.N. Kozlovskij. – MADGTU «MADI», 2012. – 228 s.*

11. *Stroganov V.I.* Modelirovanie sistem jelektooborudovanija i avtomobilej s kombinirovannoj silovoj ustanovkoj v processah proektirovanija i proizvodstva: monografija [Tekst] / V.I. Stroganov, V.N. Kozlovskij. – MADGTU «MADI», 2014. – 264 s.



Андреанова А.В.
Andrianova A.V.

*младший научный сотрудник,
аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
Россия, г. Уфа*



Мешков И.К.
Meshkov I.K.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
Россия, г. Уфа*



Султанов А.Х.
Sultanov A.Kh.

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
Россия, г. Уфа*

УДК 629.783

ГЕНЕРАЦИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА ДЛЯ ROF СИСТЕМ

В статье предлагается метод генерации сверхширокополосного (СШП) сигнала для Radio-over-Fiber (RoF) систем. Рассматривается совместное использование СШП-технологии передачи данных и технологии RoF для передачи многоканального сигнала. При использовании СШП-технологии совместно с технологией RoF возникает проблема выбора способа передачи СШП-радиоимпульса. В работе предложена схема организации многоканальной передачи сверхширокополосного сигнала на основе FTTH (fiber to the home – оптоволокно до квартиры) сетей для передачи мультимедийного высокоскоростного контента. Проанализирована спектральная маска Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ), ограничивающая эффективную изотропную излучаемую мощность СШП-сигнала на территории Российской Федерации, и предложено использовать передачу СШП-сигнала в трех частотных «окнах» на основе технологии IR-UWB (Impulse radio ultra-wideband) с помощью сверхкоротких импульсов, позволяющих достичь высокой битовой скорости передачи.

В работе представлена экспериментальная реализация технологии передачи IR-UWB с учетом спектральной маски ГКРЧ. В эксперименте реализуется электрическая генерация трех отдельных IR-UWB каналов, частоты которых смещены на 4,5, 7 и 9,5 ГГц соответственно. Такой выбор частот объясняется тремя «окнами» маски ГКРЧ. Частоты 4,5, 7 и 9,5 ГГц являются центральными частотами этих «окон». Данный подход позволил получить сверхширокополосный сигнал, который оптимально «вписывается» в спектральную маску ГКРЧ.

Для оценки работоспособности предлагаемой системы были произведены измерения коэффициента битовых ошибок (BER – bit error rate). Коэффициент BER варьируется от 10–3 при мощности сигнала на входе фотодетектора 7 дБм, до 10–13 при мощности сигнала на входе фотодетектора 11 дБм. Измерения проводились для четырех случаев: при отсутствии оптической линии, 25 км оптической линии, 50 км оптической линии и 60 км оптической линии.

В статье на рисунках представлены схема экспериментального стенда и полученный IR-UWB сигнал. Также показаны графики зависимости коэффициента BER от мощности сигнала на входе фотодетектора.

Ключевые слова: сверхширокополосный сигнал, radio-over-fiber, передача сверхкоротких импульсов, ортогональное частотное мультиплексирование, гауссовский импульс, моноцикл, коэффициент битовых ошибок, маска ГКРЧ, спектральная плотность мощности, модулятор Маха – Цендера.

MULTICHANNEL ULTRA-WIDEBAND SIGNAL GENERATION FOR ROF SYSTEMS

Ultra – wideband (UWB) signal generation approach for Radio-over-Fiber (RoF) systems is proposed in the paper. Shared use of UWB transmission technology and RoF technology for multichannel signal transmission is considered in the paper. There is a problem of choosing UWB radio impulse transmission approach when using UWB technology together with RoF technology. The scheme of ultra-wideband signal multichannel transmission based fiber to the home (FTTH) networks for multimedia high – speed content transmission is proposed.

State radio frequency commission (SRFC) spectral mask is analyzed, which limited UWB signal effective isotropic radiated power on the territory of Russian Federation and the using of UWB signal transmission in three frequency «windows» based Impulse radio ultra-wideband (IR-UWB) with ultra-short impulses, allowing to achieve high bit rate, is proposed.

In this paper IR-UWB transmission technology experimental realization, which takes into account SCRF spectral mask is offered. In the experiment generation of three IR-UWB channels, which frequencies are shifted to 4,5, 7 and 9,5 GHz is realized. We chose such frequencies because of SCRF spectral mask «windows». The frequencies 4,5, 7 and 9,5 GHz are central frequencies of these «windows». This approach allowed to obtain ultra-wideband signal, which best corresponds the SCRF spectral mask.

To assess the performance of proposed system bit error rate (BER) measurements were taken. BER is 10⁻³ for received optical power at photodiode 7 dBm and 10⁻¹³ for received optical power at photodiode 11 dBm. The measurements were taken for four cases: back-to-back, 25 km optical line, 50 km optical line and 60 km optical line.

In this paper experimental setup and received IR-UWB signal are shown on the figures. Also plots BER vs. received optical power at photodiode are shown on the figures.

Key words: ultra-wideband signal, radio-over-fiber, impulse-radio-ultra-wideband, orthogonal frequency division multiplexing, Gaussian impulse, monopulse, bit error ratio, GKRCH mask, spectral power density, Mach – Zender modulator.

Технология СШП-данных является одной из перспективных технологий широкополосного доступа к мультимедийным услугам и альтернативой для замены существующих персональных и локальных беспроводных сетей. СШП-системы обладают низким уровнем собственных помех, устойчивостью к многолучевым замираниям, низкой вероятностью перехвата и возможностью прохождения через препятствия, при этом сохраняя устойчивую связь. СШП-системы обладают высокой скоростью передачи внутри пикосотовой ячейки, которую организует одно оконечное устройство. Существенной особенностью является использование СШП-технологии совместно с технологией RoF для организации передачи нескольких каналов. Данное направление может быть привлекательным в будущем для организации передачи в одном волоконном и беспроводном канале нескольких информационных каналов, которые будут использоваться для передачи различных стандартов (LTE, HD и 4K цифровое телевидение, Wi-Fi и т. д.).

На рис. 1 представлена концепция построения и организация передачи мультимедийного контента использующих технологию построения оптических сетей FTTH (fiber to the home – оптоволокно до квартиры) и спектральная маска ГКРЧ. На базовую стан-

цию (БС) поступают мультимедийные данные, которые разводятся по отдельным частотным каналам, и генерируется единый СШП-сигнал. На абонентском модуле (АМ) оптический сигнал проходит через фотодетектор, полосовой фильтр, усилитель мощности и излучается в эфир. При этом спектральная плотность мощности (СПМ) ограничена значением -45 дБм/МГц, данное обстоятельство существенно ограничивает радиус беспроводной персональной сети в диапазоне частот от 2,85 до 10,6 ГГц [1]. Приемные модули (ПМ) располагаются на оконечных устройствах (телевизор, персональный компьютер, планшетный компьютер). Еще одним ограничивающим фактором, влияющим на полосу пропускания, является наличие в спектральной маске «окон» в диапазоне: 3,95–4,425 ГГц – I «окно», 6–8,1 ГГц – II «окно» и 8,625–10,6 ГГц – III «окно».

На данный момент известны две технологии передачи СШП-сигнала: передача сверхкоротких импульсов (IR-UWB) и передача на основе ортогонального частотного мультиплексирования 14 каналов с полосой 528 МГц на 128 поднесущих с QPSK модуляцией (OFDM-UWB) [2]. Последняя технология применима только для маски FCC, принятой в 2002 году. Для маски, принятой на территории Российской Федерации, на данный момент рекомендации

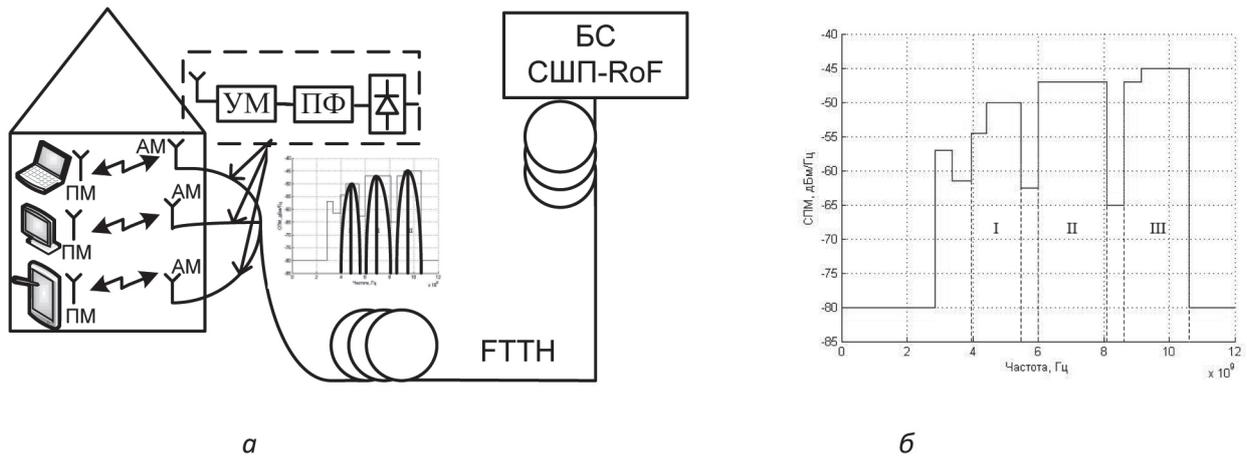


Рис. 1: а) схема организации передачи на основе FTTH-сетей; б) маска ГКРЧ УМ – усилитель мощности, ПФ – полосовый фильтр, БС – базовая станция, СШП-RoF – сверхширокополосный RoF

по использованию технологии OFDM-UWB отсутствуют [3].

Передача данных на основе технологии IR-UWB с помощью сверхкоротких импульсов длительностью до 0,1 нс обеспечивает высокую скорость передачи данных – до 10 Гбит/с. При реализации данной технологии в качестве переносчиков битов информации используется гауссовский моноцикл или его производные [4]. Разработка и моделирование одного импульса, спектральная плотность мощности которого соответствует всей маске частот, является трудоемкой задачей и сложной при практической ре-

ализации. Одним из подходов для решения данной проблемы является генерация трех каналов в различных «окнах» маски. Скорость передачи в каждом подканале будет определяться выбором длительности моноцикла и количеством импульсов, отвечающих за передачу логического «0» и «1». Но в общем случае для первого «окна» максимальная скорость передачи будет около 475 Мбит/с, для второго – 2,1 Гбит/с, для третьего – 1,975 Гбит/с.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной реализации предложенной технологии передачи СШП-сигнала с использованием технологии RoF.

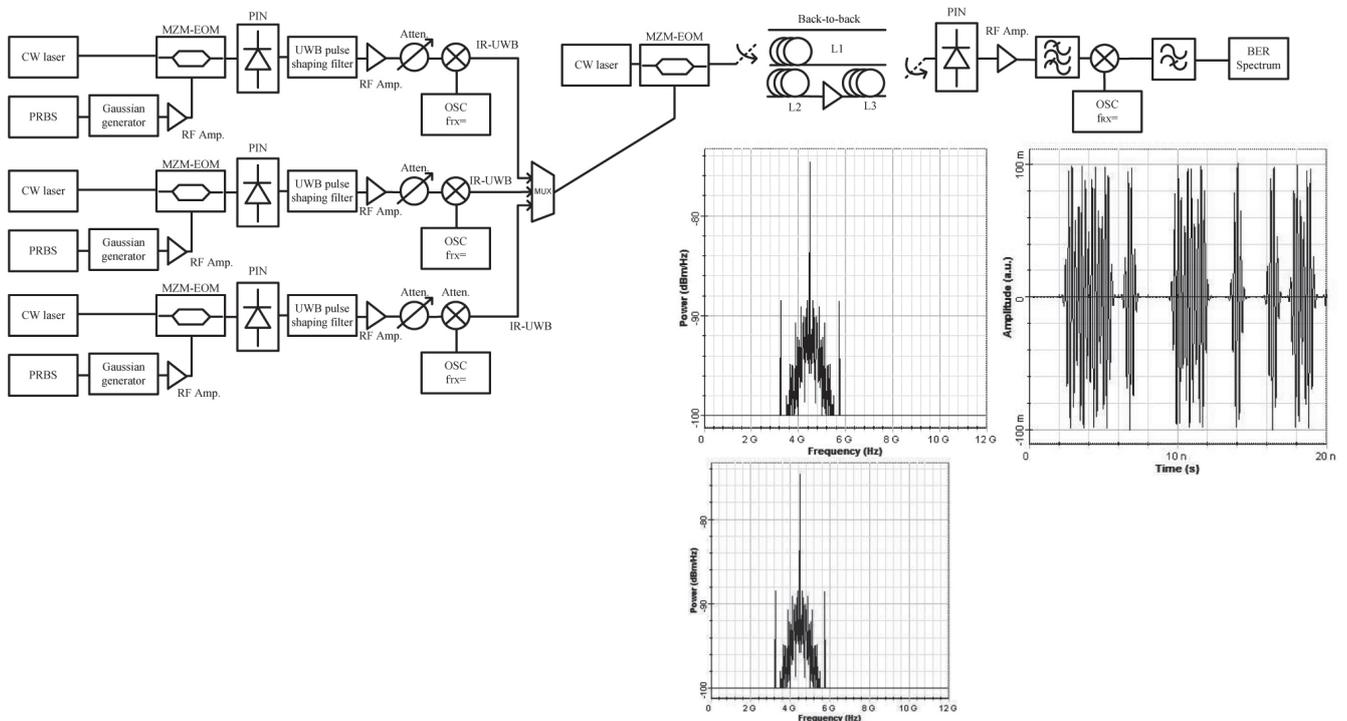


Рис. 2. Экспериментальная реализация СШП-системы: CW-laser – лазер, работающий в непрерывном режиме; PRBS – случайная последовательность бит; Gaussian generator – генератор гауссовских импульсов; MZM-EOM – электрооптический модулятор Маха – Цендера; PIN – PIN – фотодиод; UWB pulse shaping filter – фильтр формы; RF Amp. – электрический усилитель; Atten. – аттенюатор; OSC – генератор колебаний; MUX – мультиплексор

В данной схеме реализуется генерация трех IR-UWB-сигналов, несущие которых смещены на 4,5 ГГц (1 ch), 7 ГГц (2 ch) и 9,5 ГГц (3 ch) соответственно. Такой выбор частот объясняется тремя «окнами» маски ГКРЧ. Частоты 4,5, 7 и 9,5 ГГц являются центральными частотами этих «окон».

На электрический вход модулятора Маха – Цендера, у которого полоса пропускания составляет около 10 ГГц, подается случайная последовательность гауссовских импульсов со скоростью, не превышающей максимальные скорости для каждого канала. В качестве альтернативного варианта генерирования гауссовских импульсов можно использовать лазер с фиксированным режимом формирования импульсов (MLL – mode locked laser), тогда на электрический вход модулятора Маха – Цендера можно подавать случайную последовательность NRZ-импульсов [5]. К оптическому входу модулятора подключается СВ-лазер. Модуляция оптического сигнала осуществляется электрической последовательностью с различной скоростью. Далее оптические импульсы поступают на PIN-фотодиод, где происходит их преобразование в электрические импульсы. Формирование гауссовских моноциклов осуществляется с помощью фильтра формы (UWB pulse shaping filter). После фильтра каждый моноцикл сдвигается по частоте. Сдвиг осуществляется с помощью генераторов несущего высокочастотного колебания с час-

тотами 4,5, 7 и 9,5 ГГц. Сформированные IR-UWB-сигналы поступают на мультиплексор. Общий IR-UWB-сигнал занимает полосу частот 2,85–10,6 ГГц (полоса частот маски ГКРЧ).

IR-UWB сигнал после мультиплексора поступает на электрический вход модулятора Маха – Цендера. Промодулированный оптический сигнал поступает в линию. В эксперименте использовались четыре варианта длин оптических линий SMF со стандартными техническими характеристиками: без оптической линии (режим Back-to-back), оптическая линия 25 км (L1), 50 км (L2), 60 км (L3). После оптической линии общий IR-UWB-сигнал детектируется PIN-фотодиодом. Частота дискретизации фотодиода 80 ГГц, полоса модуляции – 2 ГГц.

Для оценки работоспособности всей системы использовался анализ коэффициента битовых ошибок (BER – bit error ratio). Анализ BER проводился для каждого из трех каналов. Для выделения нужного канала на приемной стороне использовались полосовые фильтры, настроенные соответственно на свой канал с несущей частотой 4,5, 7, 9,5 ГГц. Анализ BER проводился для трех случаев: без оптического волокна, 25, 50 и 60 км. Измерения проводились при мощности сигнала на входе фотодетектора 4–8 дБм.

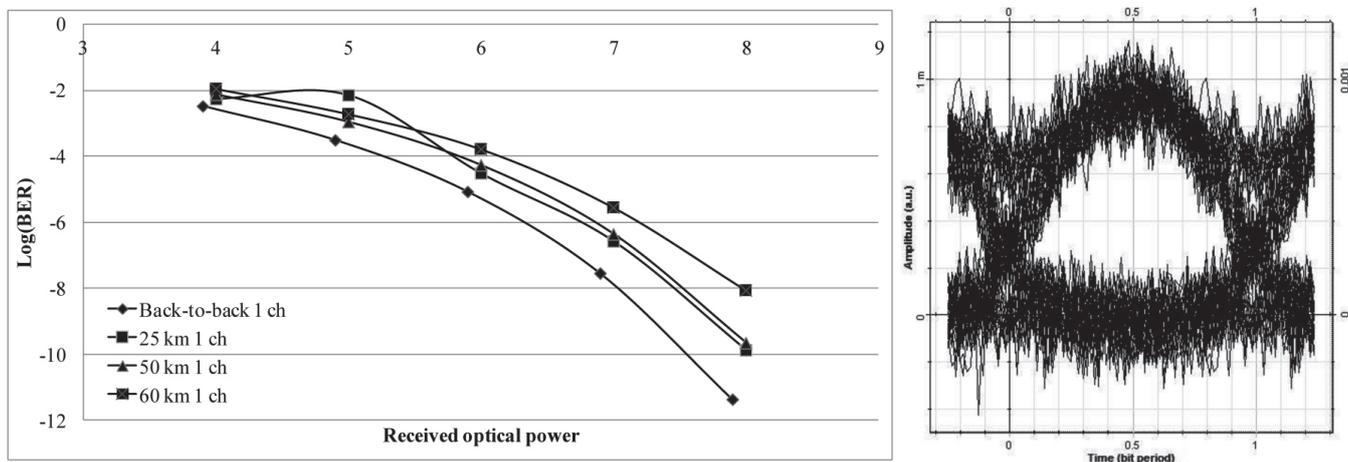


Рис. 3. Первый канал: а) коэффициент BER; б) глаз-диаграмма

Как видно из рис. 3–5, с увеличением длины волокна коэффициент BER увеличивается. Это объясняется влиянием нелинейностей в оптическом волокне. Также можно отметить, что при отсутствии волокна и при расстоянии в 25 км BER для третьего канала 9,5 ГГц меньше, чем для первого – 4,5 ГГц и второго – 7 ГГц. Но с увеличением длины воло-

на BER увеличивается. При 50 и 60 км наименьший BER был получен для первого канала – 4,5 ГГц. На рис. 6 приведена спектральная плотность мощности сгенерированного IR-UWB-сигнала с наложением маски ГКРЧ. Из рисунка видно, что полученный сигнал соответствует маске ГКРЧ.

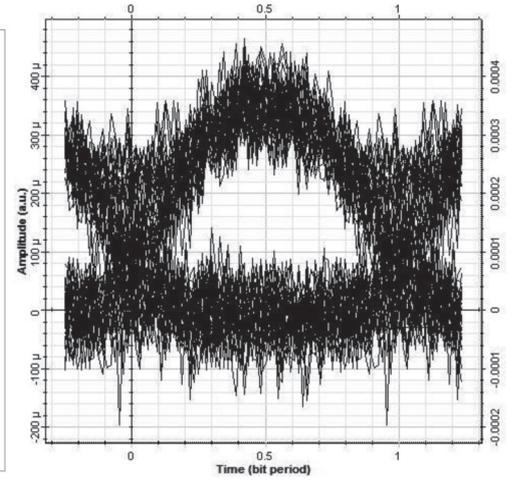
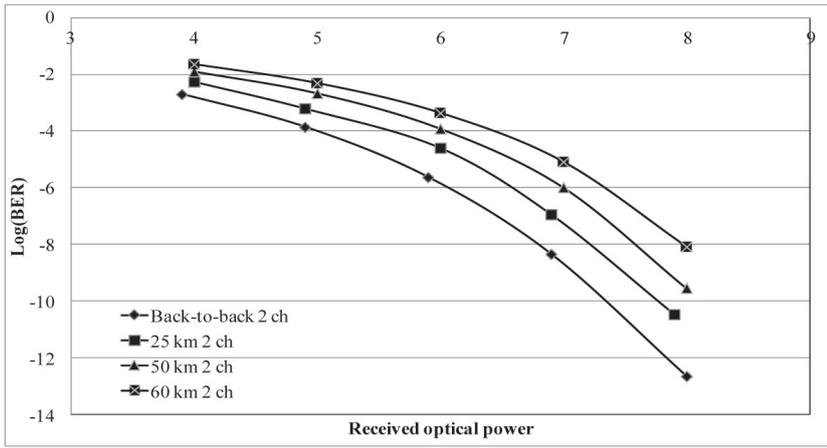


Рис. 4. Второй канал: а) коэффициент BER; б) глаз-диаграмма

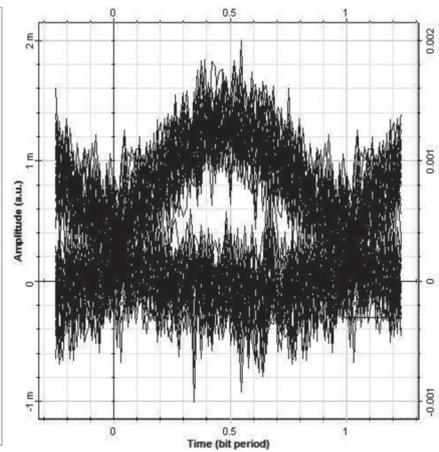
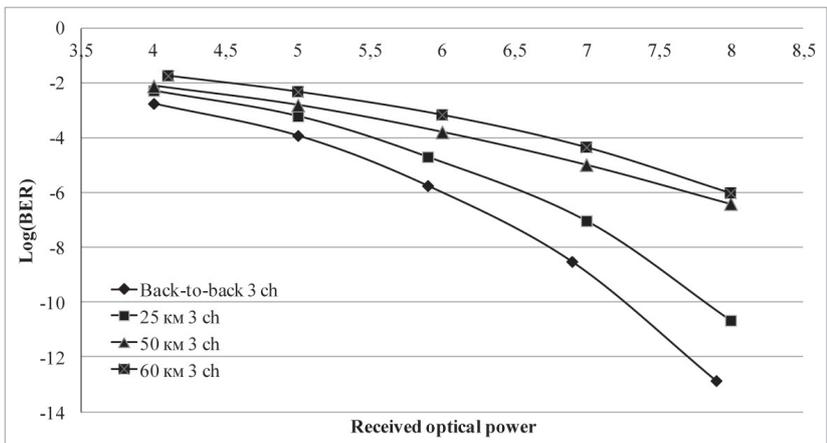


Рис. 5. Третий канал: а) коэффициент BER; б) глаз-диаграмма

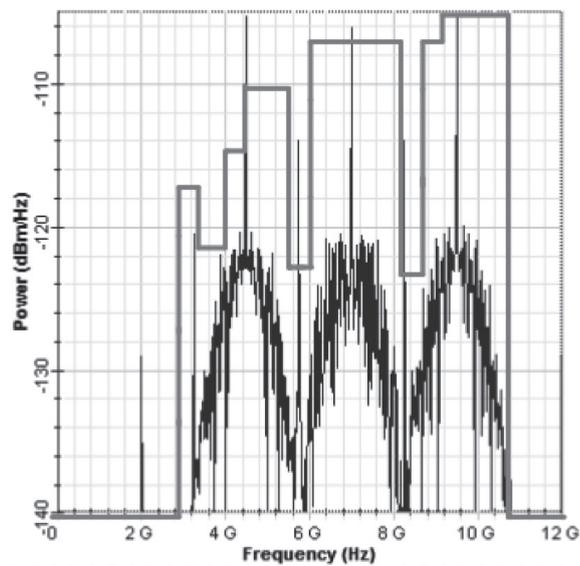


Рис. 6. СПМ полученного сигнала

В данной статье предложена схема генерации трехканального IR-UWB-сигнала, соответствующего спектральной маске ГКРЧ частот. Данная схема позволяет осуществить передачу мультимедийной информации по трем независимым каналам с различной скоростью, используя технологию RoF, при этом позволяя гибко управлять спектральной плотностью мощности сверхширокополосного сигнала.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0058. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0058.

Список литературы

1. Приложение к решению ГКРЧ от 15 декабря 2009 г. № 09-05-02. Сверхширокополосные беспроводные устройства. – 2009. – 2 с.
2. *Multiband OFDM*. Physical layer specification [Online]. WiMedia Alliance, 2005. – Available: http://www.wimedia.org/en/docs/10003r02WM_CRB-WiMedia_PHY_Spec_1.5.pdf.
3. Yu X. System wide implementation of photonicly generated impulse radio ultra-wideband for gigabit fiber-wireless access [Text] / X. Yu, T.B. Gibbon, I.T. Monroy // *Journal of lightwave technology*. – 2013. – Vol. 31. – № 2.
4. Solomon Tesfay Abraha. Impulse Radio Ultra Wideband over Fiber Techniques for Broadband In-Building Network Application, Ph. D. thesis [Text] / Solomon Tesfay Abraha. – Eindhoven: Tech. Univ. Eindhoven, 2012. – Available: <http://alexandria.tue.nl/extra2/735363.pdf>.
5. Llorente R. Ultra-Wideband radio signals distribution in FTTH networks [Text] / R. Llorente, T. Alves, M. Morant // *IEEE Photonics technology letters*. – 2008. – Vol. 20. – № 11.

References

1. *Prilozhenie k resheniju GKRC h ot 15 dekabrja 2009 g. № 09-05-02. Sverhshirokopolosnye besprovodnyye ustrojstva*. – 2009. – 2 s.
2. *Multiband OFDM*. Physical layer specification [Online]. WiMedia Alliance, 2005. – Available: http://www.wimedia.org/en/docs/10003r02WM_CRB-WiMedia_PHY_Spec_1.5.pdf.
3. Yu X. System wide implementation of photonicly generated impulse radio ultra-wideband for gigabit fiber-wireless access [Text] / X. Yu, T.B. Gibbon, I.T. Monroy // *Journal of lightwave technology*. – 2013 – Vol. 31. – № 2.
4. Solomon Tesfay Abraha. Impulse Radio Ultra Wideband over Fiber Techniques for Broadband In-Building Network Application, Ph. D. thesis. [Text] / Solomon Tesfay Abraha. – Eindhoven: Tech. Univ. Eindhoven, 2012. – Available: <http://alexandria.tue.nl/extra2/735363.pdf>.
5. Llorente R. Ultra-Wideband radio signals distribution in FTTH networks [Text] / R. Llorente, T. Alves, M. Morant // *IEEE Photonics technology letters*. – 2008. – Vol. 20. – № 11.



Зотов К.Н.
Zotov K.N.

старший преподаватель кафедры «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



Кузнецов И.В.
Kuznetsov I.V.

доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



Салов А.С.
Salov A.S.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г. Уфа



Симбирцева Д.С.
Simbirtseva D.S.

*студентка
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
Россия, г. Уфа*



Стрельникова Л.В.
Strelnikova L.V.

*студентка
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
Россия, г. Уфа*

УДК 621.391.6

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ АБОНЕНТСКИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

В данной статье описывается метод нахождения аномальных зон, пространственно-временные изменения трафиковых процессов (изменения нагрузки) в сетях операторов мобильной связи, на основе теории разладки с последующим применением алгоритма кластеризации, для выделения узлов спроса.

Радиоресурсы сетей связи подлежат оперативному распределению вследствие резких изменений концентрации абонентов в зоне обслуживания, вызванных особенностями использования мобильных сетей конечными пользователями. Ресурсы из менее нагруженных сот могут быть использованы для решения этой проблемы.

Функция позиционирования мобильных станций оператора мобильной сети является важной проблемой современной науки.

Для того, чтобы обеспечить эффективное управление радиоресурсами, необходимо понять мгно-

венное расположение мобильных станций (МС) с точностью, которая поможет найти участки с высокой концентрацией абонентов и идентифицировать узлы спроса внутри каждого кластера.

В результате позиционирования получаются наборы нечетких областей возможного появления абонентов, которые будут сгруппированы. Наиболее подходящий алгоритм кластеризации нечетких множеств – это FCM.

Указанный алгоритм обработки данных с теорией разладки дает наиболее полное представление о количестве. В результате мы можем четко определить узлы спроса на карте области.

Особенностями алгоритма FCM являются: возможность прогнозирования центров будущих кластеров в пространстве предварительной информации по концентрации абонентов; необходимость ввода количества кластеров; для получения центров масс кластеров (узлов спроса).

Ключевые слова: теория разладки, пространственно-временная разладка, трафиковые процессы, алгоритм нечеткой кластеризации, C-Means, алгоритм FCM, узел спроса.

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR ANALYZING THE CONCENTRATION OF A CLUSTER OF SUBSCRIBER DEVICES IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS

This article describes a method for finding anomalous zones spatio-temporal changes traffic processes (load changes) in the networks of mobile operators based on the theory of disorder followed by fuzzy clustering algorithm to isolate nodes demand.

The radio resources are subject to operational control because when subscribers move it can cause occasional congestions in mobile communication systems. The resources from less loaded parts can be used to solve this problem.

Positioning function in MS mobile operator networks is an important problem of modern science.

First step to provide efficient management of radio resources is the location of mobile stations (MS) with accuracy which help to find areas with high concentration of subscribers and identify nodes of demand inside each cluster.

The set of fuzzy areas of possible appearance of subscribers is to be clustered. The most appropriate fuzzy clustering algorithm for that is FCM.

The first data processing by change theory brings information about sufficient quantity of clusters for default variety of subscribers. As a result we can clearly identify the nodes of demand on a region map.

The FCM algorithm's features are: possibility to set the centers of future clusters in space by prior information about concentration of subscribers; derivation of clustered areas of subscribers with assumptions about membership in particular cluster. Possibility to set quantity of clusters, and to derive the centre of mass of clusters.

Key words: the theory of disorder, spatiotemporal discord, traffic processes, fuzzy clustering algorithm, Fuzzy C-Means, FCM algorithm, the node demand.

Введение

В процессе функционирования систем мобильной связи возникают резкие перегрузки в отдельных ее сегментах, обусловленные перемещением абонентов, что вызывает необходимость оперативного управления радиоресурсами. Так, в случае перегрузки сети в одной части зоны обслуживания могут быть задействованы ресурсы из менее загруженной ее части [1].

Для эффективного управления радиоресурсами системы сотовой связи необходимо позиционировать мобильные станции с точностью, позволяющей выявлять зоны аномального изменения concentra-

ции [2]. Функция позиционирования (местопределения) МС в сетях оператора сотовой связи является актуальной проблемой современной науки и может стать универсальным инструментом для решения целого ряда задач, напрямую не связанных с услугами связи [3].

Полученные в результате позиционирования массы абонентов представляют собой большие массивы. Обработать каждого абонента не представляется возможным. С точки зрения эффективного управления необходимо объединить всех абонентов в конгломерации, удобные для дальнейшего управления.

Постановка задачи

Известные алгоритмы кластеризации нечетких множеств требуют априорных сведений о системе, таких как количество кластеров, на которые необходимо разбить данное множество, экспоненциальный вес объектов множества, параметр остановки алгоритма и некоторые другие [4].

Для определения минимального количества кластеров, в рамках поиска узлов спроса, первоначально необходимо определить зоны аномального изменения нагрузки на сеть оператора связи, их количество и расположение.

Для статистической «фильтрации» абонентов с последующим объединением их в группы (кластеры) на основе территориальной конгломерации предлагается использовать алгоритм теории разладки. В пространственно-временной области в режиме реального времени данная теория представляется наиболее эффективной по следующим параметрам:

1. Инвариантность к статистическим свойствам нагрузки.
2. Инвариантность к способу и началу счета.
3. Небольшое число выборов, приводящих к ответу.
4. Простой алгоритм принятия решения [5].

Однако данный способ имеет ряд ограничений:

1. Для каждого случая необходимо выбирать, по какому критерию будет происходить перебор алгоритма разладки (фактическая плотность абонентов сети или плотность запросов ресурсов сети в единицу времени, или какой-либо другой параметр, имеющий существенное влияние на работу сети связи).
2. Сложный выбор порогового значения разладки, при котором модель будет выдавать менее робастную картину разбиения.
3. Разомкнутость кластеров аномальных зон.

Применительно к концепции управления радиоресурсами систем мобильной связи общая задача кластеризации сводится к определению границ (координат) кластеров, по сути, являющихся агрегированным источником сообщений, а также классификации трафика этих источников сообщений. При этом решение задачи кластеризации должно происходить в режиме реального времени по виду передаваемых сервисов. Алгоритм кластеризации на основе разладки помогает определить количество необходимых кластеров. После определения числа кластеров появляется возможность применения алгоритмов нечеткой кластеризации (на основе данных по количеству аномальных зон, равному количеству кластеров, на которые следует делить множества абонентов).

Таким образом, первостепенной задачей при поиске кластеров будет являться задача определения границ аномальных зон как во временной, так и в пространственной области.

В результате первичной обработки данных с помощью теории разладки появляются сведения о количестве кластеров, на которые необходимо и достаточно разбивать исходное множество абонентов. Алгоритм FCM (Fuzzy Classifier Means) представляет собой частный случай алгоритма нечеткой кластеризации Густафсона – Кесселя и является наиболее простой его реализацией [6]. В результате применения данного алгоритма могут быть получены однозначно-идентифицированные на карте местности узлы спроса.

Решение задачи

Алгоритм кластеризации на основе разладки можно свести к следующим шагам:

Шаг 1. Определение выборки местоположений $MC(x; y)$ в течение шага.

Шаг 2. Разбиение исследуемой области на подобласти с шагом, равным среднему значению ошибки позиционирования (наложение сетки).

Шаг 3. Определение границ разладки в выборке. Вычисляется функционал $T(S)$ по формулам:

$$T(S(N; M))_V = \frac{2S_1 - S_3 - S_2}{S_3 + S_2}, \quad (1)$$

$$T(S(N; M))_Y = \frac{2S_3 - S_1 - S_2}{S_1 + S_2}, \quad (2)$$

где $T(S(N; M))$ – значение функционала при возрастающей нагрузке, а $T(S(N; M))$ – значение функционала при убывающей нагрузке, при этом оба функционала существуют в $t = [t_\phi, t_\phi + \Delta t_d]$, где t_ϕ – фактическое время; Δt_d – дискрет времени, определяемый реальными условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = \frac{1}{(N-M)^2} \sum_{i=1}^{N-M} |\xi_i|, \\ S_2 = \frac{1}{M^2} \sum_{j=(N-M)+1}^N |\xi_j|, \\ S_3 = \frac{1}{(N-M)M} \sum_{i=1}^{N-M} \sum_{j=(N-M)+1}^M |\xi_i - \xi_j|, \end{array} \right. \quad (3)$$

где N и M связаны геометрически (рисунок 1), N – длина развертки функционала $T(S)$, $M \in [1, N]$; ξ – значение нагрузки на базовую станцию (БС) в данный момент времени.

Шаг 4. Объединение множеств значений $T(S)$ в один:

$$T_U = \left\{ \begin{array}{l} T(\text{с меньшими значениями}), \\ T(\text{с большими значениями}). \end{array} \right\} \quad (4)$$

Шаг 5. Определение соотношения:

$$|\mu| = \frac{|T_i|}{|T_j|} > \mu_{\text{пороговое}}, \quad (5)$$

где $\mu_{\text{пороговое}}$ находится из статистических данных.

Шаг 6. Выделение координат момента разладки:

$$(x; y) = \arg \{T_U(M(x; y), N(x_k; y_k) - M(x; y))\}. \quad (6)$$

Для решения задачи во времени достаточно рассмотреть суточную нагрузку на сектора антенны БС оператора сотовой связи. Подробно рассматривается в примере.

Количество аномальных зон, полученных в результате применения алгоритма на основе разладки, легко определяется. Эти выходные данные первого алгоритма становятся входными условиями работы для второго алгоритма FCM.

Алгоритм выделения узлов спроса на основе FCM можно свести к следующим шагам:

Шаг 1. Определение местоположения центроидов (точка, относительно которой идет перебор значений принадлежности к кластеру, не является центром кластера).

Шаг 2. Определение необходимого количества кластеров (из данных, полученных в результате применения разладки).

Шаг 3. Работа алгоритма. Минимизация суммы всех взвешенных расстояний $\|d_k - c_j\|$:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \|d_k - c_j\| \rightarrow \min, \quad (7)$$

где q – фиксированный параметр, задаваемый перед итерациями. Для исследуемого множества K входных векторов d_k и N выделяемых кластеров c_j предполагается, что любой d_k принадлежит любому c_j с принадлежностью μ_{jk} интервалу $[0, 1]$, где j – номер кластера; k – номер входного вектора; $\| \cdot \|$ – матричная норма (Евклидова норма); ε – заранее задаваемый уровень точности [7].

Принимаются во внимание следующие условия нормирования для μ_{jk} :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N \mu_{jk} &= 1, \forall k = 1, \dots, K \\ 0 < \sum_{k=1}^K \mu_{jk} &\leq K, \forall j = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (8)$$

Взвешенный центр гравитации выглядит следующим образом:

$$c_j = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{jk})^q \cdot d_k}{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q} \quad \text{и} \quad (9)$$

$$\mu_{jk} = \frac{1 / \|d_k - c_j\|^{1/(q-1)}}{\sum_{j=1}^N (1 / \|d_k - c_j\|^{1/(q-1)})}. \quad (10)$$

Шаг 4. Алгоритм FCM считается завершенным при выполнении следующего условия:

$$\|U^{(t+1)} - U^{(t)}\| \leq \varepsilon, \quad (11)$$

где $U^{(t)}$ и $U^{(t+1)}$ – матрицы принадлежности; ε – заранее задаваемый уровень точности.

Шаг 5. Определение центра масс полученных нечетких фигур в виде конечных координат $(x; y)$.

Данный алгоритм имеет ряд недостатков:

1. Нечеткая кластеризация подразумевает в своей основе работу по перебору одних и тех же данных из большого массива данных, что приводит к значительному увеличению времени обработки данных.

2. В случае большого количества исходных точек (моделируемое количество абонентов радиосети) вычислительные мощности обычных ЭВМ не справляются с поставленной задачей.

3. Алгоритм не дает четкого представления о границах раздела кластеров, так как пограничные абоненты могут относиться сразу к нескольким кластерам.

Пример. Подразумевается, что координаты каждой из десяти точек плоскости (абонентов сети) нам известны априори.

Как видно из рисунков 1 и 2, в случае резкого увеличения плотности абонентов сети на единице площади, алгоритм корректно выделяет ту ячейку, где произошла «разладка».

Моделирование данной задачи происходило в программе C+. Точки и начальные центры кластеров берутся случайным образом на поле размером 500 на 500 условных единиц длины. Максимальное количество итераций, заложенное в программу, равно 300. Погрешность расчетов 10^{-5} .

Для представления временной разладки были взяты данные по БС оператора сотовой связи в городе Уфе (рисунок 3).

Из табличных данных, полученных встроенными средствами программного обеспечения БС, можно составить графики распределения нагрузки в течение суток на указанных секторах (направлениях).

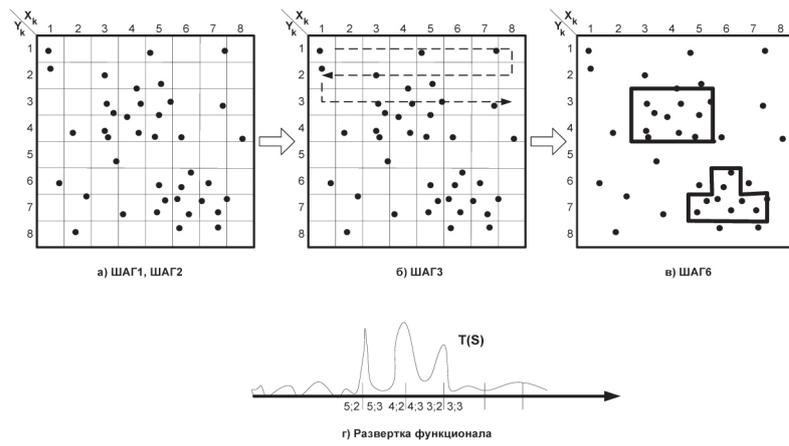


Рис. 1. Алгоритм кластеризации на основе разладки

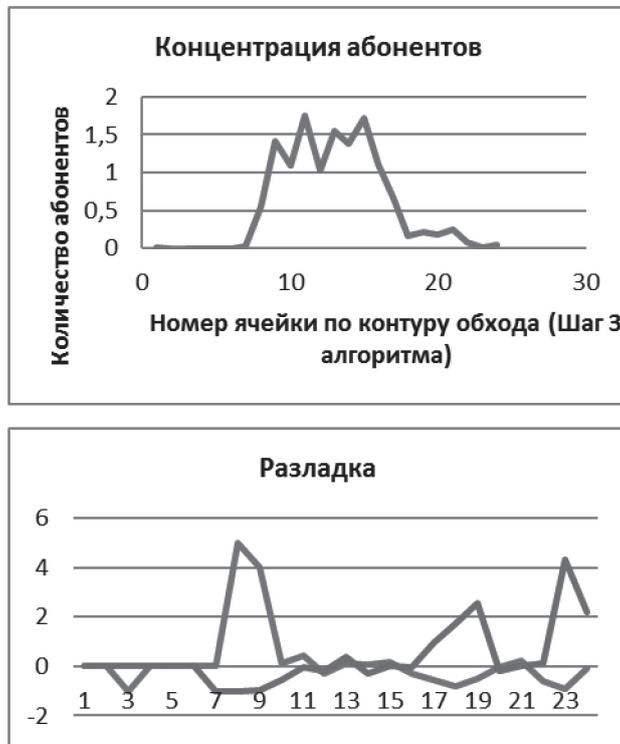


Рис. 2. Функция разладки при повышении и понижении нагрузки



Рис. 3. Расположение секторов антенны БС сотового оператора

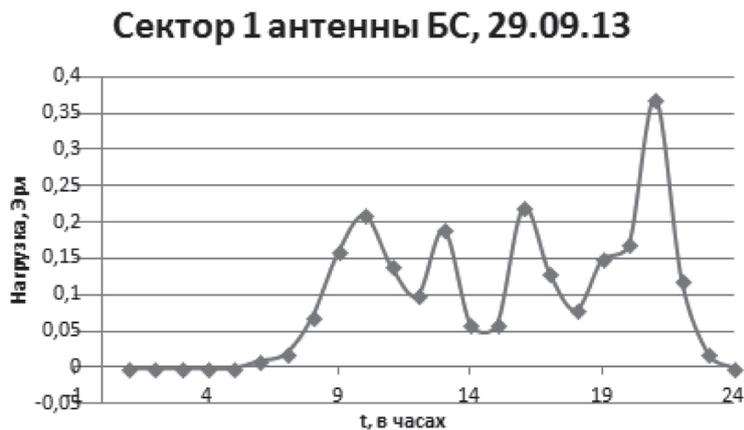


Рис. 4. Суточная нагрузка на 1 сектор антенны БС сотового оператора

Как видно из рисунка 4, разладка во временном сегменте изучения вопроса определяется визуально, без привлечения дополнительных систем и комплексов. Однако для автоматизации процесса определения момента разладки применяются формулы 1, 2 и 3 данной статьи.

На рисунке 1 приведен пример действия алго-

ритма на основе теории разладки на малое количество точек с выделением двух аномальных зон. Для FCM-кластеризации задается на том же множестве точек количество кластеров, равное двум. Результат совместного использования двух алгоритмов представлен на рисунке 5.

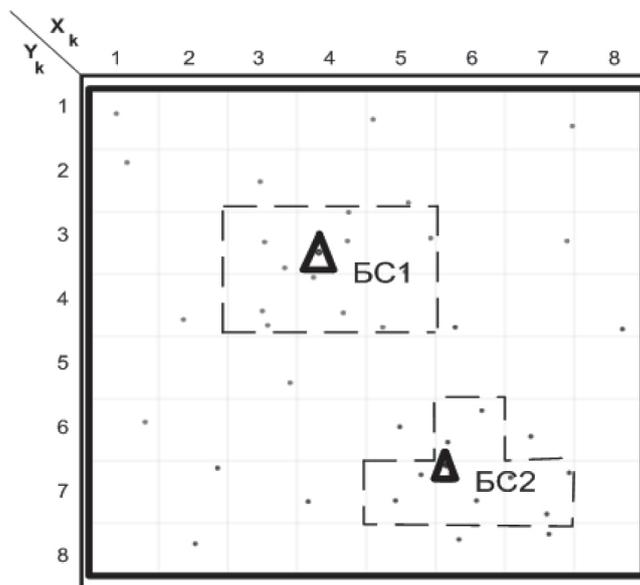


Рис. 5. Симбиоз работы алгоритмов разладки и нечеткой кластеризации

Как видно из рисунка 5, результат работы алгоритма определения аномальных зон концентрации абонентов на основе разладки и алгоритма FCM-кластеризации дал практически полностью совпадающие результаты, а узлы спроса, в которых рекомендуется располагать базовые станции оператора сотовой связи, попадают в выделяемые зоны.

Таким образом, из конечного множества або-

нентов сети сотового оператора были выделены кластеры, внутри которых были выделены центры масс. Эти центры масс полученных кластеров (фигур) дают знание о точке наиболее высокой абонентской нагрузки в сети оператора связи, являющиеся узлами спроса.

Список литературы

1. Султанов А.Х. Об одном методе прогноза оптимальной зоны радиопокрытия сети мобильной связи [Текст] / А.Х. Султанов, И.В. Кузнецов, А.Э. Камалов // Вестник УГАТУ. – 2010. – С. 62–67.
2. Зотов К.Н. Разработка алгоритма повышения точности позиционирования мобильных станций на основе расчета статических параметров электромагнитного поля в неоднородной среде [Текст] / К.Н. Зотов // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – № 2(55). – С. 14–19.
3. Воробьев Н.П. Использование компьютерного моделирования для оценки электромагнитных загрязнений [Текст] / Н.П. Воробьев, А.А. Сошников, Е.В. Титов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 31–33.
4. Зотов К.Н. Повышение эффективности систем сотовой связи на основе релевантной кластеризации местоположения мобильной связи: Автореф. дис. ...канд. техн. наук [Текст] / К.Н. Зотов. – Уфа, 2014. – С. 16.
5. Бродский Б.Е. Алгоритм апостериорного обнаружения многократных разладок случайной последовательности [Текст] / Б.Е. Бродский, Б.С. Дарховский. – М.: ЦНИИКА, 1993. – С. 60–72.
6. Gustafson D.E. Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix [Text] / D.E. Gustafson, W.C. Kessel. – Scientific Systems, Inc. 186 Alewife Brook Parkway Cambridge, Massachusetts, 1978. – P. 761–766.
7. Вятчинин Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации [Текст] / Д.А. Вятчинин. – Минск: Технопринт, 2004. – 219 с.

References

1. Sultanov A.H. Ob odnom metode prognoza optimal'noj zony radiopokrytija seti mobil'noj svyazi [Tekst] / A.H. Sultanov, I.V. Kuznecov, A.Je. Kamalov // Vestnik UGATU. – 2010. – S. 62–67.
2. Zotov K.N. Razrabotka algoritma povyshenija tochnosti pozicionirovanija mobil'nyh stancij na osnove rascheta staticheskikh parametrov jelektromagnitnogo polja v neodnorodnoj srede [Tekst] / K.N. Zotov // Vestnik UGATU. – 2013. – T. 17. – № 2(55). – S. 14–19.
3. Vorob'ev N.P. Ispol'zovanie komp'juternogo modelirovanija dlja ocenki jelektromagnitnyh zagryaznenij [Tekst] / N.P. Vorob'ev, A.A. Soshnikov, E.V. Titov // Polzunovskij vestnik. – 2009. – № 4. – S. 31–33.
4. Zotov K.N. Povyszenie jeffektivnosti sistem sotovoj svyazi na osnove relevantnoj klasterizacii mestopolozhenija mobil'noj svyazi: Avtoref. dis. ...kand. tehn. nauk [Tekst] / K.N. Zotov. – Ufa, 2014. – S. 16.
5. Brodskij B.E. Algoritm aposteriornogo obnaruzhenija mnogokratnyh razladok sluchajnoj posledovatel'nosti [Tekst] / B.E. Brodskij, B.S. Darhovskij. – M.: Cniika, 1993. – S. 60–72.
6. Gustafson D.E. Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix [Text] / D.E. Gustafson, W.C. Kessel. – Scientific Systems, Inc. 186 Alewife Brook Parkway Cambridge, Massachusetts, 1978. – P. 761–766.
7. Vjatchenin D.A. Nechjotkie metody avtomaticheskoj klassifikacii [Tekst] / D.A. Vjatchenin. – Minsk: Tehnoprnt, 2004. – 219 s.

МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES



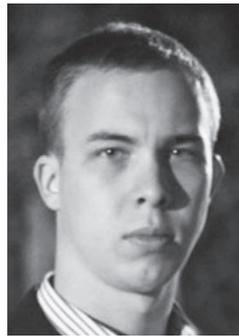
Ураксеев М.А.
Urakseev M.A.

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



Левина Т.М.
Levina T.M.

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Общенаучные дисциплины» филиала ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г. Салават



Шамаев Ф.Ф.
Shamaev F.F.

магистрант, филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г. Салават



Кулябин А.С.
Kuliabin A.S.

студент, филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г. Салават

УДК 321.3.08

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ УЧЕТА, МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В СУБД С WEB-ИНТЕРФЕЙСОМ

В статье рассматриваются волоконно-оптические системы на эффекте Фарадея. Данные системы лишены недостатков традиционных (электромагнитных) измерительных систем. Они могут своевременно проводить прогнозирование работы высоковольтного оборудования для предотвращения возможных аварий и сбоев в работе оборудования на предприятиях нефтегазового комплекса. Эффект Фарадея, используемый в чувствительном элементе системы, заключается в том, что при прохождении линейно поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света, зависящее от величины напряженности магнитного поля. Волоконно-оптические измерительные системы могут быть построены по принципу интеллектуальной системы, путем добавления нейронного датчика в структурную схему. Нейронный датчик обрабатывает данные по количеству полученной потребителем электроэнергии, для дальнейшего регулирования электроэнергии, отдаваемой поставщиком. Использование нейронных датчиков в волоконно-оптических системах создает потребность в формировании системы управления базами данных (СУБД) с web-интерфейсом. При проектировании СУБД с web-интерфейсом для волоконно-

оптических систем учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования были поставлены следующие задачи: обеспечить обработку, хранение и выдачу информации о контролируемом оборудовании на предприятии; улучшить контроль качества и управление над производством продукции; определять техническое состояние оборудования, предупреждать аварии, повышать эффективность ремонтов и уменьшать число необоснованных планово-предупредительных ремонтов оборудования на предприятии. В статье рассмотрено программное обеспечение для реализации СУБД, такое как: PHPMyAdmin (клиент, позволяющий редактировать базу данных напрямую), Apache (виртуальный сервер), MySQL (система для создания и хранения базы данных на сервере), Django (Фреймворк для описания базы данных, подключения к интерфейсу и другим сервисам). СУБД позволит производить учет, мониторинг и прогнозировать ресурс работы высоковольтного оборудования. В дальнейшей перспективе волоконно-оптические системы могут взаимодействовать с технологией SmartGrid.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система, эффект Фарадея, интеллектуальная система, нейронный датчик, база данных, система управления базами данных, web-интерфейс, PHPMyAdmin, MySQL, Apache, Django, SmartGrid.

DEVELOPMENT OF FIBER-OPTIC SYSTEMS FOR RECORDING, MONITORING AND FORCAST OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT OPERATION IN DBMS WITH WEB-INTERFACE

The article deals with the fiber-optic system on the Faraday effect. These systems do not have the drawbacks of traditional (electromagnetic) measuring systems. They can work in a timely manner to carry out forecasting of high voltage equipment to prevent possible accidents and malfunctions of equipment for oil and gas companies. Faraday effect is used in the sensor system is that when a linearly polarized light through an optically inactive substance in a magnetic field, there is a rotation of the plane of polarization of light, depending on the magnitude of the magnetic field strength fiber-optical measuring system can be built on the principle of intelligent system by adding a sensor into the structural neuronal circuitry. Neural processes sensor data on the number of electricity produced by the consumer, to further regulate the electricity supplier given up. Using neural sensors in optical fiber systems create the need for the creation of a database management system (DBMS) with a web-interface. When designing a database with a web-interface for optical fiber systems of accounting, monitoring and forecasting of high-voltage equipment, were as follows: to provide handling, storage and delivery of information on the controlled equipment in the enterprise; improve quality control and management of the production of products; determine the technical condition of the equipment, to prevent accidents, improve the efficiency of repairs and reduce the number of unfounded planned - preventive maintenance of equipment at the facility. The article deals with the software to implement the database, such as: PHPMyAdmin (client to edit the database directly), Apache (virtual server), MySQL (the system to create and store the database on the server), Django (The framework for the description of the database, connection to the interface and other services). DBMS will produce accounting, monitoring and operation of high-voltage prognozirovatresurs oborudovaniya. In the longer term fiber-optic system can interact with SmartGrid technology

Key words: Fiber-optic system, Faraday Effect, intelligent system, neural sensor, database, data base management system, web-interface, PHPMyAdmin, MySQL, Apache, Django, SmartGrid.

Для предотвращения возможных аварий и сбоев в работе оборудования на предприятиях нефтегазового комплекса необходимо своевременно проводить прогнозирование работы высоковольтного оборудования.

В последние годы появился новый вид измерительных систем, основанный на волоконно-оптическом методе измерения. Волоконно-оптические системы лишены недостатков традиционных (электромагнитных) измерительных систем, а именно: явлений насыщения, гистерезиса, резонан-

са, остаточного намагничивания. Вместе с тем обладают высокой надежностью функционирования, быстродействием, чувствительностью и малыми габаритами [1–3].

Принцип действия волоконно-оптических систем основан на магнитооптическом эффекте Фарадея, который заключается в том, что при прохождении линейно поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света, зависящее от величины напря-

женности магнитного поля [4].

Волоконно-оптические измерительные системы могут быть построены по принципу интеллектуальной системы. Для этого в структурную схему волоконно-оптической системы необходимо добавить нейронный датчик, который будет обрабатывать данные по количеству полученной потребителем электроэнергии, для дальнейшего регулирования электроэнергии, отдаваемой поставщиком.

Поставленная задача решается тем, что структурная схема (рисунок 1) содержит нейронный датчик и управляющее устройство. Нейронный датчик обрабатывает полученные данные тока с аналого-цифрового преобразователя, после чего данные поступают в управляющее устройство, которое осуществляет регулирование тока, все данные отображаются на жидкокристаллическом индикаторе.

Устройство работает следующим образом. При протекании электрического тока I по проводнику 5 создается контролируемое магнитное поле напряженностью H . Это поле воздействует на элемент Фарадея (скрученное оптическое волокно) 4. Создаваемое лазерным диодом 1 когерентное монохро-

матическое излучение J_1 проходит по соединительному волокну 2, далее попадает в поляризатор 3, где поляризуется в линейно поляризованную световую волну J_2 . В элементе Фарадея 4 под действием внешнего магнитного поля происходит вращение плоскости поляризации света, распространяющегося вдоль направления магнитного поля. Световой поток J_3 с выхода элемента Фарадея проходит через анализатор 6 и попадает на фотодиод 7, затем на измерительный блок 8, который состоит из усилителя, далее происходит преобразование сигнала в аналого-цифровом преобразователе 9 в цифровой код. Полученные значения контролируемого магнитного поля попадают в нейронный датчик 10, где происходит взаимодействие анализатора данных реального времени 11, среды интеллектуальной измерительной системы 12, интеллектуального преобразователя 13, человеко-машинного интерфейса 14, управления (реагирующая часть) 15. После обработки данных управляющее устройство 16 выполняет действия по регулированию протекающего тока по проводнику 5. На жидкокристаллическом индикаторе 17 получаем значение контролируемого магнитного поля [5].

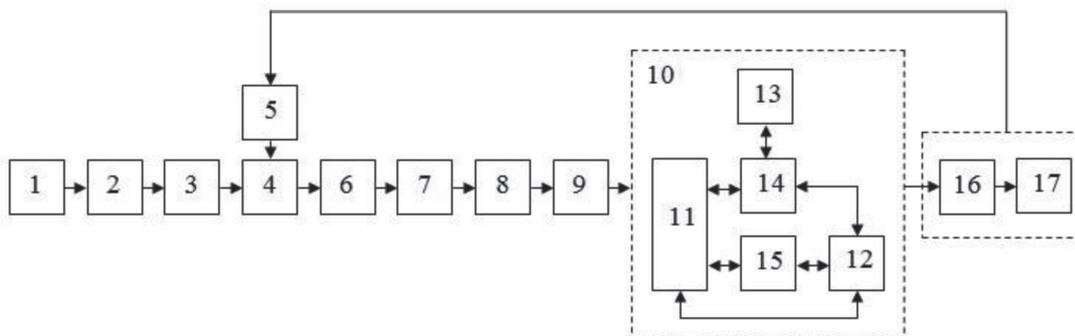


Рис. 1. Структурная схема интеллектуально-измерительной системы на эффекте Фарадея

Использование нейронных датчиков в волоконно-оптических системах для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования создает потребность в формировании системы управления базами данных (СУБД) с web-интерфейсом.

При проектировании СУБД с web-интерфейсом для волоконно-оптических систем учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования были поставлены следующие задачи:

- обеспечить обработку, хранение и выдачу информации о контролируемом оборудовании на предприятии;

- улучшить контроль качества и управление над производством продукции;

- определять техническое состояние оборудования, предупреждать аварии, повышать эффективность ремонтов и уменьшать число необоснованных планово-предупредительных ремонтов оборудования на предприятии.

В таблице (см. стр. 100) приведен список необходимого программного обеспечения и выполняемые функции для реализации СУБД с web-интерфейсом в волоконно-оптических системах для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования.

Функции программного обеспечения

Название	Функция
PHPMuAdmin	Клиент. Позволяет редактировать базу данных напрямую
Midnight Commander	Позволяет управлять и редактировать файлы
Apache	Виртуальный сервер
MySQL	Система для создания и хранения базы данных на сервере
Django	Задачей Фреймворка является описание базы данных, подключение к интерфейсу и другим сервисам

Для работы с базой данных необходим клиент. К примеру, PHPMuAdmin – веб-приложение с открытым кодом, написанное на языке PHP и представляющее собой веб-интерфейс для администрирования СУБД MySQL. PHPMuAdmin позволяет через браузер осуществлять администрирование сервера MySQL, запускать команды SQL и просматривать содержимое таблиц и баз данных. Приложение пользуется большой популярностью у веб-разработчиков, так как позволяет управлять СУБД MySQL без непосредственного ввода SQL команд, предоставляя дружелюбный интерфейс. На сегодняшний день PHPMuAdmin широко применяется на практике. Последнее связано с тем, что разработчики интенсивно развивают свой продукт, учитывая все нововведения СУБД MySQL. Подавляющее большинство российских провайдеров используют это приложение в качестве панели управления для того, чтобы предоставить своим клиентам возможность администрирования выделенных им баз данных.

Для написания структуры и «подвязки» к базе интерфейса можно использовать различные инструменты: Denwer (Денвер) – набор дистрибутивов (Apache, PHP, MySQL, Perl и т. д.) + программная оболочка, которая использует этот набор для отладки сайтов на «домашней» (локальной) Windows-машине без необходимости выхода в Интернет, Adobe Photoshop CS2 – профессиональный графический пакет для работы с растровой графикой. Он понадобится для графического оформления web-проектов и создания привлекательного дизайна. Web-сервер Apache 2.2.8 (альтернатива Internet Information Services, или сокращенно IIS, который интегрирован в операционную систему Windows)

– это сервер, принимающий HTTP-запросы от клиентов, обычно web-браузеров, и выдающий им HTTP-ответы, обычно вместе с HTML-страницей, изображением, файлом, медиапоток или другими данными. По сути, web-сервер – это программное обеспечение, выполняющее функции web-сервера, как и компьютер, на котором это программное обеспечение работает.

База адаптирована для использования на сервере компании, поэтому первым делом создается виртуальная машина с операционной системой.

В работе базы данных будет осуществляться большое количество запросов, и нужна операционная система с большими возможностями в области связи. Debian является одной из модификаций Linux. Она хорошо проработана со стороны информационных сетей. Также система есть в свободном доступе с постоянной поддержкой разработчиков. Unix-системы менее подвержены вирусам и вредоносным программам за счет хорошей проработки уязвимостей системы. Данная система ставится на сервер. Для разработки проекта можно использовать любую другую машину. Это удобно со стороны мобильности и безопасности сервера в процессе разработки. Когда проект будет готов, его можно будет перенести на серверную систему. Debian занимает примерно 2 Гб свободного места на жестком диске. Это небольшой объем для операционной системы.

Разработанная волоконно-оптическая система для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования в СУБД с web-интерфейсом содержит несколько таблиц, связанных между собой (рисунок 2).

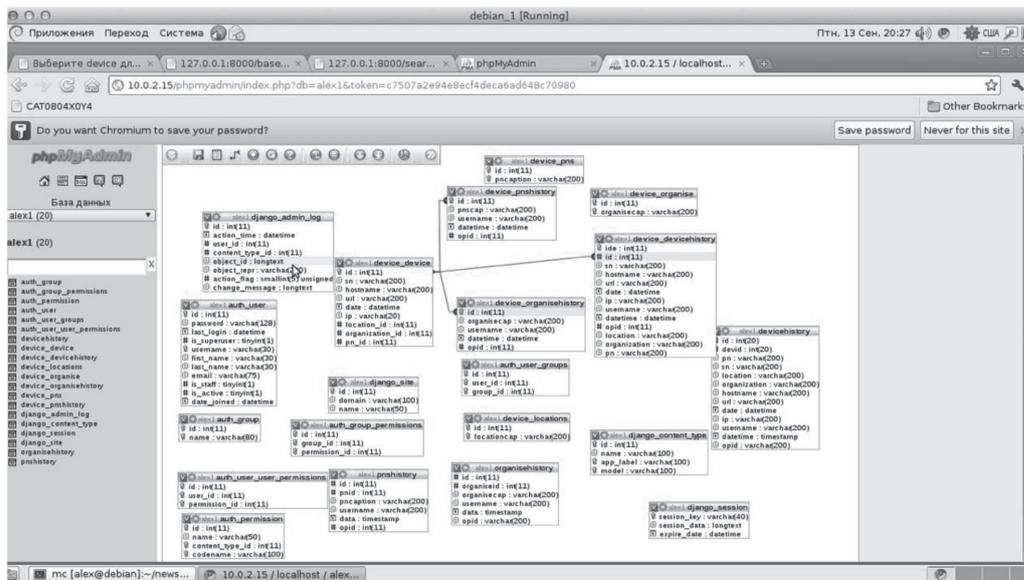


Рис. 2. Структура СУБД в РНРМуAdmin

Для построения структуры использован Фреймворк Django. Это позволяет описать базу данных до мелочей и получить именно такую систему, какой представляет ее себе разработчик. Система

не имеет интерфейса, вся работа осуществляется через консоль. После того как структура прописана в проекте, ее можно запустить на виртуальном сервере (рисунок 3).

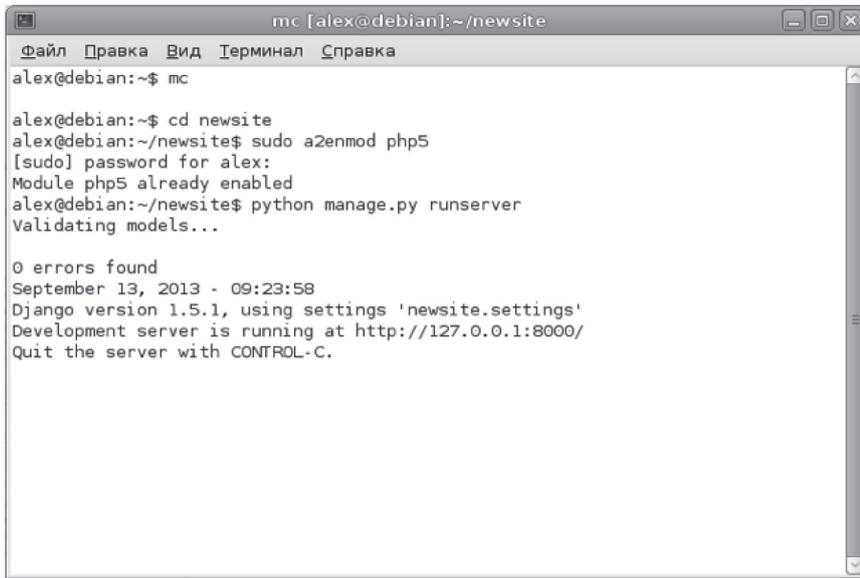


Рис. 3. Программа запуска на виртуальном сервере

Для этого использовался Apache. Он создает на машине виртуальный сервер, к которому можно обратиться через браузер. Django также может создать интерфейс для администратора сайта, где задаются права пользователей, редактируется информация, осуществляется выборка.

Одной из особенностей созданной базы должен был стать учет изменений в базе. Для этого были разработаны таблицы со значениями имени пользователя, даты изменяемых данных и host, с которого

был выполнен вход. Запись в эти таблицы осуществляется автоматически при помощи триггеров. Они прописаны в базе MySQL. Это позволяет полностью отслеживать все изменения в таблице.

Немаловажной частью является интерфейс базы. С помощью фреймворка можно создавать представления для html-страниц. Все запросы поступают в базу через запросы на странице. Это может быть поиск, выборка или просто переход на другую страницу. Это становится возможным бла-

годаря виртуальному серверу. Мы можем задать ссылки на страницы, и сервер обработает их в нашей системе.

Разработанная база данных с web-интерфейсом даст большие преимущества перед текущим методом диагностирования [6].

В дальнейшем на базе разработанных волоконно-оптических систем для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования с web-интерфейсом возможны создания цифровых подстанций, которые являются частью новой технологии SmartGrid, которую на русский язык можно перевести как «интеллектуальная электроэнергетическая система». SmartGrid – это название глобальной технологии развития электроэнергетической системы [7].

Список литературы

1. Ураксеев М.А. Волоконно-оптические датчики магнитного поля и электрического тока [Текст] / М.А. Ураксеев, Т.М. Левина // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 9. – С. 42–45.
2. Ураксеев М.А. Волоконно-оптические датчики электрического тока и магнитного поля как средства повышения уровня безопасности, объектов нефтегазового комплекса [Текст] / М.А. Ураксеев, Т.М. Левина // Экологические системы и приборы. – 2008. – № 3. – С. 8–12.
3. Ураксеев М.А. Оптоволоконные трансформаторы как элемент современных электротехнических комплексов и систем [Текст] / М.А. Ураксеев, Т.М. Левина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – № 2. – Т. 9. – 2013. – С. 23–29.
4. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики [Текст] / Т. Окоси, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Хататэ; Под ред. Т. Окоси: Пер. с яп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1991. – 255 с.
5. Пат. № 136190 Российская Федерация G01R15/24 Интеллектуальный преобразователь магнитного поля и электрического тока [Текст] / Ф.Ф. Шамаев, Т.М. Левина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2013134844/28. – Заявл. 23.07.2013. – Оpubl. 27.12.2013.
6. Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2014615381 Информационная система учета оборудования предприятий [Текст] / Н.Н. Лунева, Т.М. Левина, К.В. Галиуллина; правообладатель ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2014612693. – Заявл. 27.03.2014. – Оpubl. 20.06.2014.
7. Levina T.M. Methods of controlling spark and explosion-proof sensors on the CDU / T.M. Levina, Y. Zharinov // Abstracts collection on new challenges in the European area. – Baku, 2013. – P. 53–55.

References

1. Urakseev M.A. Volokonno-opticheskie datchiki magnitnogo polja i jelektricheskogo toka [Tekst] / M.A. Urakseev, T.M. Levina // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2007. – № 9. – S. 42–45.
2. Urakseev M.A. Volokonno-opticheskie datchiki jelektricheskogo toka i magnitnogo polja kak sredstva povyshenija urovnja bezopasnosti, ob#ektov neftegazovogo kompleksa [Tekst] / M.A. Urakseev, T.M. Levina // Jekologicheskie sistemy i pribory – 2008. – № 3. – S. 8–12.
3. Urakseev M.A. Optovolokonnye transformatory kak jelement sovremennyh jelektrotehnicheskikh kompleksov i sistem [Tekst] / M.A. Urakseev, T.M. Levina // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – № 2. – T. 9. – 2013. – S. 23–29.
4. Okosi T. Volokonno-opticheskie datchiki [Tekst] / T. Okosi, M. Ocu, H. Nisihara, K. Hatatje; Pod red. T. Okosi: Per. s jap. – L.: Jenergoatomizdat. Lenigr. otd., 1991. – 255 s.
5. Pat. № 136190 Rossijskaja Federacija G01R15/24 Intellektual'nyj preobrazovatel' magnitnogo polja i jelektricheskogo toka [Tekst] / F.F. Shamaev, T.M. Levina; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Ufimskij gosudarstvennyj neftjanoy tehnikeskij universitet». – № 2013134844/28. – Zajavl. 23.07.2013. – Opubl. 27.12.2013.
6. Svidetel'stvo o registracii programm dlja JeVM № 2014615381 Informacionnaja sistema ucheta oborudovanija predpriyatij [Tekst] / N.N. Luneva, T.M. Levina, K.V. Galiullina; pravoobladatel' FGBOU VPO «Ufimskij gosudarstvennyj neftjanoy tehnikeskij universitet». – № 2014612693. – Zajavl. 27.03.2014. – opubl. 20.06.2014.
7. Levina T.M. Methods of controlling spark and explosion-proof sensors on the CDU / T.M. Levina, Y. Zharinov // Abstracts collection on new challenges in the European area. – Baku, 2013. – P. 53–55.



Федосов В.А.
Fedosov V.A.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Машины, аппараты, приборы
и технологии сервиса» ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный университет экономики
и сервиса», Россия, г. Уфа*



Августинович А.В.
Avgustinovich A.V.

*магистрант кафедры «Промышленная безопас-
ность и охрана труда» ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет», Россия, г. Уфа*

УДК 666.013.8

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

В связи с возросшим уровнем современных технологий актуальной проблемой на сегодняшний день остается непрерывный контроль за многими параметрами технологического процесса и контроль состояния оборудования. Наиболее важными являются параметры механического движения, в частности, параметры периодических перемещений исследуемого объекта в пространстве (вибрации).

Для обеспечения требований и норм по охране труда обязательным условием на производстве остается на сегодняшний день измерение локальной вибрации и внесение ее показателей в соответствующий протокол. Это исследование сможет позволить разработать меры по предотвращению вредного воздействия вибрации на состояние здоровья человека и минимизировать риск развития вибрационной болезни у работающих.

Постоянный и непрерывный контроль допустимых уровней вибрации может осуществляться только с помощью высокоточных вибродатчиков.

В данной работе были рассмотрены устройства для контроля уровня вибрации. Датчик, измеряющий уровень вибрации контактным методом, содержит пьезоэлектрический акселерометр, детектор, усилитель, блок формирования дискретных опорных уровней, пороговый элемент сравнения, исполнительное реле, индикатор. С помощью данного устройства повышается точность за счет увеличения чувствительности, а также обеспечивается надежность работы.

Использование усилителя-интегратора в устройстве позволяет достаточно сильно повысить помехозащищенность устройства, в связи с тем что уровень его выходного сигнала на несколько порядков выше уровня возможных случайных помех.

Снабжение устройства блоком формирования дискретных опорных уровней с заранее заданными величинами, значения которых определяются типом контролируемого оборудования, позволяет в значительной степени сократить затраты на его обслуживание, так как устройство работает в режиме индикатора и фиксирует превышение заранее заданных уровней вибрации.

Кроме этого, устройство снабжается блоком акустического прослушивания, позволяющим не только фиксировать аварийную ситуацию персоналу, находящемуся вне зоны контролируемого агрегата, а также более правильно определять предаварийную ситуацию.

С помощью рассмотренных в работе устройств решается наиболее важная задача на производстве – повышение надежности автоматической защиты, уровня контроля, помехозащищенности устройства, экономичности за счет неэкранированной линии связи, а также снижение трудозатрат при его обслуживании.

Ключевые слова: охрана труда, профессиональные заболевания, работающий, вибрация, условия труда, устройство контроля, вредные факторы, безопасность на производстве, вредное влияние, эффект.

VIBRO-ACOUSTIC TECHNIQUE FOR MEASURING THE VIBRATION LEVEL AT THE ENTERPRISES

Due to the increased level of modern technology, the actual problem today remains continuous monitoring of many parameters of the technological process and equipment condition monitoring. The most important are the parameters of a mechanical movement, in particular the parameters of the periodic movements of the examined object in space (vibration).

To ensure requirements and regulations on labor protection an integral part of the production is by far the measurement of the local vibration and its inclusion of indicators in the appropriate protocol. This study will allow to develop measures to prevent the harmful effects of vibration on human health and minimize the risk of vibration disease in workers.

Constant and continuous monitoring of the permissible vibration levels can only be carried out using high-precision vibration.

In the present work, we have considered the device to control the level of vibration. A sensor for measuring the vibration of the contact method, contains a piezoelectric accelerometer, detector, amplifier, block the formation of discrete reference levels, the threshold element of comparison, the output relay, indicator. Using this device increases the accuracy by increasing the sensitivity and ensures reliable operation.

The use of the amplifier-integrator in the device is sufficient to greatly improve the noise immunity of the device, due to the fact that the level of its output signal by several orders of magnitude above the level of possible random noise.

Supply device block the formation of discrete reference levels with predetermined quantities, whose values are determined by the type of controlled equipment, greatly reduce the cost of maintenance, as the device operates in a mode indicator, and record the excess of the predetermined vibration levels.

In addition, the device is supplied with a block of acoustic listening, allowing not only to fix the emergency personnel outside the zone of the controlled unit, and more correctly identify the pre-emergency situation.

With the help of considered devices solved the most important problem in the production - improving the reliability of automatic protection, level control, noise immunity of the device efficiency due to the unshielded lines of communication and reduce labor costs when maintenance is required.

Key words: labor protection, occupational diseases, working, vibration, working conditions, device control, harmful production factors, safety in the manufacture, harmful effect, effect.

Внедрение нового и модернизация существующего оборудования, увеличение производительности труда и рост мощности и быстроходности машин и механизмов зачастую сопровождается ухудшением условий труда на производстве – значительным повышением уровня вибрации и шума на рабочих местах [1].

Вибрация, являясь общебиологическим раздражителем, существенно влияет на все системы организма человека, вызывая при этом преждевременное утомление у работающих. В результате этого снижается работоспособность и производительность труда, а при длительном воздействии вибрации на человека развивается тяжелое профессиональное заболевание – вибрационная болезнь. Подробная классификация вредного влияния вибрации приведена на рисунке 1 (см. стр. 106).

В связи с вредным влиянием вибрации на ор-

ганизм человека необходимо придавать особое значение вопросам борьбы с вибрацией на производстве [2].

Но для того, чтобы начать бороться с вибрацией на производстве, вначале необходимо ее измерить. Согласно ГОСТ 12.1.012-2004 «Вибрационная безопасность» контроль вибрации должен осуществляться на рабочих местах в процессе производства для оценки вибрационной безопасности труда [3].

Для оптимизации проведения специальной оценки условий труда и получения более достоверных ее результатов в данной работе рассматривается устройство, относящееся к виброизмерительной технике, которое позволяет контролировать уровень вибрации вращающихся механизмов, работающих в агрессивных условиях окружающей среды.

Устройство работает в режиме индикатора, фиксируя превышение заранее заданных уровней

вибрации по трем пределам: «норма», «опасно», «авария». При этом аварийный уровень задается уже при монтаже устройства в пределах «п» значений. Это позволяет значительно уменьшить трудозатраты на обслуживание устройства и не требует обязательной ежегодной поверки. Структурная схема устройства для контроля уровня вибрации на производстве представлена на рисунке 2 (см. стр. 107).

Данное техническое устройство относится к области контроля параметров условий труда на производстве и расширяет возможности экспертизы условий труда при проведении специальной оценки условий труда.

Устройство для контроля уровня вибрации агрегатов включает датчик вибрации 1, состоящий из пьезоэлектрического акселерометра 2 и последовательно соединенного с ним усилителя-интегратора 3. Применяемый в рассматриваемом устройстве датчик вибрации позволяет измерять уровень вибрации контактным методом. Схема датчика вибрации представлена на рисунке 3 (см. стр. 107).

Как видно из названия, в основу работы данного типа прибора положен пьезоэффект – явление возникновения разности потенциалов на пьезокристалле при его механической деформации. При этом выход датчика вибрации 1 соединен с одним входом масштабного усилителя 4 контролирующего блока 23 и последовательно через детектор 5 – с параллельно установленными компараторами 6, 7, 8, выходы которых соединены с входами соответствующих световых индикаторов уровней вибрации 9, 10, 11, а также с блоком звуковой сигнализации 12 и исполнительным реле 13, включенным параллельно с индикатором уровня «авария» 9.

Устройство снабжено блоком задержки 14, вход которого подключен к выходу компаратора уровня «авария» 6, а выход – к индикатору уровня «авария» 9, и параллельно установленным блоку звуковой сигнализации 12 и исполнительному реле 13 через блок задержки 14.

Выход детектора 5 соединен с блоком формирования токового выхода 15 и параллельно с ним через ключ 1 логарифмическим индикатором 17 текущего значения уровня вибрации.

Блок формирования дискретных опорных уровней (блок уставок аварийного уровня) 18 соединен с входом масштабного усилителя, второй выход которого через выключатель 16 соединен с блоком обработки сигнала 19, к выходу которого подключено устройство акустического прослушивания 20.

Датчик вибрации соединен с контролирующим

блоком двухпроводной линией 21 [4].

Работает данное устройство контроля уровня вибрации агрегатов следующим образом. Датчик вибрации 1 устанавливается на контролируемый объект, механические колебания с которого поступают на пьезоэлектрический акселерометр 2, где преобразуются в электрический сигнал, который усиливается, интегрируется, величина которого на выходе датчика пропорциональна величине виброскорости и выше уровня возможных случайных помех. Это объясняется тем, что выходное сопротивление датчика приближается к нулю, что значительно повышает помехозащищенность и позволяет выполнить линию связи 21 между датчиком вибрации 1 и контролирующим блоком 23 неэкранированной и длиной до тысячи метров.

Затем сигнал поступает на вход масштабного усилителя 4, на другой вход которого с выхода блока формирования дискретных опорных уровней 18 подается сигнал «п» фиксированных уставок через переключатели, соответствующие ГОСТу или удовлетворяющие требованиям заказчика. С выхода масштабного усилителя 4 через детектор 5 сигнал подается на входы компараторов 6, 7, 8, где фиксируется превышение уровня уставки по трем уровням: «норма», «опасно», «авария» соответственно, а затем подается на входы световых индикаторов 9, 10, 11. При этом компараторы 7 и 8 работают в режиме реального времени, а вход индикатора 9, а также входы параллельно установленных исполнительного реле 13 и блока звуковой сигнализации 12 подключены к выходу компаратора уровня «авария» 6 через блок задержки 14, имеющий специфическую (пилообразную) характеристику и служащий для дополнительного предупреждения ложного срабатывания устройства. Это объясняется тем, что блок задержки суммирует по времени уровень вибрации и не допускает срабатывания исполнительного реле 13 от случайных факторов. В случае действительно аварийного состояния блок задержки 14 выдает сигнал на индикатор 9 уровня «авария», исполнительное реле 13 и блок звуковой сигнализации 12 с обеспечением аварийного отключения контролируемого механизма в течение нескольких секунд.

Блок 15 работает в режиме текущего времени и обеспечивает формирование токового выхода на вторичный контролирующий прибор. Логарифмический индикатор 17, показывающий все текущие значения вибрации, при необходимости включается второй группой переключателей 16 и позволяет без переключения диапазона проконтролировать текущее значение уровня вибрации в пределах между уставками компараторов 6, 7, 8 по виброскорости,

что позволяет повысить достоверность определения действительного вибрационного состояния контролируемого объекта.

Со второго входа масштабного усилителя 4 при включении первой группы переключателей 16 сигнал поступает на блок обработки сигнала 19 и далее на устройство 20 акустического прослушивания. В качестве устройства акустического прослушивания может быть использован, например, головной телефон.

Так как слуховой орган человека более чувствителен к различным оттенкам звука, то это позволяет значительно повысить достоверность контроля.

Датчик вибрации устанавливается дистанционно благодаря значительно удлиненной линии связи 21, что позволяет использовать датчик в агрессивных условиях окружающей среды, где затруднен контроль с помощью переносных приборов.

Помимо рассматриваемого датчика вибрации для целей оценки условий труда также могут применяться датчики, принцип измерения которых основан на бесконтактных методах измерения вибрации. Обычно зондирование объекта осуществляется звуковыми и электромагнитными волнами. Принципиальная схема оптического датчика представлена на рисунке 4 (см. на стр. 107).

В основу работы оптического датчика положен эффект Доплера. Прибор содержит лазерный ис-

точник излучения, приемную оптическую схему, а также электронную схему обработки. При отражении излучения от неподвижного объекта длина волны принятого луча не отличается от истинной длины волны лазера. Если объект перемещается вдоль оси излучения, происходит сдвиг длины волны отраженного излучения на некоторую величину (эффект Доплера), значение и знак которой несут информацию о скорости и направлении движения объекта, а используемая в составе приемного оптического модуля интерферометрическая схема позволяет определить эту величину. Таким образом, колебания отражающей поверхности модулируют частотный сдвиг, и электронная обработка этого сигнала модуляции позволяет получить параметры вибрационных колебаний [5].

С помощью рассмотренных выше устройств решается наиболее важная задача на производстве – повышение уровня контроля вибрационной безопасности, надежности автоматической защиты, помехозащищенности устройства, экономичности за счет неэкранированной линии связи, а также снижение трудозатрат при его обслуживании. Применение различных видов датчиков вибрации позволяет получить более корректные измерения вибрационной нагрузки на работников промышленных предприятий.

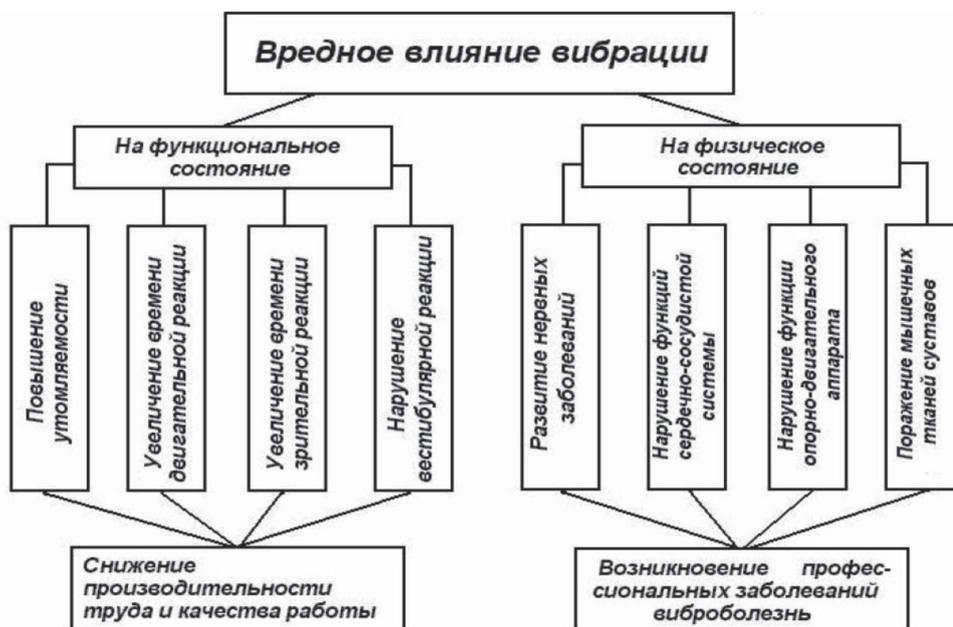


Рис. 1. Классификация вредного влияния вибрации на человека

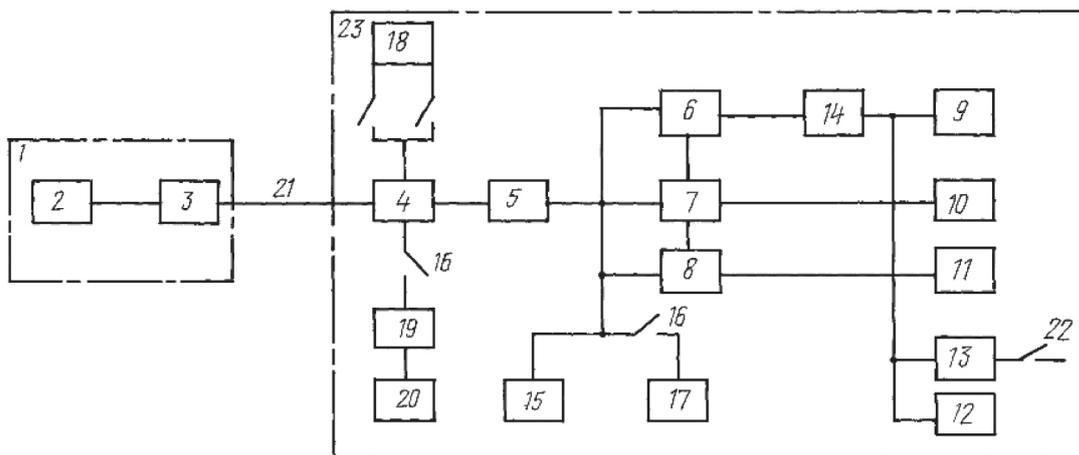


Рис. 2. Структурная схема устройства для контроля уровня вибрации на производстве

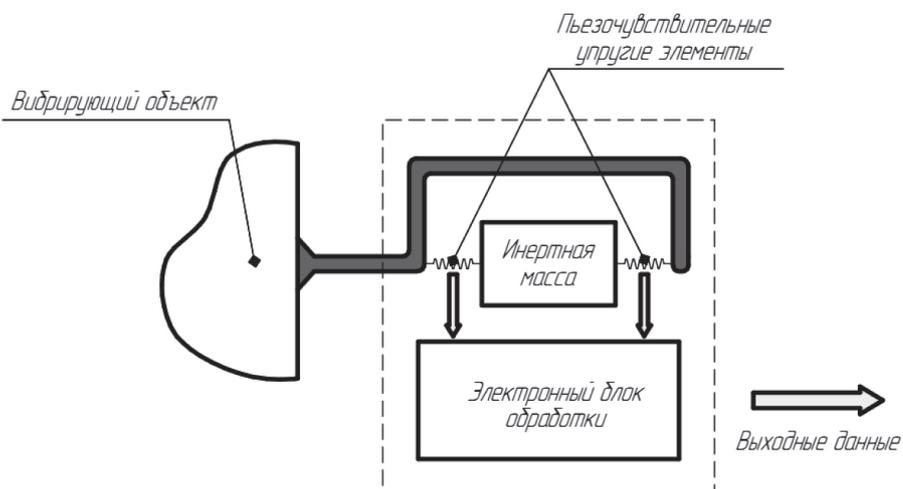


Рис. 3. Схема пьезоэлектрического датчика

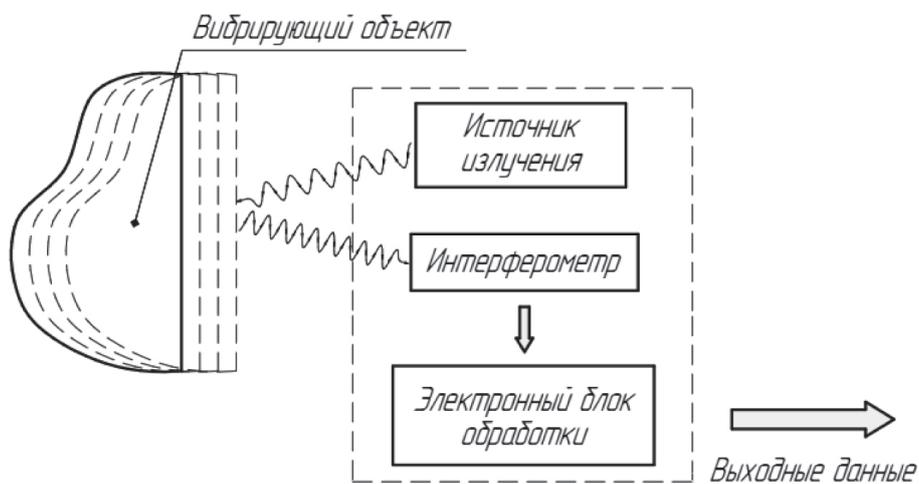


Рис.4. Схема оптического датчика

Список литературы

1. Колосов Ю.В. Защита от вибраций и шума на производстве: Учебное пособие [Текст] / Ю.В. Колосов, В.В. Барановский. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 38 с.
2. Абдрахимов Ю.Р. Анализ изменений в процедуре оценки рабочих мест по условиям труда [Текст] / Ю.Р. Абдрахимов, А.В. Федосов, Д.Р. Макулова, Р.Р. Худайбердин // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 2. – С. 383–391.
3. Вибрационная безопасность. Общие требования [Текст]: ГОСТ 12.1.012-2004. – Взамен ГОСТ 12.1.012-90; введ. 1.07.2008.
4. Пат. 2202771 Рос. Федерация G01H17 Устройство для контроля уровня вибрации [Текст] / В.В. Измайлов, Н.Б. Вязьмитинов, В.М. Батальцев; заявитель и патентообладатель ООО «Центр технической диагностики» Измайлов Владимир Валентинович. – № 2001124773/28. – Заявл. 07.09.2011. – Оpubл. 20.43.2013. – 3 с.: ил.
5. Мухамадиев А.А. Классификация акустооптических измерительных преобразователей для систем экологического и техносферного мониторинга // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – № 4. – С. 113–117.

References

1. Kolosov Ju.V. Zashhita ot vibracij i shuma na proizvodstve. Uchebnoe posobie [Tekst] / Ju.V. Kolosov, V.V. Baranovskij. – SPb: SPbGU ITMO, 2011. – 38 s.
2. Abdrahimov Ju.R. Analiz izmenenij v procedure ocenki rabochih mest po uslovijam truda // Neftegazovoe delo. – 2014. – № 2. – S. 383–391.
3. Vibracionnaja bezopasnost'. Obshhie trebovanija [Tekst]: GOST 12.1.012-2004. – Vzamen GOST 12.1.012-90; vved. 1.07.2008.
4. Pat. 2202771 Ros. Federacija G01H17 Ustrojstvo dlja kontrolja urovnja vibracii [Tekst] / V.V. Izmajlov, N.B. Vjaz'mitinov, V.M. Batal'cev; zajavitel' i patentoobladatel' ООО «Centr tehničeskoj diagnostiki» Izmajlov Vladimir Valentinovich. – № 2001124773/28. – Zajavl. 07.09.2011. – Opubl. 20.43.2013. – 3 s.: il.
5. Muhamadiev A.A. Klassifikacija akustooptičeskih izmeritel'nyh preobrazovatelej dlja sistem jekologičeskogo i tehnosfernogo monitoringa // Jelektrotehničeskie i informacionnye kompleksy i sistemy. – 2014. – T. 10. – № 4. – S. 113–117.

НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS



Денисова О.А.

Denisova O.A.

*доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный университет экономики
и сервиса», Россия, г. Уфа*

УДК 538.9

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Теоретически рассмотрены два случая распространения ультразвуковой волны в холестерическом жидком кристалле: 1) волновой вектор \vec{k} перпендикулярен оси спирали; 2) волновой вектор \vec{k} параллелен оси спирали.

Показано, что в первом случае в холестерическом жидком кристалле распространяется слабо затухающая упругая волна. Во втором случае волна быстро затухает. Проведена оценка коэффициентов затухания и скоростей звуковых мод, которые возникают при флуктуациях ориентации оси спирали и плотности.

Экспериментальное исследование показало: во-первых, внутренняя структура холестерического жидкого кристалла не оказывает значительного влияния на распространение ультразвука, а скорость звука совпадает со скоростью звука в изотропной фазе. Во-вторых, появляется «второй» звук, для которого скорость \vec{c}_\perp определяется волновым вектором спирали холестерического жидкого кристалла \vec{q}_o , причем $\vec{c}_\perp \approx \vec{q}_o$. При распространении ультразвуковой волны изменяются параметры спирали, и, как следствие, изменяются оптические свойства жидкого кристалла.

В работе предложена экспериментальная методика, основанная на принципах модуляционной спектроскопии. Она позволяет точно фиксировать тонкие изменения в оптических спектрах, которые не регистрируются обычными оптическими спектрометрами. Восстановленный спектр отражения дает информацию о влиянии закрутки жидкого кристалла на распространение ультразвука в нем.

Ключевые слова: холестерические жидкие кристаллы, твист-структуры жидких кристаллов, ультразвуковая волна, директор жидкого кристалла, ось спирали жидкого кристалла, планарная ориентация молекул.

FEATURES OF ULTRASOUND PROPAGATION IN CHOLESTERIC LIQUID CRYSTALS

Theoretically considered two cases of ultrasonic waves in a cholesteric liquid crystal: 1) the wave vector \vec{k} perpendicular to the axis of the helix; 2) the wave vector \vec{k} parallel to the axis of the helix.

It is shown that in the first case in a cholesteric liquid crystal extends weakly damped elastic waves. In the second case, the wave decays rapidly. The estimation of the coefficients of attenuation and velocity of sound modes that occur when the helix axis orientation fluctuations and density.

Experimental study showed: First, the internal structure of the a cholesteric liquid crystal has no significant effect on the propagation of ultrasound, the sound speed coincides with the speed of sound in the isotropic phase. Secondly, there is a «second» sound, for which the rate is determined by the wave vector \vec{c}_\perp a cholesteric liquid crystal helix \vec{q}_o , and $\vec{c}_\perp \approx \vec{q}_o$. When the ultrasonic wave propagation parameters are altered spiral, and as a result, modify the optical properties of liquid crystal.

The paper presents experimental technique based on the principles of modulation spectroscopy. It allows you to accurately capture the subtle changes in the optical spectra, which are not recorded by conventional optical spectrometer. Recycled reflection spectrum gives information about the influence of twist of the liquid crystal on the spread of ultrasound in it.

Key words: cholesteric liquid crystals, twist-the structure of liquid crystals, the ultrasonic wave, the director of the liquid crystal, the helical axis of the liquid crystal, molecule planar orientation.

Разнообразные свойства жидких кристаллов (ЖК), интересные с точки зрения практического применения, зависят от равновесия в распределении молекул. Перестройка структуры, а также изменение формы молекул, вызванные воздействием светового, ультразвукового, термического, электрического, магнитного полей, ведут к значительным изменениям их физических свойств. Пространственный порядок в жидких кристаллах определяется ориентацией и расположением длинных осей их молекул, поэтому, чтобы определить последовательное микроскопическое значение параметра порядка, необходимо ввести для каждой молекулы координаты единичного вектора $\vec{\theta}^\alpha$ и центра масс \vec{r}^α вдоль длинной оси молекулы. Параметр порядка Q_{ij} – это симметричный тензор, который описывается уравнением

$$\frac{\rho}{mQ_{ij}(\vec{r}, t)} = \sum_{\alpha} (\theta_i^\alpha \theta_j^\alpha - \frac{1}{3} \delta_{ij}) \delta(\vec{r} - \vec{r}^\alpha(t)) = \sum_{\alpha} Q_{ij}^\alpha \delta(\vec{r} - \vec{r}^\alpha),$$

где m – масса каждой молекулы, ρ – плотность, \vec{r} – радиус-вектор, δ_{ij} – единичный тензор, t – время, δ – дельта-функция.

В одноосных жидких кристаллах параметр Q_{ij} при условии равновесия определяется выражением

$$\langle Q_{ij}(\vec{r}) \rangle = S \left[n_i^o(\vec{r}) n_j^o(\vec{r}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right],$$

где S – мера степени упорядоченности молекул ЖК, $n_i^o(\vec{r}), n_j^o(\vec{r})$ – направляющие равновесия. Вектор $\vec{n}^o(\vec{r})$ в нематических жидких кристаллах (НЖК) – величина постоянная в пространстве. Распределение директора в холестерических жидких кристаллах (ХЖК) имеет спиральную симметрию, которая описывается как

$$\vec{n}^o(\vec{r}) = \vec{n}^o \cos \psi^o(\vec{r}) + (\vec{p}^o \times \vec{n}^o) \sin \psi^o(\vec{r}),$$

где \vec{n}^o – единичный вектор в плоскости, перпендикулярной \vec{p}^o ; \vec{p}^o – единичный вектор вдоль оси спирали; λ_c – шаг спирали; $\psi^o(\vec{r}) = \left(\frac{2\pi}{\lambda_c} \right) \vec{p}^o \cdot \vec{r} + \varphi$; φ – произвольная фаза, которая может быть выбрана

такой, что $\vec{n}^o(r=0) = \vec{n}^o$. Можно также отметить, что $\vec{\nabla} \psi^o(\vec{r}) = q_o \vec{p}^o$.

Так как ХЖК имеют периодическую структуру, их акустические свойства отличаются от свойств НЖК. Помимо анизотропии скорости звука, характерной для НЖК [1], в ХЖК имеется вторая звуковая мода, скорость которой определяется шагом спирали кристалла [2, 3].

В представленной работе исследовались два частных случая распространения упругих волн в ХЖК: в одном случае волновой вектор \vec{k} лежал в плоскости XOY и совпадает с осью OZ , параллельной оси холестерической спирали, а в другом волновой вектор перпендикулярен оси OZ .

Следуя работе [4], введем функции: $\rho(\vec{r}, t)$ – плотность среды, $\varepsilon(\vec{r}, t)$ – плотность звуковой энергии, $\theta_{si}(\vec{r}, t)$ – переменная, связанная с шагом и углом наклона спирали, $g(\vec{r}, t)$ – плотность момента импульса. Можно определить волновой вектор спирали $q_o(\vec{r}, t) = 2\pi / \lambda_c(\vec{r}, t)$ и нормаль к слоям ХЖК $\vec{p}(\vec{r}, t)$, исходя из вида функции $\theta_{si}(\vec{r}, t)$.

Используя работу [4], запишем уравнения гидродинамики ХЖК:

$$\frac{\partial \rho(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\rho \nabla \cdot \vec{v}(\vec{r}, t),$$

$$\frac{\partial g_i(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\Delta_i P - q_o p^o \Delta \vec{h}(\vec{r}, t) + \theta_{ijkl} \nabla_j \nabla_l \alpha_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial q(\vec{r}, t)}{\partial t} = \chi_{ij} \nabla_i \nabla_j T, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = q_o \vec{p}^o \vec{v} - \frac{1}{\gamma} h_\theta,$$

где T – температура среды, P – звуковое давление, $v(r, t)$ – колебательная скорость в звуковой волне, α_i – коэффициент вязкости, χ_{ij} – коэффициент теплопроводности, $q(\vec{r}, t)$ – обобщенная переменная, имеющая размерность энергии, $\vec{h}_\theta = \vec{\Delta} \cdot \vec{h}$, $h = -\partial F(n) / \partial n$, $F(n)$ – свободная энергия Озеена – Франка [3], тензор θ_{ijkl} вязкоупругих напряжений

$$\theta_{ijkl}\Delta_i\alpha_k = 2\theta_2 A_{ij} + 2(\theta_3 - \theta_2)[p_i^o p_k^o A_{kj} + p_j^o p_k^o A_{kl}] + 2(\theta_1 - 2\theta_3 + \theta_2)p_i^o p_j^o (p_k^o A_{kl} p_l^o) + (\theta_4 - \theta_2)\delta_{ij} A_{kk} + (\theta_5 - \theta_4 + \theta_2)[\delta_{ij} p_k^o p_l^o A_{kl} + p_i^o p_j^o A_{kk}],$$

где $A_{ij} = \frac{1}{2}(\Delta_i\alpha_j + \Delta_j\alpha_i)$.

Для выяснения того, какая структура ХЖК будет наблюдаться при воздействии ультразвука, которое характеризуется параметрами \vec{v} , p , \vec{h} , P , нужно определить вид переменных ρ , q , g , θ . Для этого сделаем замену переменных в уравнениях системы (1):

$$A(\vec{k}, \xi) = \int_0^\infty d^3r \int dt \exp(-i\vec{k}\vec{r} - i\xi t) A(\vec{r}, t), \quad (2)$$

$$B(\vec{k}, \xi) = \frac{\partial B}{\partial \rho} \Big|_{S, \theta_{S3}} \rho(\vec{k}, \xi) + \frac{\nu}{T} \frac{\partial B}{\partial S} \Big|_{S, \theta_{S3}} q(\vec{k}, \xi) + \frac{\partial B}{\partial \theta_{S3}} \Big|_{\rho, S} \theta_{S3}(\vec{k}, \xi). \quad (3)$$

Рассмотрим два случая, отличающихся направлением волнового вектора ультразвука \vec{k} .

В первом случае вектор \vec{k} совпадает по направлению с нормалью к слою ХЖК ($\vec{k} \parallel OZ$). Для

т. е. применим преобразование Фурье в пространстве и преобразование Лапласа во времени. Имеем также $A(\vec{k}, t=0) = A(\vec{k})$, где ξ – параметр, содержащий малую мнимую часть. В случае линейных отклонений от равновесия любая переменная, характеризующая внешнее воздействие, может быть выражена через параметры ρ , q и θ_{S3} .

Пусть $B(\vec{k}, \xi)$ – одна из этих переменных, тогда для нее можно записать

упрощения задачи влиянием нагревания кристалла пренебрежем. Тогда, проведя операцию (2) и (3) над (1), получим:

$$\left[\xi^2 - k^2 \frac{\partial P}{\partial \rho} \Big|_{S, \theta_{S3}} - k_3^2 q_o \frac{\partial h_3}{\partial \rho} \Big|_{S, \theta_{S3}} \right] \rho(\vec{k}, \xi) - \left[iq_o k_3^3 \frac{\partial h_3}{\partial \theta_{S3}} \Big|_{S, \rho} - ik_3 k^2 \frac{\partial P}{\partial \theta_{S3}} \Big|_{S, \rho} + iq_o k_3 k_1^2 \frac{\partial h_1}{\partial \theta_{S1}} \Big|_{S, \rho} \right] \theta(\vec{k}, \xi) = i\xi \delta \rho(\vec{k}), \quad (4)$$

$$i\xi g(\vec{k}, \xi) + \frac{q_o k_1}{k} \theta(\vec{k}, \xi) = \rho \eta(\vec{k}),$$

$$\frac{\xi q_o k_3}{\rho k^2} \rho(\vec{k}, \xi) - \frac{k_1 q_o}{k \rho} q(\vec{k}, \xi) - i\xi \theta(\vec{k}, \xi) = \delta \theta(\vec{k}) + \frac{i q_o k_3}{\rho k^2} \delta \rho(\vec{k}).$$

Используя данные работы [4], сделаем замены:

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} \Big|_{S, \theta_{S3}} = C_o^2, \quad \frac{\partial h_3}{\partial \rho} \Big|_{S, \theta_{S3}} = K_2' \frac{\partial q_o}{\partial \rho} \Big|_{h_3, S}, \quad \frac{\partial h_3}{\partial \theta_{S3}} \Big|_{S, \rho} = K_2',$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial \theta_{S1}} \Big|_{S, \rho} = K_\perp(k), \quad \frac{\partial P}{\partial \theta_{S3}} \Big|_{S, \rho} = -K_2' \rho \frac{\partial q_o}{\partial \rho} \Big|_{h_3, S}, \quad (5)$$

где K_2' и $K_\perp(k)$ – постоянные упругости. Подставим выражение (5) в (4) и запишем в более простом виде:

$$\begin{cases} (\xi^2 + C_1)\rho(\vec{k}, \xi) + ia_3\theta(\vec{k}, \xi) = i\xi C_3, \\ -i\xi g(\vec{k}, \xi) + a_6\theta(\vec{k}, \xi) = a_{11}, \\ \xi C_2\rho(\vec{k}, \xi) - a_8 g(\vec{k}, \xi) - i\xi\theta(\vec{k}, \xi) = C_4 + iC_5, \end{cases}$$

где C_i и a_k – постоянные.

Решаем эту систему алгебраически и находим функции:

$$\rho(\vec{k}, \xi) = \frac{A_{10}(\xi)}{\Delta(\xi)}, \quad g(\vec{k}, \xi) = \frac{A_{20}(\xi)}{\Delta(\xi)}, \quad \theta(\vec{k}, \xi) = \frac{A_{30}(\xi)}{\Delta(\xi)},$$

где

$$\begin{aligned}
 A_{10}(\xi) &= i\xi^3 C_2 + i\xi(a_3 C_5 - C_3 a_6 a_8 + \xi a_3 C_4 + i a_3 a_8 a_{11}), \\
 A_{20}(\xi) &= i\xi^3 a_{11} + i\xi^2(a_6 C_5 - C_2 C_3 a_6) + \xi^2 a_6 C_4 + \xi C_2 a_3 a_{11} + i\xi C_1 a_{11} + C_1 C_4 a_6 + i C_1 C_5 a_6, \\
 A_{30}(\xi) &= -i\xi^3 C_4 + \xi^3 C_5 + i\xi^2 C_5 + \xi^2(C_4 + a_8 a_{11}) + \xi C_1 C_5 + i\xi C_1 C_4 + C_1 a_8 a_{11}, \\
 \Delta(\xi) &= \xi^4 - \xi^2(a_8 a_6 - C_1 - a_3 C_2) + C_1 a_8 a_6.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Выполним обратное преобразование Лапласа по времени. Оригинал изображения, например, функции $\rho(\vec{k}, \xi)$, будет иметь вид:

$$\rho(\vec{k}, t) = \sum_{k=1}^4 \frac{A_{10}(\xi, k)}{\Delta'(\xi, k)} \exp(\xi_k t), \tag{7}$$

где ξ_k – корни уравнения $\Delta(\xi) = 0$, а $\Delta(\xi)$ определяется выражением (6). Исходя из простых численных сравнений, можно заметить, что $|C_1 - a_6 a_8| \ll a_3 C_2$ и $|-C_1 + a_6 a_8 - a_3 C_2| \gg a_6 a_8 C_1$, следовательно

$$(-C_1 + a_6 a_8 - a_3 C_2)^2 \gg 4a_6 a_8 C_1. \tag{8}$$

Если применить соотношения (8), то это позволит значительно упростить выражение (6), тогда

приводим его к виду

$$\left[\xi^2 + \frac{q_o^2 E'(k)}{\rho} \left(\frac{k_1}{k} \right)^2 \right] [\xi^2 + C_1 + a_3 C_2] = \Delta(\xi), \tag{9}$$

где k_1 – компонента волнового вектора, а k – его модуль, $E'(k)$ – некоторая нелинейная функция волнового вектора звуковой волны. Корни уравнения (9):

$$\xi_1 = -\xi_2 = i \sqrt{\frac{q_o^2 E'(k)}{\rho} \left(\frac{k_1}{k} \right)^2} = i A_o, \tag{10}$$

$$\xi_3 = -\xi_4 = i \sqrt{C_1 + a_3 C_2} = i A_1.$$

Найдем решение системы (4), подставив корни (10) в (7):

$$\begin{aligned}
 \rho(\vec{k}, t) &= \rho(\vec{k}) \left[\Delta(A_o) A_1 \cos A_o t + \Delta(A_1) A_o \cos A_1 t + \frac{\rho(\vec{k}) a_6 a_8 \Delta(A_1) + \Delta(A_o)}{\Delta(A_1) \Delta(A_2)} \right], \\
 g(\vec{k}, t) &= g(\vec{k}) (\cos A_o t + \cos A_1 t) + \theta(\vec{k}) (A_2 \sin A_o t + A_4 \sin A_1 t), \\
 \theta(\vec{k}, t) &= \theta(\vec{k}) (A_1 \Delta(A_o) \cos A_o t - A_o \Delta(A_o) \cos A_1 t) + g(\vec{k}) A_3 (\sin A_o t + \sin A_1 t),
 \end{aligned} \tag{11}$$

где

$$A_2 = \frac{a_6 C_1}{\Delta(A_1) A_o^2}, \quad A_3 = C_1 a_8, \quad A_4 = \frac{a_6 C_1}{\Delta(A_o) A_1^2}.$$

Функции $\delta\rho(\vec{k})$ и $\delta\theta(\vec{k})$ найдем из определителя

$$\begin{pmatrix} -B_1(a_3 C_2 - a_1 a_6) + B_2 & i a_3 B_1 \\ -B_2 + i B_1 C_1 & B_1 C_1 - B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\rho(\vec{k}) \\ \delta\theta(\vec{k}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho(\vec{k}) \\ \theta(\vec{k}) \end{pmatrix},$$

$$B_1 = \Delta(A_1) A_o + \Delta(A_o) A_1, \quad B_2 = \Delta(A_1) A_o^3 + \Delta(A_o) A_1^3, \quad \rho\eta(\vec{k}) = g(\vec{k}).$$

Теперь найдем $\vec{q}_o(\vec{k}, t)$ – волновой вектор спирали и $\vec{p}(\vec{k}, t)$ – нормали к ХЖК слоям, зная, что

$$\theta(\vec{k}) = \psi(k_3) + f(0), \quad \theta(\vec{k}) = \frac{p_1(\vec{k}_1) q_o}{k_1},$$

$$\frac{d\theta_{Si}}{dt} = p_i^o \frac{dq_o(\vec{k}, t)}{dt} + k_i \frac{d}{dt} \left[\varphi(\vec{k}) + \frac{k_1 p_1(\vec{k}, t)}{q_o} + \frac{k_3 p_3}{q_o} \right].$$

Получим конечные результаты:

$$p_1(\vec{k}, t) = p_1(k_1)[A_1\Delta(A_o)\cos A_o t - A_o\Delta(A_1)\cos A_1 t] + g(\vec{k})A_3(\sin A_o t + \sin A_1 t),$$

$$\lambda(\vec{k}, t) = \frac{2\pi p_3 k_3}{\psi(k_3)[A_1\Delta(A_o)\cos A_o t - A_o\Delta(A_1)\cos A_1 t] + g(\vec{k})A_3(\sin A_o t + \sin A_1 t) - \varphi(\vec{k})}.$$

Рассмотрим второй случай, когда вектор \vec{k} совпадает с направлением, перпендикулярным нормали к слоям ХЖК, т. е. лежит в плоскости XOY . В этом случае нас интересует только функция $\theta(\vec{k}, t)$, которая определяет $\lambda(\vec{k}, t)$ и $p(\vec{k}, t)$. Поэтому задачу можно решить проще. Повторив ту же процедуру, что и в первом случае, получим

$$\begin{cases} \left[-i\xi + \frac{\theta_3}{\rho k_1^2} \right] g(k_1, \xi) + \frac{q_o K_{\perp}}{q_o^2 k_1^2 \theta_{S1}(k_1, \xi)} = g(k_1), \\ -\frac{k_1 q_o}{\rho} g(k_1, \xi) + \left[\frac{i\xi + K_{\perp}}{\gamma q_o^2 k_1^4} \right] \theta_{S1}(k_1, \xi) = \theta_{S1}(k_1). \end{cases}$$

Далее можно записать

$$\begin{cases} [i\xi + C_6]g(k, \xi) + a_{12}\theta_{S1}(k, \xi) = g(k_1), \\ a_{13}g(k_1, \xi) + (-i\xi + C_7)\theta_{S1}(k_1, \xi) = \theta_{S1}(k_1), \end{cases} \quad (12)$$

Полученное решение гидродинамических уравнений (11) в виде функций $\rho(\vec{k}, t)$, $g(\vec{k}, t)$, $\theta(\vec{k}, t)$, $\vec{P}(\vec{k}, t)$, $\lambda(\vec{k}, t)$ для $\vec{k} \parallel OZ$ позволяет сделать некоторые выводы. Эти выводы отражают изменения структуры среды ХЖК, возникающей под влиянием ультразвукового поля. Здесь нет решений для параметров $P_3(\vec{k}, t)$ и $\lambda(k_1, t)$, потому что ультразвук не влияет на эти компоненты, и они остаются постоянными. Решение для плотности моментов импульса $g(\vec{k}, t)$ и для функции $\theta(\vec{k}, t)$, определяющей $\vec{p}(\vec{k}, t)$ и $\lambda(\vec{k}, t)$, получаются взаимосвязанными, это видно из (11) и (13). Полученная связь функций говорит о том, что в холестерике кроме волн продольного типа со скоростью

$$c^2(k) = C_o^2 + \frac{q_o E'(k) k_3^2}{\rho k_4} - 2K_2' q_o \left. \frac{\partial q_o}{\partial \rho} \right|_{h_3, S} \left(\frac{k_3^2}{k} \right)$$

возникают еще волны (поперечные) со скоростью

$$c_{\perp}^2(k) = \frac{q_o^2 E'(k)}{\rho} \left(\frac{k_1}{k} \right)^2,$$

где $E'(k) = K_2' k_3^2 + K_{\perp}(k) k_1^2$, $c^2(k)$ и $c_{\perp}^2(k)$ определя-

где функция

$$\theta_{S1}(k_1, \xi) = \frac{-i\xi\theta_{S1}(k_1) + C_6\theta_{S1}(k_1) + a_{13}g(k_1)}{\Delta(k_1, \xi)}. \quad (13)$$

Корнями уравнения $\Delta = \xi^2 + i\xi(C_6 + C_7) - C_6C_7 - a_{12}a_{13}$ являются

$$\xi_1 = -iC_6 \text{ и } \xi_2 = -i\frac{1}{4} \frac{a_{12}a_{13}}{C_6}, \quad (14)$$

здесь использовано условие $(K_{\perp}\rho/\gamma^2) \ll 1$.

Применим (7) (обратное преобразование Лапласа) и получим решение для функции $\theta_{S1}(k_1, \xi)$:

$$\theta_{S1}(k_1, t) = \theta_{S1}(k_1)A_5 \cos \xi_2 t + g(k_1)(A_6 \sin \xi_1 + A_7 \sin \xi_2),$$

где

$$A_5 \approx 1, \quad A_6 = \frac{k_1 q_o}{\rho C_6}, \quad A_7 = \frac{k_1 q_o}{\rho(C_6 - C_6/2a_{13}a_{12})}.$$

При условии

$$\theta_{S1}(k_1, t) = p_1^o q_o + k_1 \left[\varphi(k_1) + \frac{k_1 p_1(k_1, t)}{q_o} \right],$$

$$\theta_{S1}(k_1) = k_1 \theta(k_1) \text{ и } \theta(k_1) = \frac{p_1(k_1) q_o}{k_1},$$

функция $p_1(k_1, t)$ приобретет вид

$$p_1(k_1, t) = \frac{1}{k} p_1(k_1) q_o^2 \cos \xi_2 t - p_1^o q_o^2 \varphi(k_1) + g(k_1)(A_6 \sin \xi_1 t + A_7 \sin \xi_2 t).$$

лись из собственных частот (10).

Необходимо отметить, что в случае, когда вектор \vec{k} лежит в плоскости XOY , также наблюдаются два типа волн с частотами, определяемыми выражением (14). Анализируя выражение (14), можно сделать вывод, что имеющий место процесс в данном случае будет диффузионным.

Теперь рассмотрим результаты экспериментального изучения оптических свойств холестерических жидких кристаллов при воздействии на них ультразвука. Для описания распространения ультразвуковой волны в ХЖК кроме функций плотности звуковой энергии, среды, момента импульса, вводят переменную, связанную с шагом и углом наклона спирали. В первом случае внутренняя структура ХЖК не оказывает существенного влияния на распространение ультразвука, а скорость звука совпадает со скоростью звука в изотропной фазе. Во втором случае появляется «второй» звук, для которого скорость \vec{c}_{\perp} определяется волновым вектором \vec{q}_o спирали ХЖК, причем $\vec{c}_{\perp} \approx \vec{q}_o$. Поэтому в

изотропной фазе $\vec{c}_\perp = 0$. Так как в этой ситуации изменяются параметры спирали, то при распространении ультразвуковой волны должны изменяться оптические свойства НЖК.

Рассмотрим ситуацию, когда длина поперечной волны больше шага спирали. Экспериментальное исследование распространения ультразвуковой волны в закрученных жидких кристаллах затруднено из-за ряда побочных факторов, влияющих на изменение шага ХЖК-спирали. К этим факторам можно отнести ориентационные эффекты и нагревание кристалла в процессе эксперимента. Поэтому экспериментальное изучение распространения ультразвуковой волны нужно проводить при достаточно слабых интенсивностях действующего на холестерик ультразвука и при постоянном отводе тепла. В связи с вышесказанным была разработана специальная методика регистрации, основой которой являются принципы модуляционной спектроскопии. Эта методика дает возможность проводить точные измерения даже незначительных изменений в спектрах, которые не позволяет зафиксировать обычный оптический спектрометр.

Идея метода заключается в том, что влияние ультразвука периодически изменяет шаг спирали ХЖК и длину волны при селективном рассеянии света, а при монохроматическом излучении изменяется интенсивность рассеянного светового потока. Эти изменения фиксируются фотоприемником, затем выделяются из шумов, далее преобразуются к виду, удобному для измерений системой фазочувствительного детектирования. Например, экспериментальные результаты представляются в виде отношения переменной ΔI и постоянной I составляющих сигнала.

Экспериментальное измерение отношения $\Delta I/I$ можно производить разными способами. Наиболее простой метод – это регистрация только ΔI при постоянном значении I во всем спектральном диапазоне. Для определения отношения $\Delta I/I$ требуется ввести в конечный результат поправочный коэффициент, который определяется величиной постоянной компоненты сигнала I . Для этого на выходе фотоэлектрического умножителя поддерживался постоянный уровень сигнала с помощью фазочувствительного усилителя путем изменения напряжения на диодах. Фазочувствительным усилителем управлял компьютер через цепь обратной связи в источнике высокого напряжения. После предварительного усиления переменный сигнал поступал на селективный усилитель, потом поступал на преобразователь напряжения. Опорное напряжение частотой 79 Гц подавалось с низкочастотного ге-

нератора на преобразователь напряжения. Оно же использовалось для модуляции высокочастотного сигнала генератора, которая осуществлялась для удобства выделения и регистрации полезного сигнала на фоне шумов.

Планарно ориентированный холестерический жидкий кристалл помещался в ячейку, представляющую из себя сборку из двух стеклянных пластин. Состояние планарной текстуры контролировалось оптическим микроскопом. Толщина слоя ЖК задавалась слюдяными прокладками и составляла 10–15 мкм. Продольная ультразвуковая волна возбуждалась с помощью сдвигового преобразователя из кристалла селенита висмута с резонансной частотой 600 кГц. Сдвиговой преобразователь склеивался с ЖК-ячейкой канадским бальзамом. Экспериментальная ячейка с пьезопреобразователем помещались в термостатированную камеру, в которой температура задавалась с точностью 0,1 °С и контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Данные о величине сигнала $\Delta I/I$ и о температуре выводились на компьютер по двум каналам.

Проведенные экспериментальные исследования позволили обнаружить модуляционные особенности в спектре отражения в области селективного отражения света. На рис. а (см. стр. 115) приведен дифференциальный спектр холестерилпеларгоната. При длине световой волны 427 нм наблюдается отрицательный пик, а при 436 нм – положительный.

По условиям эксперимента это – дифференциальный спектр первой производной от I , так как амплитуда модулирующего поля была мала (давление $P \approx 10^3$ дин/см²) и величина $\Delta I/I$ сохранялась малой.

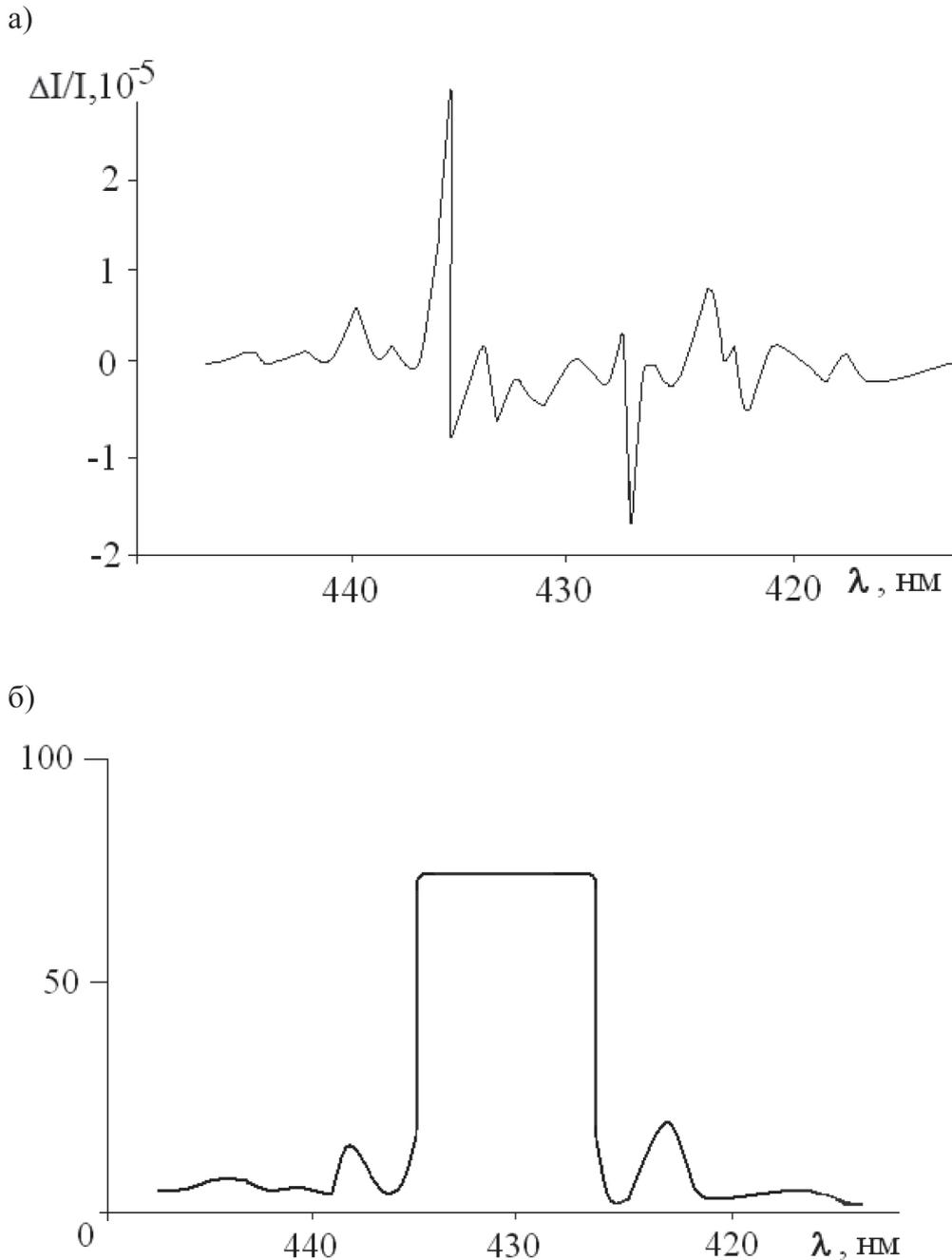
Восстанавливая по этому дифференциальному спектру первоначальную форму линии селективного отражения, можно определить коэффициент фотоупругого эффекта. Восстановленный спектр отражения показал полное совпадение с формой линии селективного рассеяния (рис. б).

Для оценки фотоупругого эффекта в первую очередь необходимо оценить дифференциал коэффициента отражения света от холестерического жидкого кристалла при углах падения, близких к нормальным [5]:

$$I \approx \frac{\sin^2(2\pi \delta h q_o)}{\beta^2 + \sin^2(2\pi \beta \delta h \alpha)}, \quad (15)$$

$$\beta = \left[\left(\frac{k_o^2 - q_o^2}{\delta k_o^2} \right)^2 - 1 \right]^{1/2},$$

где α – угол рассеяния света, $\delta = (\epsilon_1 - \epsilon_2)/(\epsilon_1 + \epsilon_2)$, h – толщина кристалла, \vec{q}_o – волновой вектор ХЖК-



а) Модуляционный спектр отражения света от слоя ХЖК в области селективного рассеяния ($T = 345 \text{ K}$), б) восстановленная форма линии селективного рассеяния

структур, \vec{k}_o – волновой вектор падающего света, ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости в направлении длинной и короткой осей молекул.

Из (15) при $\vec{k}_o \approx \vec{q}_o$ имеем:

$$\frac{\Delta I}{I} \approx \frac{\text{ctg}(2\pi \beta \delta q_o) \partial q_o}{\beta \omega \partial t}, \quad (16)$$

что качественно характеризует изменения дифференциального спектра [6, 7].

Кроме того, выражение (16) предсказывает, что

при условии $2\pi\beta\delta q_o \sim 2m\pi$ должны наблюдаться дополнительные особенности, которые фиксируются в экспериментально зарегистрированных спектрах (рис. а).

Необходимо отметить, что выражение (15) применимо лишь в идеальном случае, поэтому конечное значение величины $\Delta I/I$ объясняется несовершенством реального ЖК-образца [8–10].

Таким образом, на основе описанных в статье явлений увеличивая число отражений, возможно

создание модуляторов и дефлекторов света с достаточно большими глубиной модуляции и углом дефлексии.

Список литературы:

1. Капустин А.П. Акустика жидких кристаллов [Текст] / А.П. Капустин, О.А. Капустина – М.: Наука, 1986. – 248 с.
2. Каменский В.Г. Сдвиговые искажения структуры холестериков [Текст] / В.Г. Каменский, Е.И. Кац // ЖЭТФ. – 1987. – Т. 93. – В. 5. – С. 1765–1774.
3. Чандрасекар С. Жидкие кристаллы / С. Чандрасекар. – М.: Мир, 1980. – 344 с.
4. Де Жен П. Физика жидких кристаллов / Де Жен П. – М.: Мир, 1977. – 377 с.
5. Беляков В.А. Оптические свойства холестерических жидких кристаллов [Текст] / В.А. Беляков, В.Е. Дмитриенко, В.П. Орлов // Холестерические жидкие кристаллы. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1976. – С. 32–43.
6. Денисова О.А. Один из методов экспериментальных исследований жидких кристаллов [Текст] / О.А. Денисова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 107–113.
7. Денисова О.А. Пьезоэлектрический эффект в жидких кристаллах [Текст] / О.А. Денисова, О.А. Скалдин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 145–153.
8. Денисова О.А. Распространение ультразвуковых волн в твист-структурах жидких кристаллов [Текст] / О.А. Денисова, А.Н. Чувывров // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2011. – В. 2 (36). – С. 62–65.
9. Чувывров А.Н. Физика жидких кристаллов: поверхность: Научное издание [Текст] / А.Н. Чувывров, О.А. Денисова, Ф.М. Гирфанова. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2009. – 324 с.
10. Денисова О.А. Неравновесные структурные превращения жидких кристаллов в электрических полях и акустических потоках: Научное издание

[Текст] / О.А. Денисова. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2012. – 188 с.

References

1. Kapustin A.P. Akustika zhidkih kristallov [Tekst] / A.P. Kapustin, O.A. Kapustina – M.: Nauka, 1986. – 248 s.
2. Kamenskij V.G. Sdvigovye iskazhenija struktury holesterikov [Tekst] / V.G. Kamenskij, E.I. Kac // ZhJeTF. – 1987. – T. 93. – V. 5. – S. 1765–1774.
3. Chandrasekar S. Zhidkie kristally / S. Chandrasekar. – M.: Mir, 1980. – 344 s.
4. De Zhen P. Fizika zhidkih kristallov / De Zhen P. – M.: Mir, 1977. – 377 s.
5. Beljakov V.A. Opticheskie svojstva holestericheskikh zhidkih kristallov [Tekst] / V.A. Beljakov, V.E. Dmitrienko, V.P. Orlov // Holestericheskie zhidkie kristally. – Novosibirsk: Izd-vo SO AN SSSR, 1976. – С. 32–43.
6. Denisova O.A. Odin iz metodov jeksperimental'nyh issledovanij zhidkih kristallov [Tekst] / O.A. Denisova // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 107–113.
7. Denisova O.A. P'ezojelektricheskij jeffekt v zhidkih kristallah [Tekst] / O.A. Denisova, O.A. Skaldin // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 145–153.
8. Denisova O.A. Rasprostranenie ul'trazvukovyh voln v tvist – strukturah zhidkih kristallov [Tekst] / O.A. Denisova, A.N. Chuvyrov // Zhidkie kristally i ih prakticheskoe ispol'zovanie. – 2011. – V. 2 (36). – S. 62–65.
9. Chuvyrov A.N. Fizika zhidkih kristallov: poverhnost': Nauchnoe izdanie [Tekst] / A.N. Chuvyrov, O.A. Denisova, F.M. Girfanova. – Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2009. – 324 s.
10. Denisova O.A. Neravnovesnye strukturnye prevrashhenija zhidkih kristallov v jelektricheskikh poljah i akusticheskikh potokah: Nauchnoe izdanie [Tekst] / O.A. Denisova. – Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2012. – 188 s.



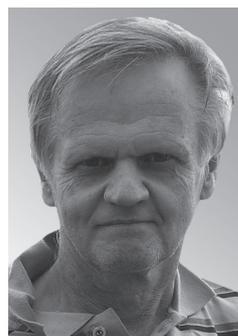
Доломатов М.Ю.
Dolomatov M.Yu.

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Физическая электроника и нанопизика» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа



Петров А.М.
Petrov A.M.

аспирант кафедры «Физическая электроника и нанопизика» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», Россия, г. Уфа



Рыжиков О.Л.
Ryjikov O.L.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическая электроника и нанопизика» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», Россия, г. Уфа



Бахтизин Р.З.
Bakhtizin R.Z.

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическая электроника и нанопизика» ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», Россия, г. Уфа

УДК 539.2, 537.9

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ «ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК» В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СПИНОВЫХ СТЕКЛАХ

Исследованы электрофизические свойства многокомпонентных органических спиновых стекол, в которых парамагнитные частицы высокомолекулярных асфальтосмолистых веществ однородно распределены в низкомолекулярной дисперсионной диэлектрической среде. В качестве объектов исследования изучены образцы высококипящих нефтяных фракций с температурой кипения свыше 350 °С с содержанием асфальтенов 7–80%. С применением электрометрических методов исследован фазовый переход материала из фазы диэлектрика в фазу полупроводника, инициированный температурной генерацией парамагнитных центров, который сопровождается резкими изменениями электропроводности в интервале температур от 20 до 210 °С.

Для различных образцов материалов первый фазовый переход происходит в интервале от 80 до 100 °С и характеризуется превращением диэлектрической фазы в полупроводниковую с увеличением электропроводности в среднем от $6,73 \cdot 10^{-11}$ до $3,58 \cdot 10^{-7}$ Ом⁻¹·м⁻¹.

В области температур от 100 до 210 °С электропроводность увеличивается от $3,58 \cdot 10^{-7}$ до $8,56 \cdot 10^{-6}$ Ом⁻¹·м⁻¹.

Подтверждается гипотеза авторов, что фазовые переходы обуславливаются химическими реакциями гомолитической диссоциации ароматических углеводородов по С-С связям с образованием парамагнитных частиц свободных стабильных радикалов, которые являются акцепторами электронов и снижают ширину запрещенной зоны проводимости.

Данные предположения обосновываются исследованиями по спектроскопии в видимой и ультрафиолетовой области, а также ЭПР-спектроскопии.

Ключевые слова: органические спиновые стекла, фазовый переход, полупроводник, диэлектрик, электропроводность, асфальтены, асфальтосмолистые вещества, парамагнетики.

FEATURES OF THE PHASE TRANSITION "INSULATOR-SEMICONDUCTOR" IN MULTICOMPONENT ORGANIC SPIN GLASSES

Authors studied the electrical properties of multicomponent organic spin glasses wherein paramagnetic particles of asphaltenes and resins are distributed in low molecular weight dielectric compounds of the dispersion hydrocarbon medium. High boiling petroleum fractions with a boiling point of over 350°C with the asphaltenes content 7–80% used as objects of this investigation. Authors studied phase transition insulator-semiconductor, initiated by thermal generation of paramagnetic centers. This phenomenon accompanied with increase of electrical conductivity in the temperature range from 20 to 210 °C.

For different sample of materials first phase transition occurs in the range from 80 to 100 °C. This phase transition is characterized by converting a dielectric phase in the semiconductor with increasing of conductivity from $6,73 \cdot 10^{-11}$ to $3,58 \cdot 10^{-7} \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

In the temperature range from 100 to 210 °C the conductivity increases from $3,58 \cdot 10^{-7}$ to $8,56 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

In this work was confirmed author's hypothesis that the phase transitions are caused by chemical reactions of homolytic dissociation of aromatic hydrocarbons by C-C bond to form stable paramagnetic particles of free radicals, which are electron acceptors and reducing the band gap of conductivity.

These assumptions are justified by research on spectroscopy in the visible and ultraviolet region, and EPR spectroscopy.

Key words: organic spin glasses, phase transition, semiconductor, insulator, electrical properties, asphaltenes, asphaltenes-resinous substances, paramagnetic.

Современные органические наноматериалы, в частности, полициклические ароматические углеводороды, органические красители, а также графен и углеродные нанотрубки получают в результате многостадийных и трудоемких технологических операций. Поэтому поиск более дешевых органических материалов для нужд молекулярной и наноэлектроники является актуальной задачей.

Проведенные ранее исследования [1, 2] свидетельствуют, что серьезную перспективу в этой сфере имеют системы с высоким содержанием нефтяных асфальтенов, к которым относятся асфальтиты, битуминозные вещества и асфальты. С точки зрения физики конденсированного состояния нефтяные дисперсные системы являются органическими спиновыми стеклами, так как они содержат парамагнитную фазу асфальтенов, которая распределена в многокомпонентной дисперсной углеводородной среде, которая является диамагнетиком и диэлектриком [3].

В работах [1, 2] было предположено, что высококипящие фракции нефти являются аморфными широкополосными компенсированными полупроводниками и обладают концентрацией парамагнитных центров (ПМЦ) от 10^{17} до 10^{20} спин/г [3]. Это подтверждают данные оптической спектроскопии [4], а также эксперименты по определению электропроводности [1] и квантовохимические расчеты [4]. Установлено, что ширина запрещенной зоны в этих материалах составляет 2,0–3,0 эВ, а энергия

активации электропроводности 1,3–2,0 эВ/молекулу [1]. В работах [1, 2] исследована температурная зависимость электропроводности для асфальта пропановой деасфальтизации, установлено, что энергия активации электропроводности составляет 1,34 эВ/молекулу и увеличение электропроводности сопровождается резким ростом ПМЦ, что свидетельствует о фазовых переходах «диэлектрик-полупроводник», инициированных температурным воздействием [1, 2]. Аналогичные эффекты обнаруживаются в тонких пленках полимеров [5].

Однако данные исследования не дают исчерпывающей информации о фазовом переходе «диэлектрик-полупроводник», так как не содержат детальное исследование температурной зависимости электрофизических свойств, в частности, отсутствуют вольтамперные характеристики образцов, а исследования проводились в ограниченном интервале до 140 °C.

Целью работы является исследование особенностей температурных фазовых переходов «диэлектрик-полупроводник» в парамагнитных дисперсных углеводородных средах.

В качестве объектов исследования взяты высококипящие нефтяные фракции с высоким содержанием асфальтенов, средний состав и свойства которых приведены в таблице.

Физико-химические свойства органических многокомпонентных спиновых стекол

Свойство	Значение
Плотность, кг/м ³	978–1056
Средняя молекулярная масса, г/моль	878–989
Коксуюемость по Конрадсону, % масс.	14,5–18,89
Содержание асфальтенов, % масс.	4–12
Температура размягчения по КиШ, °С	42–56
Концентрация ПМЦ, спин/г	4–8·10 ¹⁸

Электрические свойства образцов исследованы на специально разработанной лабораторной установке. Аппаратура состоит из цилиндрической измерительной ячейки, помещенной в термостат, и измерительного блока.

Измерительный блок собран на базе лабораторного программно-аппаратного комплекса NIELVI-SII корпорации National Instruments [11], снабжен аналого-цифровым преобразователем. Поскольку в аппаратуре данного комплекса отсутствуют средства для измерения низких токов и выработки высоких (до 500 В) напряжений, в его схему были добавлены управляемый FLYBACK импульсный усилитель (использовался канал STR0_OUT в режиме управления скважностью) и прецизионные операционные усилители с малыми входными токами и напряжениями смещения. Входные и выходные параметры вольтамперной характеристики регистрировались через аналоговые входы AI0, AI1 комплекса NIELVI-SII, программное обеспечение написано на графическом языке программирования LabVIEW. Аппарат-

ный комплекс допускает измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) в постоянном и переменном токе с частотой от 0,2 Гц до 5 МГц. В результате модификации рабочие диапазоны измеряемых напряжений и силы тока варьировались от 0 до 350 В и от 100 пкА до 1 мА соответственно.

Методика измерения осуществлялась следующим образом. Образцы помещали в термостат, где нагревались с шагом 10 °С, электропроводность измерялась в температурном диапазоне от 20 до 210 °С.

Вольтамперные характеристики образца регистрировались при разности потенциалов от 0 до 350 В и при температурах 20, 50, 80, 100, 150 и 200 °С. Как следует из приведенных данных (рисунок 1), при температурах до 100 °С сила тока резко увеличивается от 0 до $5 \cdot 10^{-8}$ А при напряжении свыше 200 В. При нагревании свыше 100 °С наблюдается типичная омовская зависимость силы тока от напряжения, причем сопротивление образца уменьшается от 75 МОм при 100 °С до 3,2 МОм при 200 °С.

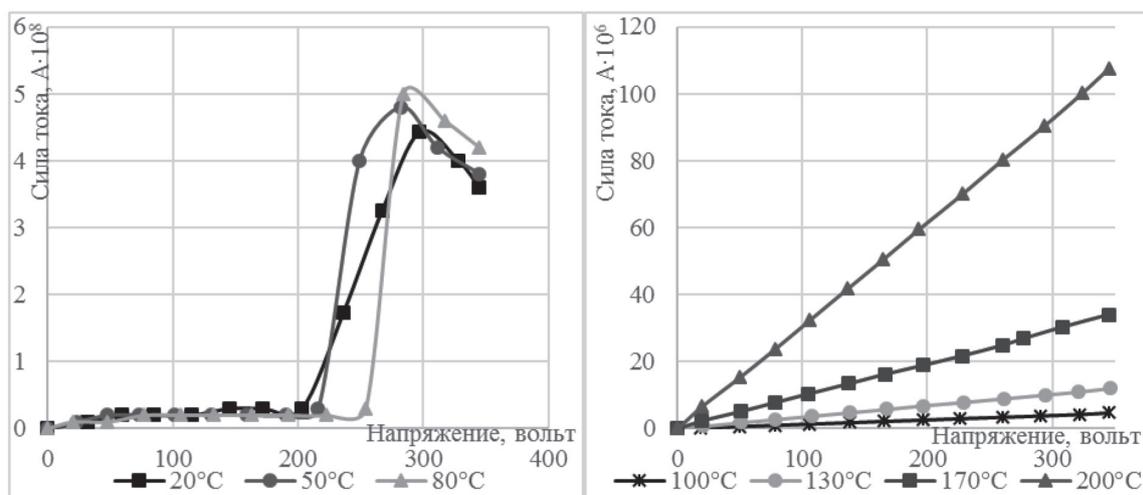


Рис. 1. Вольтамперные характеристики асфальта пропановой деасфальтизации

Установлен температурный эффект гистерезиса электропроводности (рис. 2).

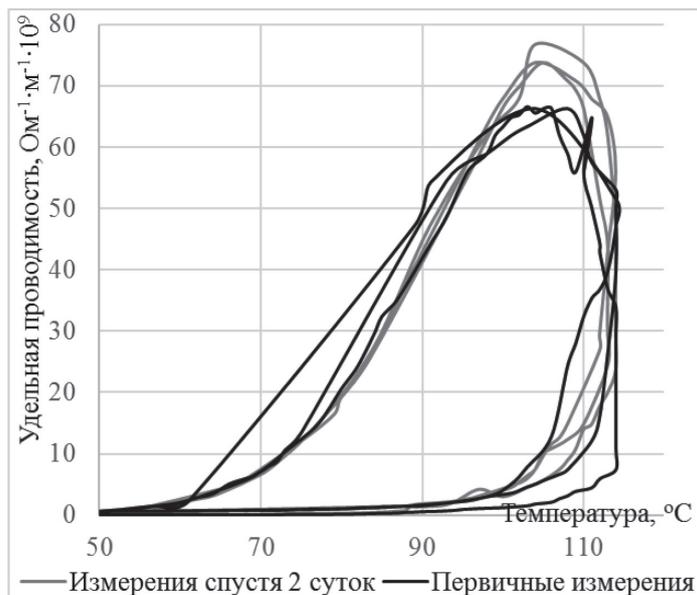
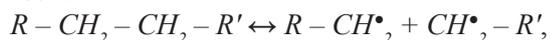


Рис. 2. Температурный гистерезис удельной электропроводности образцов

Первичный цикл гистерезисных петель характеризуется предельно низкой электропроводностью образца до 100 °С, менее интенсивным ростом электропроводности в области 100–113 °С по сравнению с последующими измерениями и резким ростом электропроводности на отметке 114 °С. Последующие два цикла отличаются от первого более пологим ростом электрической проводимости образца и повышенной проводимостью в низкотемпературной области.

По-видимому, эффект гистерезиса связан с обратимым гомолитическим расщеплением ослабленных сопряжением с ароматическими структурами π-связей:



где R и R' – полициклические ароматические фрагменты или бензольные ядра.

С ростом температуры равновесие смещается в правую сторону.

Как следует из рисунка 3, проводимость материала изменяется неоднородно и имеет три линейных участка. Оценка энергии активации электропроводности проведена по уравнению Аррениуса (уравнение 1):

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{-\Delta E_0}{2 \cdot R \cdot T}} \tag{1}$$

где σ_0 – постоянная величина; $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, K ; ΔE – энергия активации электропроводности.

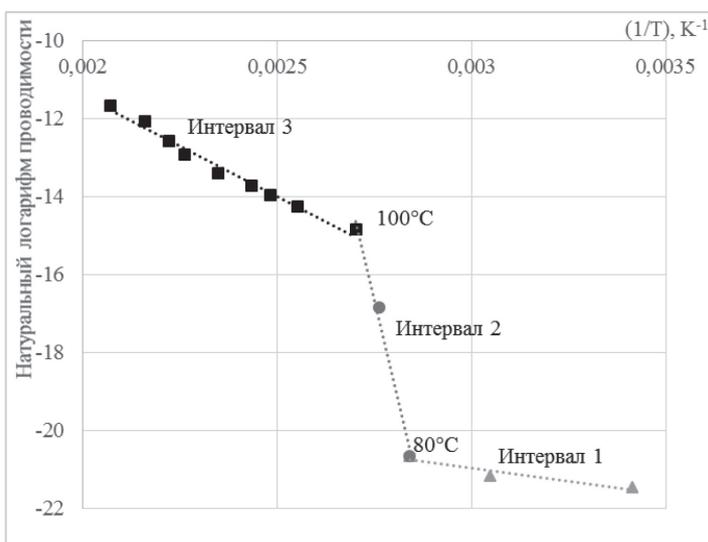


Рис. 3. Зависимость натурального логарифма удельной проводимости образцов от обратной температуры

Интервал 1 находится в температурной области от 20 до 80 °С. В пределах указанных температур образец материала ведет себя как диэлектрик, причем электропроводность увеличивается на 2 порядка. Соответствующая этому интервалу энергия активации электропроводности составляет 0,22 эВ, что сопоставимо с энергией слабых химических связей, распадающихся на свободные радикалы. По-видимому, подобное накопление носителей заряда связано с гомолитической диссоциацией ослабленных сопряжением ароматических связей и увеличением электронно-акцепторных центров, повышающих электропроводность.

При температуре от 80 до 100 °С наблюдается резкое увеличение проводимости, более чем в 5000 раз, которое, по-видимому, связано с увеличением молекулярной подвижности частиц конденсированной фазы в результате процессов расстекловывания. Такой резкий скачкообразный рост электропроводности с одновременным увеличением энергии активации не может быть объяснен с позиции классической зонной теории проводимости и обусловлен проявлением процесса размягчения спиновых стекол.

Рост электропроводности в таких системах связан с разрушением связей между структурными элементами и взаимодействующими спинами, кроме того, дополнительно образуются пары электронов в α и β состояниях.

При температуре от 100 до 210 °С наблюдается дальнейший рост электропроводности, который, по всей вероятности, связан с образованием акцепторов электрона в результате гомолитической диссоциации углеродных связей. Важно отметить, что в этой области наблюдается малая энергия диссоциации, 0,88 эВ на молекулу, что означает практически свободное проникновение электронов в зону проводимости.

Список литературы

1. *Доломатов М.Ю.* Особенности электропроводности и свойств аморфных полупроводников на основе асфальтенов [Текст] / М.Ю. Доломатов, С.А. Шуткова, А.Г. Кавыев, Э.А. Юсупов, В.Н. Гордеев, Ю.В. Челноков // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* – 2013. – № 3. – С. 109–114.
2. *Доломатов М.Ю.* Технология получения полупроводниковых материалов на основе нефтяных

асфальтенов [Текст] / М.Ю. Доломатов, С.В. Дезорцев, С.А. Шуткова // *Химическая технология.* – 2012. – № 2. – С. 88–92.

3. *Парамагнетизм нефтяных дисперсных систем и природа асфальтенов* [Текст] / Ф.Г. Унгер, Л.Н. Андреева. – Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. – 29 с.

4. *Доломатов М.Ю.* Структурно-химические характеристики модельных молекулярных фрагментов нефтяных асфальтенов [Текст] / М.Ю. Доломатов, С.В. Дезорцев, С.А. Шуткова // *Нефтехимия.* – 2012. – № 4. – С. 1–5.

5. *Lachinov A.N.* Thermostimulated switching in thin polymer films [Text] / A.N. Lachinov, A.Yu. Zherebov, M.G. Zolotukhin // *Synthetic Metals.* – 1993. – V. 59. – P. 377–386.

6. *NIELVISII.* Руководство пользователя [Электронный ресурс]. National Instrument, 2008. – Режим доступа: ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/ni_elvis/ni_elvis_2_user_guide.pdf, свободный.

References

1. *Dolomatov M.Ju.* Osobennosti jelektroprovodnosti i svojstv amorfnyh poluprovodnikov na osnove asfal'tenov [Tekst] / M.Ju. Dolomatov, S.A. Shutkova, A.G. Kavyev, Je.A. Jusupov, V.N. Gordeev, Ju.V. Chelnokov // *Jelektrotehničeskie i informacionnye komplekсы i sistemy.* – 2013. – № 3. – S. 109–114.

2. *Dolomatov M.Ju.* Tehnologija poluchenija poluprovodnikovyh materialov na osnove neftjanyh asfal'tenov.[Tekst] / M.Ju. Dolomatov, S.V. Dezorcev, S.A. Shutkova // *Himicheskaja tehnologija.* – 2012. – № 2. – S. 88–92.

3. *Paramagnetizm neftjanyh dispersnyh sistem i priroda asfal'tenov* [Tekst] / F.G. Unger, L.N. Andreeva. – Tomsk: TF SO AN SSSR, 1986. – 29 s.

4. *Dolomatov M.Ju.* Strukturno-himicheskije harakteristiki model'nyh molekulyarnyh fragmentov neftjanyh asfal'tenov [Tekst] / M.Ju. Dolomatov, S.V. Dezorcev, S.A. Shutkova // *Neftehimija.* – 2012. – № 4. – S. 1–5.

5. *Lachinov A.N.* Thermostimulated switching in thin polymer films [Text] / A. N.Lachinov, A.Yu. Zherebov, M.G. Zolotukhin // *Synthetic Metals.* – 1993. – V. 59. – P. 377–386.

6. *NIELVISII.* Rukovodstvo pol'zovatel'ja: [Jelektronnyj resurs]. National Instrument, 2008. Rezhim dostupa: ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/ni_elvis/ni_elvis_2_user_guide.pdf, svobodnyj.

ОБ АВТОРАХ

Августинович Анастасия Викторовна, магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: avgustinovich-a@mail.ru, Россия, г. Уфа.

Аипов Рустам Сагитович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: nugraush@rambler.ru, Россия, г. Уфа.

Акчурин Салават Вагимович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: salavat-av@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

Андрианова Анна Владимировна, аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: annette210590@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Андроников Дмитрий Александрович, главный технолог ООО «НТЦ ТПТ», Россия, г. Санкт-Петербург.

Бахтизин Рауф Загидович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: petrovnanochemistry@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Гайсин Булат М. преподаватель кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: gb9688@ua.ru, Россия, г. Уфа.

Гайфуллин Гаяз Закирович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технический сервис» Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, e-mail: gajfullin.48@mail.ru, Республика Казахстан, г. Костанай.

Гумерова Марина Булатовна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Дебелов Владимир Валентинович, аспирант кафедры «Современное естествознание», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, г. Тольятти.

Денисова Ольга Аркадьевна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Россия, г. Уфа.

Доломатов Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Физическая электроника и нанофизика», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: dolomatov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Зотов Кирилл Николаевич, старший преподаватель кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Россия, г. Уфа.

Исмагилов Флюр Рашитович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Ишмухамедов Ислам Камилевич, магистрант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: islamius2008@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

Карабельская Ирина Владимировна, аспирант кафедры «Физика», доцент кафедры «Информатика и ИКТ», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: iktugaes@mail.ru, Россия, г. Уфа.

Козловский Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Современное естествознание», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, г. Тольятти.

Кошкин Игорь Владимирович, канд. техн. наук, зав. кафедрой «Электроэнергетика и физика» Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, e-mail: koshkin@mail.kz, Республика Казахстан, г. Костанай.

Крылов Анатолий Олегович, студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: anatolykrylov92@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Кузнецов Игорь Васильевич, д-р техн. наук, проф. кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Россия, г. Уфа.

Кулябин Алексей С., студент кафедры «Общенаучные дисциплины», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: tattin76@mail.ru, Россия, г. Салават.

Кушнир Валентина Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Машины, тракторы и автомобили» Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, e-mail: valkush@mail.ru, Республика Казахстан, г. Костанай.

Левина Татьяна Михайловна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Общенаучные дисциплины» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: tattin76@mail.ru, Россия, г. Салават.

Лопатин Виталий Прокопьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: islamius2008@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

Мешков Иван Константинович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Россия, г. Уфа.

Огорелков Борис Иванович, канд. техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», e-mail: ogorelkov@omgtu.ru, Россия, г. Омск.

Петров Алексей Михайлович, аспирант кафедры «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: petrovnanotechnology@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Пимонова Ульяна Викторовна, магистрант кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», e-mail: you_nova@mail.ru, Россия, г. Омск.

Поляков Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», Россия, г. Омск.

Пугачев Владимир Валерьевич, преподаватель кафедры «Электротехнологии и электрооборудование» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный аграрный университет», e-mail: salavat-av@yandex.ru, Россия, г. Оренбург.

Пьянов Михаил Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Современное естествознание», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, г. Тольятти.

Рыжиков Олег Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: petrovnanotechnology@gmail.com, Россия, г. Уфа

Салов Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего обра-

зования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Россия, г. Уфа.

Саттаров Роберт Радилович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Симбирцева Дарья Сергеевна, студентка кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Россия, г. Уфа.

Сираев Ринат Магнавиевич, студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: siraevrm91@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Славутский Александр Леонидович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», e-mail: slavutskii@gmail.com, Россия, г. Чебоксары.

Стрельникова Любовь Владиславовна, студентка кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Россия, г. Уфа.

Султанов Альберт Ханович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Россия, г. Уфа.

Татевосян Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», e-mail: ast_51@mail.ru, Россия, г. Омск.

Ураксеев Марат Абдуллович, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: uma1941@mail.ru, Россия, г. Уфа.

Федосов Василий Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины, аппараты, приборы и технологии сервиса», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: avgustinovich-a@mail.ru, Россия, г. Уфа.

Хакимьянов Марат Ильгизович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, Россия, г. Уфа.

Шамаев Фанис Ф., магистр кафедры «Общенаучные дисциплины», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: tattin76@mail.ru, Россия, г. Салават.

Яруллин Ринат Бариевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Машины, аппараты, приборы и технологии сервиса», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: rin.yarullin@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

ABOUT THE AUTHORS

Aipov Rustam S., dr. sci. tech., professor chair of «Electrical machines and equipment», Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir state agrarian university», e-mail: nugraush@rambler.ru, Russia, Ufa.

Akchurin Salavat V., cand. sci. tech., senior lecturer chair of «Electrical machines and equipment», Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir state agrarian university», e-mail: salavat-av@yandex.ru, Russia, Ufa.

Andrianova Anna V., post-graduate student chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: annette210590@gmail.com, Russia, Ufa.

Andronikov Dmitry A., chief technologist of LLC «STC TFT», Russia, Saint-Petersburg.

Avgustinovich Anastasia V., undergraduate chair of «Industrial safety and labor protection», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: avgustinovich-a@mail.ru, Russia, Ufa.

Bakhtizin Rauf Z., dr. tech. phys.-math., prof., head chair of «Physical Electronics and Nanophysics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir State University», e-mail: petrovnanochemistry@gmail.com, Russia, Ufa.

Debelov Vladimir M., post-graduate student chair of «Modern Natural Sciences», Federal state budgetary educational institution of higher education «Volga Region State University of Service», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Togliatty.

Denisova Olga A., dr. tech. phys.-math., associate professor, head chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Russia, Ufa.

Dolomatov Michail Yu., cand. sci. tech., dr. sci. chem, professor chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», head of the laboratory «Electronics and Nanotechnology», e-mail: dolomatov@gmail.com, Russia, Ufa.

Fedosov Vasily A., cand. sci. tech., associate professor chair of «Machines, apparatuses, devices and service technologies», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: avgustinovich-a@mail.ru, Russia, Ufa.

Gaifullin Gayaz Z., dr. sci. tech., professor chair of «Technical service», Kostanay state university named after A. Baitursynov, e-mail: gajfullin.48@mail.ru, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

Gaisin Bulat M., lecturer chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: gb9688@ya.ru, Russia, Ufa.

Gumerova Marina B., cand. sci. tech., associate professor chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Russia, Ufa.

Ishmukhamedov Islam K., undergraduate chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: islamius2008@yandex.ru, Russia, Ufa.

Ismagilov Flur R., dr. sci. tech., professor, head chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Russia, Ufa.

Karabelskaya Irina V., post-graduate student, associate professor chair of «Informatics and ICT», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: iktugaes@mail.ru, Russia, Ufa.

Khakimyanov Marat I., cand. sci. tech., associate professor chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: hakimyanovmi@gmail.com, Russia, Ufa.

Koshkin Igor V., cand. sci. tech., head chair of «Electric Power and Physics», Kostanay state university named after A. Baitursynov, e-mail: koshkin@mail.kz, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

Kozlovskiy Vladimir N., dr. sci. tech., professor, head chair of «Modern Natural Sciences», Federal state budgetary educational institution of higher education «Volga Region State University of Service», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Togliatty.

Krylov Anatoly O., student chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: anatologykrylov92@gmail.com, Russia, Ufa.

Kuliabin Alexei S., student chair of «Scientific disciplines», branch Federal state budgetary educational institution of

higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: tattin76@mail.ru, Russia, Salavat.

Kushnir Valentina G., dr. sci. tech., professor, head chair of «Machinery, tractors and automobiles», Kostanay state university named after A. Baitursynov, e-mail: valkush@mail.ru, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

Kuznetsov Igor V., dr. sci. tech., professor chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Russia, Ufa.

Levina Tatiana M., cand. sci. tech., associate professor, head chair of «Scientific disciplines», branch Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: tattin76@mail.ru, Russia, Salavat.

Lopatin Vitaliy P., cand. sci. tech., associate professor chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: islamius2008@yandex.ru, Russia, Ufa.

Meshkov Ivan K., cand. sci. tech., associate professor chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Russia, Ufa.

Ogorelkov Boris I., cand. sci. tech., professor chair of «Theoretical and general electrical engineering», Federal state budgetary educational institution of higher education «Omsk state technical university», e-mail: ogorelkov@omgtu.ru, Russia, Omsk.

Petrov Alexei M., post-graduate student chair of «Physical Electronics and Nanophysics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir State University», e-mail: petrovnanochemistry@gmail.com, Russia, Ufa.

Pianov Michail A., cand. sci. tech., associate professor chair of «Modern Natural Sciences», Federal state budgetary educational institution of higher education «Volga Region State University of Service», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Togliatty.

Pimonova Uliana V., undergraduate chair of «Theoretical and general electrical engineering», Federal state budgetary educational institution of higher education «Omsk state technical university», e-mail: you_nova@mail.ru, Russia, Omsk.

Polyakov Dmitry A., post-graduate student chair of «Theoretical and general electrical engineering», Federal state budgetary educational institution of higher education «Omsk state technical university», e-mail: polyakowdmitry@yandex.ru, Russia, Omsk.

Pugachev Vladimir V., lecturer chair of «Electrotechnology and electrical», Federal state budgetary educational institution of higher education «Orenburg state agrarian university», e-mail: salavat-av@yandex.ru, Russia, Orenburg.

Ryjikov Oleg L., cand. sci. tech., associate professor chair of «Physical Electronics and Nanophysics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir State University», e-mail: petrovnanochemistry@gmail.com, Russia, Ufa.

Salov Alexander S., cand. sci. tech., associate professor chair of «Roads and construction technologies» Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Russia, Ufa.

Sattarov Robert R., dr. sci. tech., professor chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Russia, Ufa.

Shamaev Fanis F., undergraduate chair of «Scientific disciplines», branch Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: tattin76@mail.ru, Russia, Salavat.

Simbirtseva Daria S., student chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Russia, Ufa.

Siraev Rinat M., student chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: siraeprm91@gmail.com, Russia, Ufa.

Slavutski Alexander L., post-graduate student chair of «Power supply of industrial enterprises» Federal state budgetary educational institution of higher education «The Ulianov chuvash state university», e-mail: slavutskii@gmail.com, Russia, Cheboksary.

Strelnikova Lubov V., student chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution

of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Russia, Ufa.

Sultanov Albert Kh., dr. sci. tech., prof., head chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Russia, Ufa.

Tatevosyan Alexander S., cand. sci. tech., associate professor chair of «Theoretical and general electrical engineering», Federal state budgetary educational institution of higher education «Omsk state technical university», e-mail: ast_51@mail.ru, Russia, Omsk.

Urakseev Marat A., dr. sci. tech., professor chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: uma1941@mail.ru, Russia, Ufa.

Yarullin Rinat B., dr. sci. tech., associate professor, prof. chair of «Machines, apparatuses, devices and service technologies», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: rin.yarullin@yandex.ru, Russia, Ufa.

Zotov Kirill N., senior lecturer chair of «Telecommunication systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Russia, Ufa.

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 7.1-2003 или 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: **uop-ugaes@mail.ru**.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельным файлом.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (до 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 ВПО «УГУЭС» 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 («»).

Помните 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, are new, are interested in 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 7.1-2003 or 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 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 a color photo of the authors in a separate file (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 at least, 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 FSEI HE «USUES» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and tabular 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 are 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:

- DO NOT use the tab key (Tab);
- DO NOT place your paragraph styles (other than the defaults);
- DO NOT set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- DO NOT 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 between hyphens and dashes. Dash exhibited 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.

