

ISSN 1999-5458

Подписной индекс: 91824 в каталоге «Пресса России»

Группы научных специальностей, по которым ведется прием статей в научный журнал «Электротехнические и информационные комплексы и системы»:

05.09.00 Электротехника

05.11.00 Приборостроение, метрология
и информационно-измерительные приборы и системы

05.12.00 Радиотехника и связь

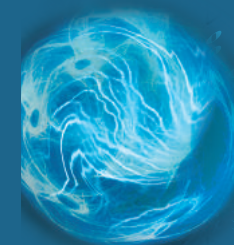
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.27.00 Электроника



Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 3, т. 13, 2017

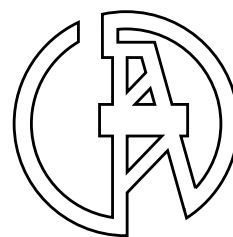


Electrical and data processing facilities and systems

№ 3, т. 13, 2017



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 3, т. 13, 2017

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

Учредитель

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

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

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:


Главный редактор:


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


Зам. главного редактора:


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


Члены редакционной коллегии:


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


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


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


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


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


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


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


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


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


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


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


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


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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте www.ugnetu.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77–67387 от 05.10.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2017.

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

Тел.: (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 22.09.2017 г. Формат 60x84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,0.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 210.

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

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

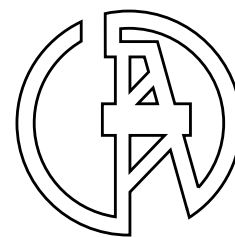
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 3, v. 13, 2017

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

Founder

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

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

International standard serial number ISSN 1999-5458.

Editorial board:

Editor-in-chief:

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

Deputy editor-in-chief:

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

Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



Assistant editor: A.A. Mukhamadiev

Technical editor: S.V. Khalitova

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

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

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2017.

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

Tel. (347) 243–16–19, ies.rusoil.net

Price is free. 12+

Publishing authorized on 22.09.2017. Paper format 60×84/8. Offset printing. 12,0 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 210.

Address of Publishing Office: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without prior written consent of the Editors office of the «Bulletin USPTU. Science, education, economy. Series economy».

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Калий В.А., Скварский П.А., Караваев А.А., Полихач Е.А.</i> Оценка показателей качества опытных образцов генераторов ГСР-40НЧ при испытаниях на холостом ходу	5
<i>Зикий А.Н., Андрианов А.В., Зламан П.Н.</i> Моделирование и экспериментальное исследование PIN-диодного выключателя	10
<i>Денисов В.А., Третьякова М.Н., Бородин О.А., Макаров С.В.</i> Исследование динамических характеристик пропорционального электромагнита	16
<i>Хузязшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И., Тукаев С.М.</i> Исследование скорости распространения сигналов переходных процессов по воздушным линиям электропередачи	24
<i>Яхшибаева Л.М., Чатурова Д.И.</i> Технологический комплекс подогрева для подводных трубопроводов на основе индукционной нагревательной системы <i>Yakhibbaeva L.M., Chaturova D.I.</i> Technological heating complex for subsea pipelines based on induction heating system	32

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Ерохин В.В.</i> Бикритериальная оптимизация мощности сигнала транспондера системы автоматического зависимого наблюдения	37
<i>Султанов А.Х., Мешков И.К., Мешкова А.Г., Иванов В.В.</i> Подавление внеполосного излучения и повышение спектральной эффективности систем OFDM в сетях цифрового телерадиовещания	43
<i>Мухаметзянов Э.В., Родионов А.С.</i> Автоматизированная система мониторинга и анализа состояния ульев на пасеке	51
<i>Журавлева Н.А., Кутуева А.В., Долматов М.Ю., Быстров А.И.</i> Алгоритм программы оптимизации технологического процесса пиролиза многокомпонентных углеводородных систем с целью достижения максимального выхода целевого продукта	56
<i>Сироткин С.Л., Коньков А.Н.</i> Методы обнаружения конфликтов в локальных вычислительных сетях	63

МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

<i>Алиев И.М., Алиев А.М.</i> Интеллектуализация измерительных преобразователей электрической мощности переменного тока	71
<i>Харисова З.И.</i> Конструкция проточной измерительной камеры в составе системы гранулометрического анализа жидких дисперсных сред	75
<i>Денисова О.А., Абрамишвили Р.Л.</i> Метод индикации вибрации механизмов, основанный на акустооптическом эффекте в нематических жидких кристаллах	79
<i>Муллагалиев И.Н., Сафаргалин И.Н., Салихов Р.Б.</i> Химические датчики на основе тонких полимерных пленок	86
Об авторах	92

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Kaliy V.A., Skvarskiy P.A., Karavayev A.A., Polikhach Ye.A.</i> Estimation of quality indicators of experimental samples of GSR-40NCH generators at the idle test	5
<i>Zikiy A.N., Andrianov A.V., Zlaman P.N.</i> Modeling and experimental study of pin-diode switch	10
<i>Denisov V.A., Tretyakova M.N., Borodin O.A., Makarov S.V.</i> Research of dynamic characteristics of the proportional electromagnet	16
<i>Khuzyashev R.G., Kuzmin I.L., Novikov S.I., Tukaev S.M.</i> Investigation of the speed of propagation of the transient signals over overhead power lines	24
<i>Yakhibbaeva L.M., Chaturova D.I.</i> Technological heating complex for subsea pipelines based on induction heating system	32

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Erokhin V.V.</i> Bicriterial optimization of the transponder signal power of the automatic dependent surveillance system	37
<i>Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Meshkova A.G., Ivanov V.V.</i> Out-of-band emission suppression and spectral efficiency improvement of the OFDM system in digital broadcasting networks	43
<i>Mukhametzyanov E.V., Rodionov A.S.</i> Automated system monitoring and analysis of the status of the hives in the apiary	51
<i>Zhuravleva N.A., Kutueva A.V., Dolomatov M.Yu., Bystrov A.I.</i> Development of the program for the calculation of the products equilibrium yields by the pyrolysis process of multicomponent hydrocarbonic systems	56
<i>Sirotkin S.L., Konkov A.N.</i> The methods for detection of conflict in local area networks	63

METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>Aliyev I.M., Aliyev A.M.</i> Intelligence of measuring transducers of AC power	71
<i>Kharisova Z.I.</i> The flow measuring chamber construction of the particle size analysis system for liquid disperse media	75
<i>Denisova O.A., Abramishvili R.L.</i> Method of indication of vibration of mechanisms based on acousto-optic effect in nematic liquid crystals	79
<i>Mullagaliev I.N., Safargalin I.N., Salikhov R.B.</i> Chemical sensors based on thin polymer films	86
About the authors	92



Калий В. А.
Kaliy V. A.

кандидат технических наук,
главный конструктор
ОКБ АО «Уфимское агрегатное
производственное объединение»,
г. Москва, Российская Федерация



Скварский П. А.
Skvarskiy P. A.

ведущий конструктор
ОКБ АО «Уфимское агрегатное
производственное объединение»,
г. Москва, Российская Федерация



Караваяев А. А.
Karavayev A. A.

инженер-технолог
АО «Уфимское агрегатное
производственное объединение»,
г. Уфа, Российская Федерация



Полихач Е. А.
Polikhach Ye. A.

кандидат технических наук,
инженер-конструктор
АО «Уфимское агрегатное
производственное объединение»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.31

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ГЕНЕРАТОРОВ ГСР-40НЧ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ

В настоящей статье рассмотрены испытания первого опытного образца синхронного генератора ГСР-40НЧ, предназначенного для применения в качестве основного источника на новом военно-транспортном самолете Ил-112В. Одними из основных параметров качества электрической энергии согласно ГОСТ Р 54073-2010 в статических режимах работы генератора, которые определяются качеством разработки магнитной системы и обмотки якоря основного генератора, являются: коэффициент искажения для первичных и вторичных источников питания при наличии нелинейной, несимметричной и импульсно-периодической нагрузке, не более 0,8 (8 %); коэффициент амплитуды — от 1,31 до 1,51. В статье рассмотрены основные показатели качества в статических режимах, которые определяются как в режимах нагрузки, так и при холостом ходе и позволяют оценить качество изготовления электромагнитной системы основного генератора. При испытаниях без регулятора напряжения были получены мгновенные значения фазных напряжений на холостом ходе при частоте вращения 8000 об/мин. Также была проведена идентификация проведенных испытаний, построены графики одного периода выходного напряжения в абсолютных единицах для различных токов возбуждения. Результаты испытаний первого опытного образца ГСР-40НЧ

№ 170501 без нагрузки показали, что при работе генератора на холостом ходу с частотой вращения 8000 об/мин коэффициент амплитуды составляет 1,5. Коэффициент нелинейных искажений практически не превышает 3 %, что позволяет сделать вывод о том, что эти измеренные и идентифицированные показатели качества в полной мере соответствуют требованиям ГОСТ Р 54073-2010. При проектировании синхронного генератора ГСР-40НЧ применялась распределенная трехфазная двухслойная обмотка якоря с укороченным шагом 2/3. Синхронные генераторы ГСР-40НЧ разработаны и изготавливаются в АО «УАПО». Для дальнейшей оптимизации конструкции синхронного генератора ГСР-40НЧ и максимально возможного снижения влияния 5-й и 7-й гармонических составляющих будет проведен сравнительный анализ с применением трехфазной обмотки якоря с укорочением 4/5.

Ключевые слова: синхронный генератор, система электроснабжения летательного аппарата, коэффициент нелинейных искажений, форма кривой напряжения.

ESTIMATION OF QUALITY INDICATORS OF EXPERIMENTAL SAMPLES OF GSR-40NCH GENERATORS AT THE IDLE TEST

This article describes testing of the first prototype of the synchronous generator GSR-40NCh intended for use as a primary source of new military transport aircraft Il-112V. One of the main quality parameters of electric energy according to GOST R 54073-2010 in the static generator operation modes, which are determined by the quality of the magnetic system and winding design of the main generator are followings: a distortion coefficient for the primary and secondary power sources in the presence of nonlinear, single-ended and periodic-pulsed load below 0.8 (8%); the amplitude coefficient is from 1.31 to 1.51. The article describes the main quality indicators in static modes, which are defined in the load mode and at idle. They allow the electromagnetic system quality assessment of the main generator. In tests without a voltage regulator, the phase voltage instantaneous values at the idle were obtained at a speed of 8000 rpm. The test identification was carried out. Graphs of one output voltage period in absolute units were plotted for different excitation currents. The test results of the first prototype GSR-40NCh No. 170501 without load show that when the generator is idling at a speed of 8000 rpm, the amplitude coefficient is 1.5. The nonlinear distortion coefficient practically does not exceed 3 %, which allows to conclude that these measured and identified quality indicators fully comply with the requirements of GOST R 54073-2010. For GSR-40NCh synchronous generator design, a distributed three-phase two-layer armature winding with a shortened step of 2/3 was used. Synchronous generators GSR-40NCh developed and manufactured in JSC «УАПО». To further optimize the synchronous generator GSR-40NCh design and the maximum possible reduction of the 5th and 7th harmonic components influence, a comparative analysis will be performed using a three-phase armature winding with a shortening of 4/5.

Key words: synchronous generator, power supply system of the aircraft, nonlinear distortion coefficient, voltage curve shape.

Система электроснабжения самолета Ил-112В состоит из двух идентичных каналов первичной системы генерирования СГ-112-115 трехфазного переменного тока напряжением 115/200 В с частотой, изменяющейся в диапазоне от 360 до 480 Гц [1–5]. Номинальная мощность канала составляет 40 кВА, максимальная — 80 кВА в течение 5 с. Источником электроэнергии является синхронный генератор ГСР-40НЧ, разработанный и изготовленный в АО «УАПО».

Одними из основных параметров качества электрической энергии, согласно ГОСТ Р

54073-2010, в статических режимах работы генератора, которые определяются качеством разработки магнитной системы и обмотки якоря основного генератора, являются:

— коэффициент искажения для первичных и вторичных источников питания при наличии нелинейной, несимметричной и импульсно-периодической нагрузке, не более 0,8 (8 %);

— коэффициент амплитуды — от 1,31 до 1,51.

Так, анализ спектра формы кривой серийного синхронного генератора ГТ40ПЧ8Б

показывает, что в выходном напряжении присутствуют 5-я и 7-я гармоники. Однако коэффициент нелинейных искажений не превышает 4,425 % при работе генератора на холостом ходу при частоте вращения 8000 об/мин (рисунок 1).

При испытаниях первого опытного образца ГСР-40НЧ № 170501 в АО «УАПО» без регулятора напряжения были получены мгновенные значения фазных напряжений

на холостом ходу при частоте вращения 8000 об/мин (рисунок 2). Испытания показали, что в выходном напряжении нового генератора, как и в серийном генераторе, присутствуют 5-я и 7-я гармоники (рисунок 2). Однако коэффициент нелинейных искажений у новой электрической машины снижен до 3,09 % (рисунок 3) при токе возбуждения 1,5 А и выходном напряжении 133 В. Коэффициент амплитуды 1,50.

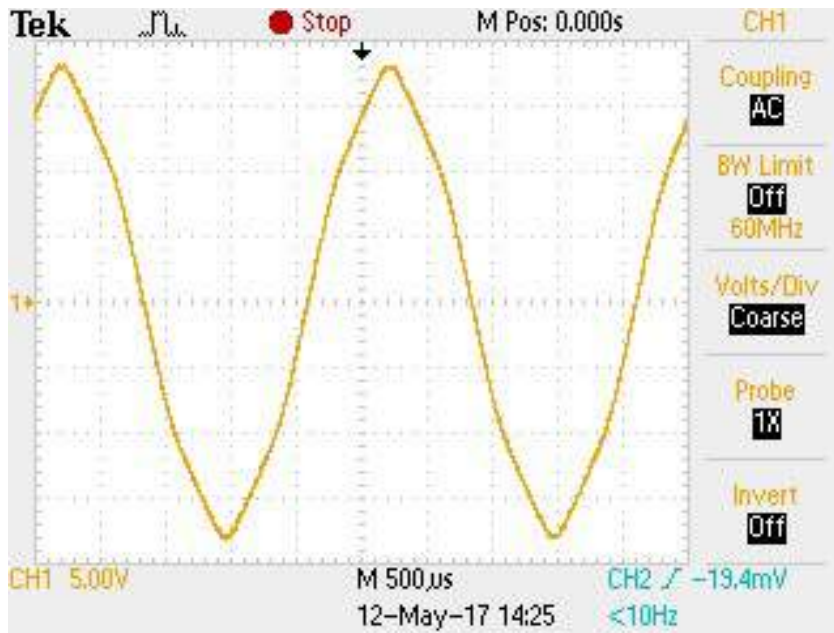


Рисунок 1. Выходное фазное напряжение генератора ГТ40ПЧ8В на холостом ходу при 8000 об/мин

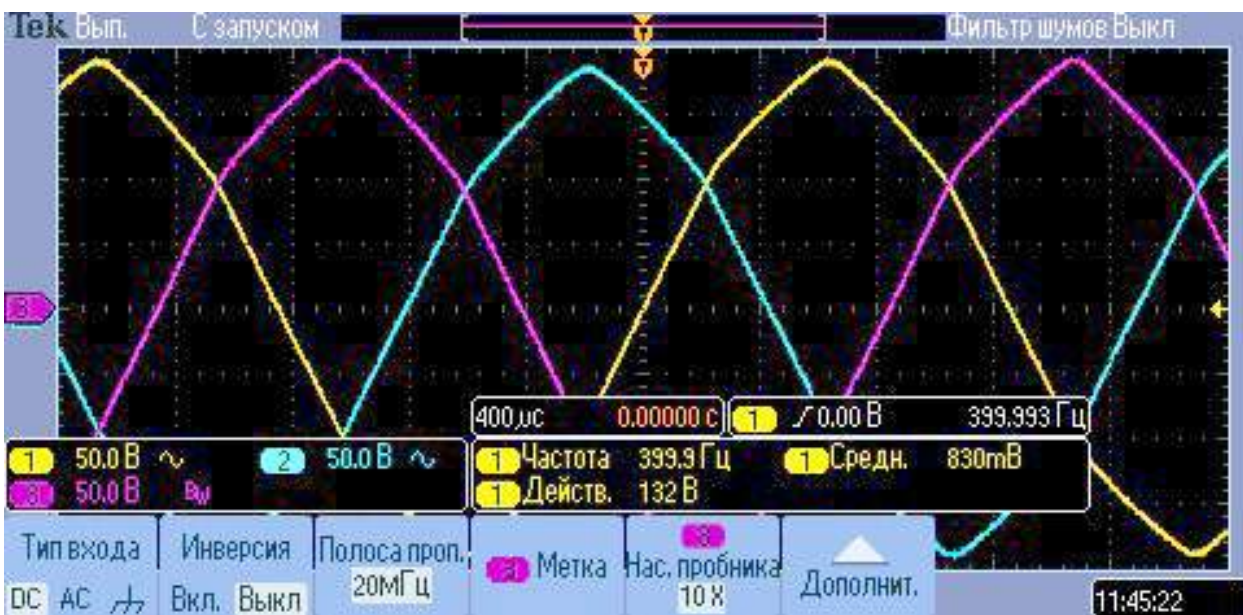


Рисунок 2. Осциллограммы фазных напряжений ГСР-40НЧ при частоте вращения 8000 об/мин

В обязательном порядке для теоретического анализа была проведена идентификация проведенных испытаний, построены графики одного периода выходного напряжения в абсолютных единицах для различ-

ных токов возбуждения (рисунок 4), которые показывают, что при дальнейшем насыщении генератора гармонический состав существенно не изменяется.

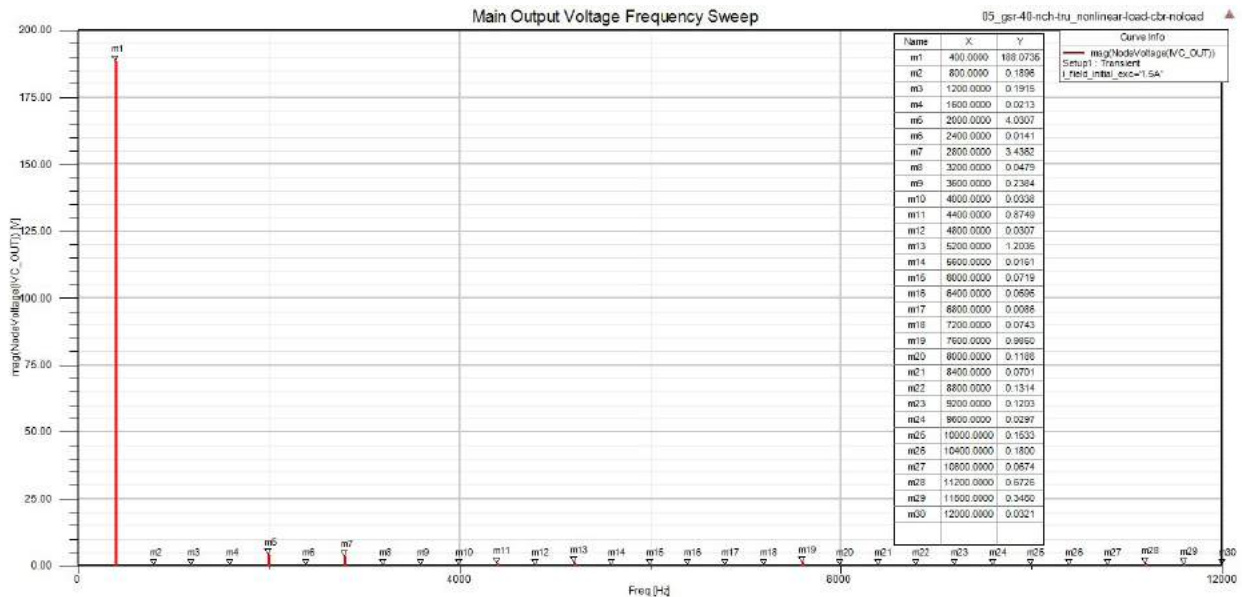


Рисунок 3. Спектр мгновенного значения напряжения фазы ГСР-40НЧ при частоте вращения 8000 об/мин

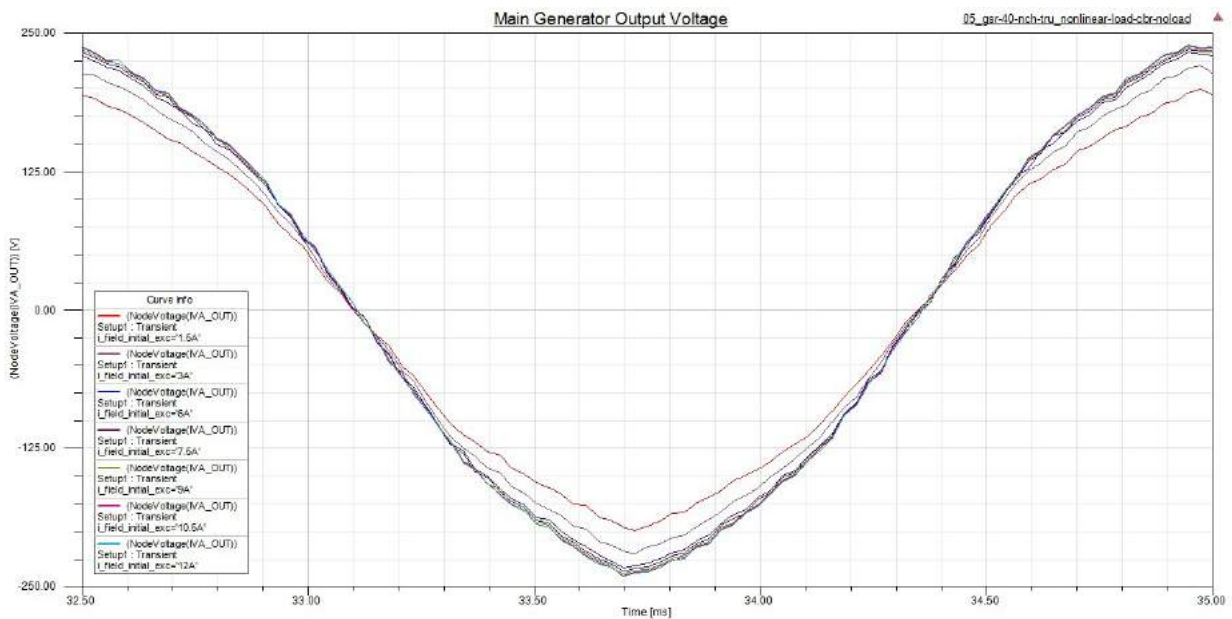


Рисунок 4. Форма мгновенного значения напряжения фазы ГСР-40НЧ при частоте вращения 8000 об/мин

Вывод

Таким образом, результаты испытаний первого опытного образца ГСР-40НЧ № 170501 без нагрузки показали, что при работе генератора на холостом ходу с частотой вращения 8000 об/мин коэффициент амплитуды составляет 1,5. А коэффициент нелинейных искажений практически не пре-

вышает 3 %, что позволяет сделать вывод о том, что эти измеренные и идентифицированные показатели качества в полной мере соответствуют требованиям ГОСТ Р 54073-2010. Здесь же необходимо сказать, что при проектировании синхронного генератора ГСР-40НЧ применялась распределенная трехфазная двухслойная обмотка якоря с

укороченным шагом 2/3. Для дальнейшей оптимизации конструкции синхронного генератора ГСР-40НЧ и максимально возможного снижения влияния 5-й и 7-й гармо-

нических составляющих будет проведен сравнительный анализ с применением трехфазной обмотки якоря с укорочением 4/5.

Список литературы

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1985. 255 с.
2. Зонтов В.М., Куприн Б.В. Системы электроснабжения летательных аппаратов: учеб. для вузов. М.: Типография ВВИА имени Н.Е. Жуковского, 1988. 396 с.
3. Специальные электрические машины. / Под ред. А.И. Бертинова. М.: Энергоиздат, 1982. 552 с.
4. Пospelov Л.И. Конструкции авиационных электрических машин / Под ред. А.Ф. Федосеева. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
5. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969. 632 с.

References

1. But D.A. Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny [Non-Contact Electrical

Machines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1985. 255 p.

2. Zontov V.M., Kuprin B.V. Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov [Systems of Power Supply of Aircraft]. Moscow: Tipografiya VVIA imeni N.Ye. Zhukovskogo, 1988. 396 p.

3. Spetsial'nyye elektricheskiye mashiny [Special Electric Machines] / Ed. by A.I. Bertinov. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 552 p.

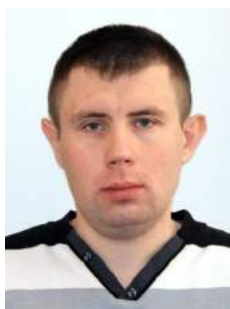
4. Pospelov L.I. Konstruktsiya aviatsionnykh elektromashin [Construction of Aviation Electric Machines]. Moscow: Energiya Publ., 1982. 320 p.

5. Sergeyev P.S., Vinogradov N.V., Goryainov F.A. Proyektirovaniye elektricheskikh mashin [Designing Electrical Machines]. Moscow: Energiya Publ., 1969. 632 p.



Зикий А. Н.
Zikiy A. N.

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



Андреанов А. В.
Andrianov A. V.

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



Зламан П. Н.
Zlaman P. N.

ведущий инженер-
конструктор Научно-
конструкторского бюро
моделирующих
и управляющих систем,
ФГАОУ ВО «Южный
федеральный университет»,
г. Таганрог,
Российская Федерация

УДК 621.396.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ PIN-ДИОДНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Выключатели и другие коммутационные устройства широко используются во входных цепях радиоприемных устройств для переключения каналов, для коммутации гетеродинов, а также в передатчиках для импульсной модуляции сигналов. В последние два десятилетия они стали использоваться в модулях активных фазированных антенных решеток. Имеются многочисленные публикации, направленные на снижение потерь в открытом состоянии, повышение потерь в закрытом состоянии, уменьшение времени переключения, снижение массы и габаритов, уменьшение неравномерности АЧХ.

Целью настоящей работы является моделирование и экспериментальное исследование СВЧ-выключателя.

К нему предъявляются следующие требования:

- диапазон рабочих частот 2-4 ГГц;
- потери в состоянии «открыто» не более 4,5 дБ;
- потери в состоянии «закрыто» не менее 45 дБ;
- волновое сопротивление входа и выхода 50 Ом;
- неравномерность АЧХ в открытом состоянии не более ± 1 дБ;
- ток управления не более 5 мА.

Эти требования можно реализовать по последовательной схеме включения pin-диодов, по параллельной схеме, а также по последовательно-параллельной.

Была выбрана последовательная схема включения диодов. Проведено моделирование и экспериментальное исследование pin-диодного выключателя диапазона 2-4 ГГц. Получены амплитудно-частотные характеристики в открытом и закрытом состояниях. Достигнуты потери в открытом состоянии не более 4,5 дБ, в закрытом состоянии не менее 46 дБ. Неравномерность АЧХ в открытом состоянии не превышает ± 1 дБ. Максимальный ток управления составляет не более 5 мА.

Макет состоит из корпуса рамочного типа, в который была впаяна плата из поликора размерами 30×24×1 мм. На плате были размещены все элементы выключателя, кроме соединителей типа СРГ50-751ФВ. Используются диоды типа 2А536А-5, конденсаторы типа К26-4, катушки индуктивности собственного изготовления. Все pin-диоды установлены в разрывы микрополосковой линии. Для герметизации корпус закрыт двумя крышками. Ввод сигнала управления осуществляется через соединитель СРГ50-751ФВ.

Ключевые слова: выключатель, коммутатор, амплитудно-частотная характеристика, потери в открытом и закрытом состояниях, ток управления, pin-диод.

MODELING AND EXPERIMENTAL STUDY OF PIN-DIODE SWITCH

Switches and other switching devices are widely used in the input circuits of radio receivers for switch channels and for switching local oscillators, as well as in transmitters for signals modulation. In the last two decades they began to be used in modules of active phased antenna arrays. There are numerous publications aimed at reduction of losses in the open state, increasing losses in the closed state, reducing the switching time, reduce the weight and dimensions, reducing uneven frequency response.

The aim of this work is the modeling and experimental study of microwave switch.

It has the following requirements:

- working frequency range 2-4 GHz;
- loss of open state is not more than 4.5 dB;
- the losses in the locked state at least 45 dB;
- the impedance of the input and output 50 Ohms;
- uneven frequency response in open state not more than ± 1 dB;
- control current no more than 5 mA.

These requirements can be implemented via the serial circuit pin diode, parallel circuit, and serial-parallel circuit.

It was selected a serial circuit of diodes inclusion. The simulation and experimental study of pin-diode switch range 2–4 GHz are carried out. The amplitude-frequency characteristics in the open and closed states are obtained. Losses achieved in the open state is not more than 4.5 dB, it in the closed state is not less than 46 dB. The flatness in the open position does not exceed ± 1 dB. The maximum current is 5 mA.

The model consists of the frame type case, in which was soldered a board made of ceramics size 30×24×1 mm. On the board were placed all the elements of the switch except the connector СРГ50-751ФВ. Used diodes type are 2А536А-5, type capacitors are К26-4, inductors are of their own making. All pin-diodes are mounted in a microstrip line breaks. For sealing the case is closed by two covers. The input control signal is through the connector СРГ50-751ФВ.

Key words: switch, commutator, frequency response, losses in open and closed conditions, control current, pin diode.

Имеющаяся обширная литература по выключателям СВЧ-диапазона [1–10] позволила обоснованно выбрать последовательную схему включения диодов в выключателе. Этот вариант имеет простую конструкцию по сравнению с параллельным включением диодов, однако при этом имеет сильную неравномерность потерь в закрытом состоянии.

Для получения первичного варианта схемы выключателя и оптимизации его параметров было проведено моделирование выключателя в пакете прикладных программ Microwave Office [11]. Окончательный

вариант модели выключателя показан на рисунке 1. На рисунке 2 можно видеть АЧХ выключателя в открытом состоянии. На рисунке 3 изображена АЧХ выключателя в закрытом состоянии при токе управления 0 мА.

Для проверки правильности результатов моделирования, отработки схемы и конструкции выключателя было проведено его экспериментальное исследование на макете. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 4.

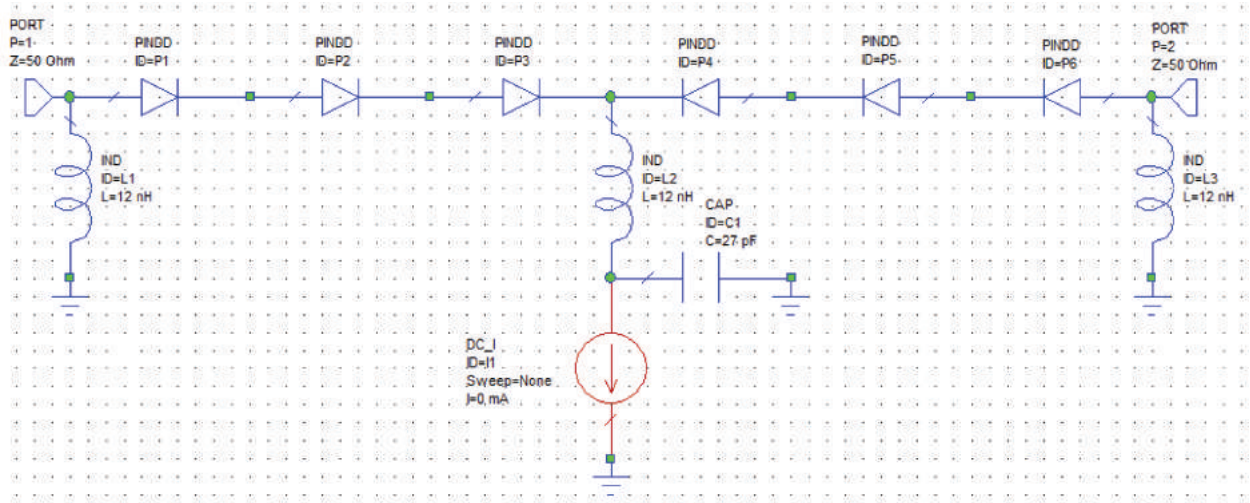


Рисунок 1. Модель выключателя в MWO

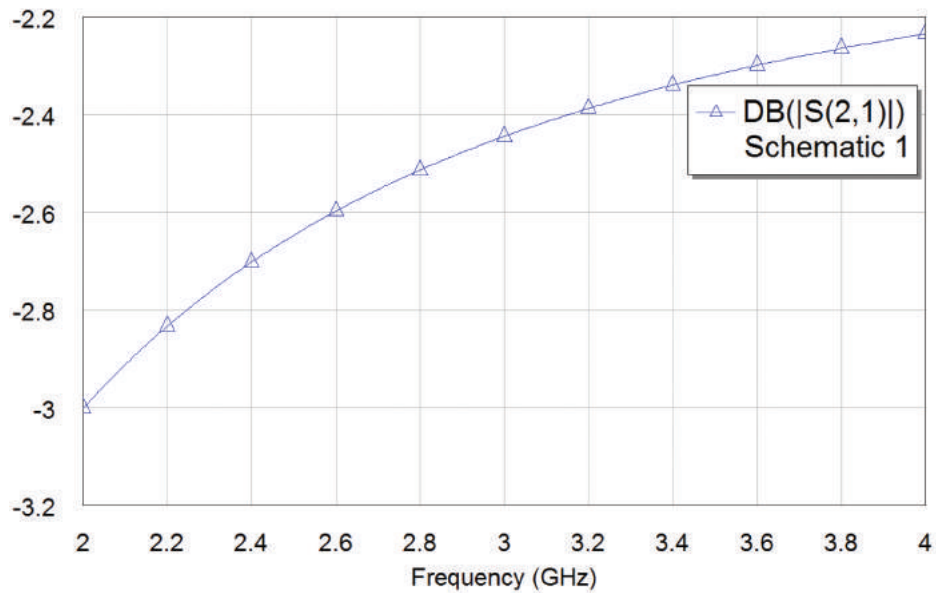


Рисунок 2. АЧХ выключателя в открытом состоянии

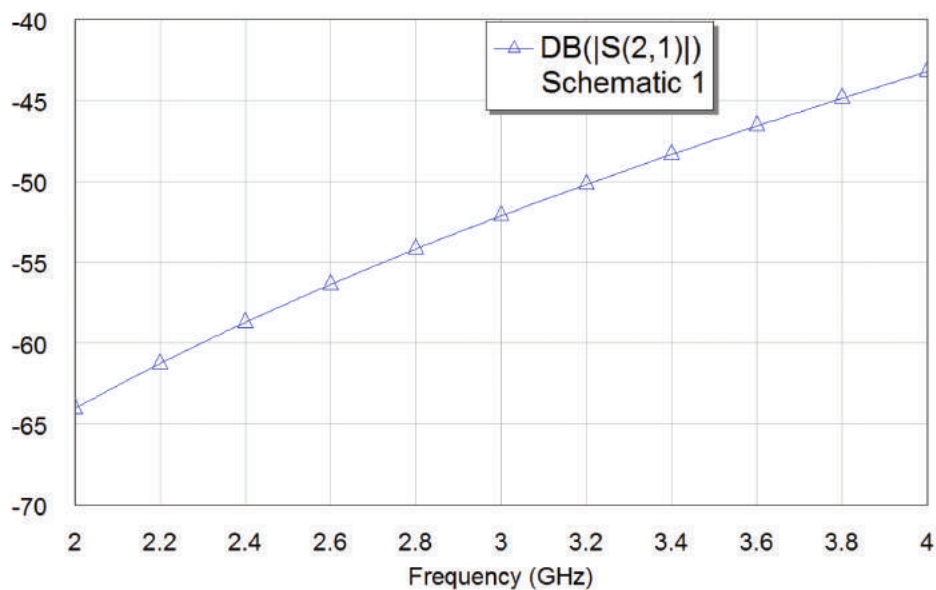


Рисунок 3. АЧХ выключателя в закрытом состоянии



Рисунок 4. Структурная схема измерительной установки

В качестве источника сигнала использован генератор стандартных сигналов типа E8267D. В качестве индикатора выходной мощности и частоты применен анализатор спектра типа 8564EC. Источником тока управления на рpn-диоды служит блок

питания типа Б5-71. Ток управления измеряли мультиметром типа МУ-62.

В первом эксперименте измерялась АЧХ выключателя при токе управления 5 мА. Результаты измерения сведены в таблицу 1.

Таблица 1. АЧХ выключателя

f, ГГц	Потери, дБ I ₀ = -5 мА	Потери, дБ I = 0 мА
2,0	4	Не измерено
2,1	4	
2,2	4	64
2,3	3,83	61
2,4	3,83	60
2,5	4	59
2,6	4,17	58
2,7	4,33	58
2,8	4,17	57
2,9	3,83	55
3,0	4	54
3,1	4	53
3,2	3,5	52
3,3	3,33	50
3,4	3,5	51
3,5	3,83	50
3,6	4,33	50
3,7	4,83	50
3,8	4,5	49
3,9	4,33	49
4,0	4,17	47
4,1	4,33	47
4,2	4,67	46
4,3	5	46
4,4	5,83	46
4,5	6,83	44

Во втором эксперименте измерялась АЧХ выключателя при нулевом токе управления. Результаты измерения также записаны в таблицу 1.

По данным таблицы 1 построены графики на рисунке 5.

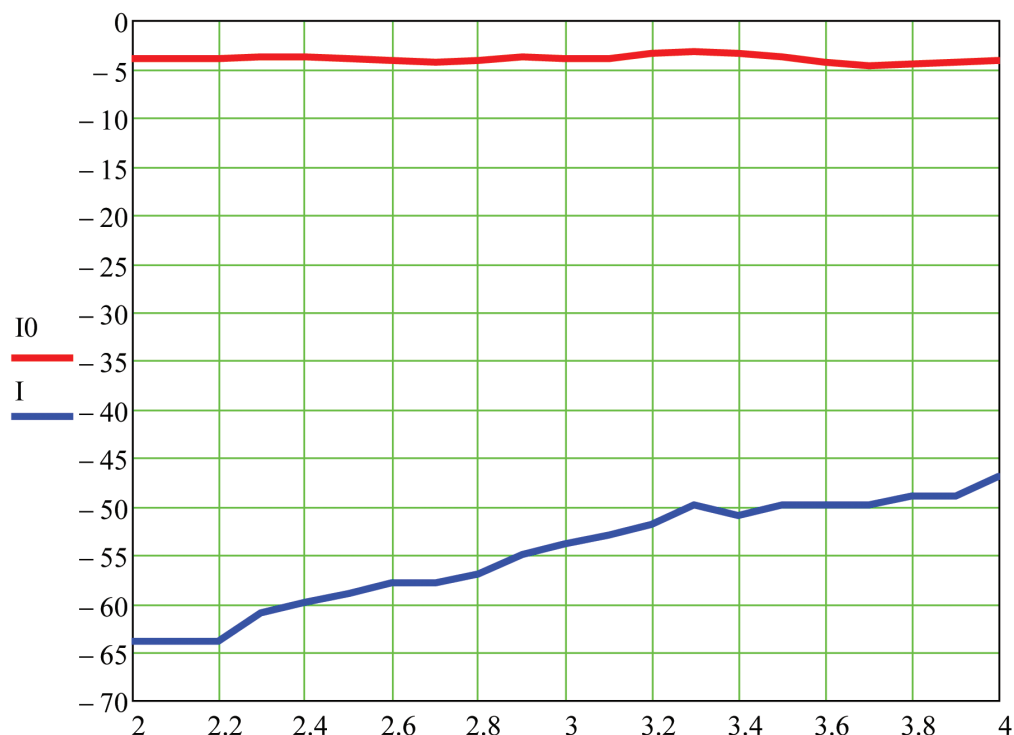


Рисунок 5. АЧХ выключателя

Выводы

Потери открытого выключателя в диапазоне частот 2-4 ГГц и токе управления 5 мА не превышают 4,5 дБ (эти потери включают затухание в двух кабелях). Потери закрытого выключателя в диапазоне частот 2–4 ГГц и

токе управления 0 мА не менее 46 дБ. Неравномерность АЧХ в открытом состоянии не превышает ± 1 дБ.

Выключатель может найти применение в широкополосной приемо-передающей аппаратуре.

Список литературы

1. Дзехцер Г.Б., Орлов О.С. Pin-диоды в широкополосных устройствах СВЧ. М.: Сов. радио, 1970. 200 с.
2. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.
3. Бова Н.Т., Стукало П.А., Храмов В.А. Управляющие устройства СВЧ. Киев, Техніка, 1973. 164 с.
4. Карпов В.М., Малышев В.А., Перевошиков И.В. Широкополосные устройства СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами. М.: Радио и связь, 1984. 104 с.
5. Стафеев В.Н., Тухаринов А.А. Pin-диоды для высокоскоростной модуляции мощности СВЧ сигналов. М.: ЦНИИ «Электроника», 1981. 68 с.
6. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 320 с.
7. Нефедов Е.И., Саидов А.С., Тагилаев А.Р. Широкополосные микрополосковые управляющие устройства. М.: Радио и связь, 1994.
8. Зикий А.Н., Зламан П.Н. Моделирование pin-диодного переключателя сантиметрового диапазона // Компьютерные технологии и телекоммуникации — 2014: матер. IV Всеросс. молодежн. науч.-практ. конф. Грозный, 2014. С. 48–51.

9. Хижа Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ фазовращатели и переключатели: особенности создания на pin-диодах в интегральном исполнении. М.: Радио и связь, 1984. 184 с.

10. Виненко В.Г. и др. СВЧ переключатели на pin-диодах: обзоры по электронной технике. Сер. 1. М.: ЦНИИ «Электроника», 1990. 76 с.

11. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave office. М.: Солон-пресс, 2003. 496 с.

References

1. Dzehtser G.B., Orlov O.S. Pin-Diodes in Broadband Microwave Devices. Moscow: Sov. Radio Publ., 1970. 200 p.

2. Vajsblat A.V. Switching Devices of Microwave on Semiconductor Diodes. Moscow: Radio i svjaz Publ., 1987. 120 p.

3. Bova N.T., Stukalo P.A., Khramov V.A. Microwave Control Devices. Kiev: Tehnika Publ., 1973. 164 p.

4. Karpov V.M., Malyshev V.A., Perevoshnikov I.V. Broadband Microwave Devices on Lumped Elements. Moscow: Radio i svjaz Publ., 1984. 104 p.

5. Stafeev V.N., Tuharinov A.A. Pin-diodes for High-Speed Power Modulation of Microwave Signals. Moscow: CNII «Elektronika», 1981. 68 p.

6. Belov L.A. Devices for the formation of Microwave Signals and Their Components. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 320 p.

7. Nefedov E.I., Saidov A.S., Tagilaev A.R. Broadband Microstrip Control Devices. Moscow: Radio i svjaz Publ., 1994.

8. Zikiy A.N., Zlaman P.N. Modeling of a Pin-Diode Switch in the Centimetre Range // Computer Technologies and Telecommunications — 2014: materials of IV All-Russian youth Scientific-Practical Conference. Groznij, 2014. P. 48–51.

9. Hizha G.S., Vendik I.B., Serebrjakova E.A. Microwave Phase Shifters and Switches: Features of Pin-Diodes in Integrated Design. Moscow: Radio i svjaz Publ., 1984. 184 p.

10. Vinenko V.D. et al. Microwave Switches on Pin-Diodes: Reviews of Electronic Equipment. Ser. 1. Moscow: TSNII «Elektronika», 1990. 76 p.

11. Razevig V.D., Potapov U.V., Kurushin A.A. Designing Microwave Devices with the Help of Microwave Office. Moscow: Solonpress Publ., 2003. 496 p.



Денисов В. А.
Denisov V. A.

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электроснабжение
и электротехника»,
ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет»,
г. Тольятти, Российская Федерация



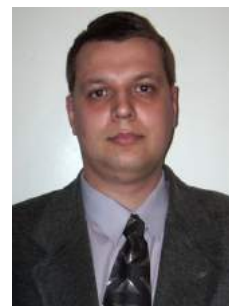
Третьякова М. Н.
Tretyakova M. N.

кандидат педагогических наук,
доцент кафедры «Электроснабжение
и электротехника»,
ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет»,
г. Тольятти, Российская Федерация



Бородин О. А.
Borodin O. A.

аспирант кафедры «Электроснабжение
и электротехника»,
ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет»,
г. Тольятти, Российская Федерация



Макаров С. В.
Makarov S. V.

кандидат технических наук,
технический директор ООО «СТРОКАТ»,
г. Тольятти, Российская Федерация

УДК 621.318.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Статья посвящена разработке динамической модели пропорционального электромагнита, находящего широкое применение для управления различными гидравлическими системами позиционного привода. В процессе управления требуется обеспечить задание требуемых усилий, величины перемещения и вида тяговых характеристик, необходимых для согласования движения якоря электромагнита с объектом перемещения. Общим свойством для всех электромагнитов является зависимость развиваемого усилия от тока и изменения собственной индуктивности катушки при перемещении якоря. Индуктивность катушки является нелинейной функцией перемещения, причем величина индуктивности катушки с сердечником во много раз может превышать индуктивность катушек без сердечника. Это обстоятельство исключает построение линейной модели, необходимой при решении актуальной задачи синтеза обратных связей, выбора и расчета параметров регулятора замкнутой системы позиционного привода для достижения заданных показателей качества регулирования. Цель

данной работы — получить квазилинейную динамическую модель пропорционального электромагнита за счет линеаризации его нелинейных параметров.

Теоретическую основу исследования составляют известные уравнения электрических машин возвратно-поступательного движения, электромагнитных пускателей, релейных устройств и контакторов постоянного тока. Решение проблемы, связанной с учетом нелинейности параметров пропорционального электромагнита, осуществляется за счет линеаризации зависимости индуктивности катушки от перемещения якоря электромагнита, определенной опытным путем. В качестве объекта исследования использован клапан давления Bosh-Rexroth типа DBE, управляемый от пропорционального электромагнита. В ходе экспериментов с клапаном определены расчетные параметры, а также коэффициенты уравнений, необходимые для моделирования перемещения якоря на заданное расстояние и исследования динамических характеристик пропорционального электромагнита. Адекватность предлагаемого математического описания проверена путем сравнения переходных характеристик, полученных для модели с линеаризованными и нелинейными параметрами электромагнита.

Предложенная квазилинейная динамическая модель пропорционального электромагнита может быть использована для синтеза замкнутого контура регулирования тока данного электрического аппарата.

Ключевые слова: система управления гидроприводом, пропорциональный электромагнит, пропорциональное электроуправление, квазилинейная динамическая модель электромагнита.

RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE PROPORTIONAL ELECTROMAGNET

Clause is devoted to development of dynamic model of the proportional electromagnet, finding wide application for management of various hydraulic systems of an positional drive. During management of an electromagnet usually it is required to provide the task of demanded efforts, sizes of moving and a kind of the traction characteristics necessary for the coordination of movement of an anchor of the given electric device with object of moving.

The general property for all electromagnets is dependence of developed effort on a current and change of own inductance of the coil at moving an anchor. Inductance of the coil is nonlinear function of moving, and the size of inductance of the coil with the core many times over can exceed inductance of coils without the core. This circumstance excludes construction of the linear model necessary at the decision of an actual problem of synthesis of feedback, a choice and calculation of parameters of a regulator of the closed system of positional drive for achievement of the set parameters of quality of regulation. The purpose of the given work — to receive quasi-linear dynamic model of a proportional electromagnet due to linearization its nonlinear parameters.

The theoretical basis of research is made with the known equations of electric machines of back and forth motion, electromagnetic actuators, relay devices and contactors a direct current. The decision of the problem connected in view of nonlinearity of parameters of a proportional electromagnet, is carried out due to linearization dependences of inductance of the coil on moving an anchor of the electromagnet, certain by practical consideration. As object of research the valve of pressure Bosh-Rexroth of type DBE, operated from a proportional electromagnet is used. During experiments with the valve settlement parameters, and also the factors of the equations necessary for modelling of moving of an anchor on the set distance and researches of dynamic characteristics of a proportional electromagnet are certain. Adequacy of the offered mathematical description is checked up by comparison of the transitive characteristics received for model with linearized and nonlinear parameters of an electromagnet.

Offered quasi-linear the dynamic model of a proportional electromagnet can be used for synthesis of the closed contour of regulation of a current of the given electric device.

Key words: control system of a hydrodrive, proportional electromagnet, proportional electro-management, quasi-linear dynamic model of an electromagnet.

Введение

В системах управления гидравлическими приводами различных рабочих механизмов — клапанах давления, гидрораспределителях, предохранительных или редуцирующих клапанах прямого и непрямого действия, растет использование пропорциональных цилиндрических электромагнитов [1, 2]. Это электрические аппараты, в которых ход якоря соответствует величине тока управления. Согласование движения электромагнитов с объектами перемещения осуществляется путем задания требуемых усилий, величины перемещения и вида их тяговых характеристик.

Интенсивное развитие гидроприводов с пропорциональным электроуправлением определяет необходимость совершенствования методов исследования динамики пропорциональных электромагнитов. Наиболее перспективным способом изучения динамических свойств аппаратов с пропорциональным управлением является математическое моделирование [3–9]. Степень адекватности моделей реальным процессам зависит от полноты математического описания исследуемых явлений.

Одна из проблем, возникающих при создании математического описания системы управления гидроприводом с пропорциональным электромагнитом, заключается в необходимости учета его нелинейных свойств [10–13]. В частности, индуктивность катушки электромагнита существенно изменяется при изменении положения якоря в ходе отработки заданного перемещения. То обстоятельство, что индуктивность катушки с сердечником может во много раз превы-

шать индуктивность катушки без сердечника, исключает возможность построения линейной модели электромагнита, требуемой для решения задачи синтеза обратных связей, расчета и выбора параметров регуляторов позиционного электропривода. Игнорирование рассматриваемой нелинейности может вызвать рассогласование внутреннего (по перемещению якоря) и внешнего (по регулированию давления клапана) контуров регулирования системы управления гидроприводом и, как следствие, ухудшить показатели качества регулирования [14].

В данной статье на основе известной теории электрических машин возвратно-поступательного движения, электромагнитных пускателей, релейных устройств и контакторов постоянного тока [2–4, 10, 11, 15–20] решается проблема учета нелинейностей пропорциональных электромагнитов.

Целью настоящей работы является создание квазилинейной динамической модели пропорционального электромагнита путем линеаризации системы уравнений и исследования методом математического моделирования адекватности переходных процессов.

Математическое описание

Для плавной регулировки давления рабочей жидкости в различных системах гидроприводов находит применение клапан давления Bosh-Rexroth типа DBE с управлением от пропорционального электромагнита. Основными конструктивными элементами клапана (рисунок 1) являются пропорциональный электромагнит (1), подвижный узел (2), корпус (3), дроссель (4) и золотник (5).

Математическое описание исследуемой системы состоит из ряда представленных

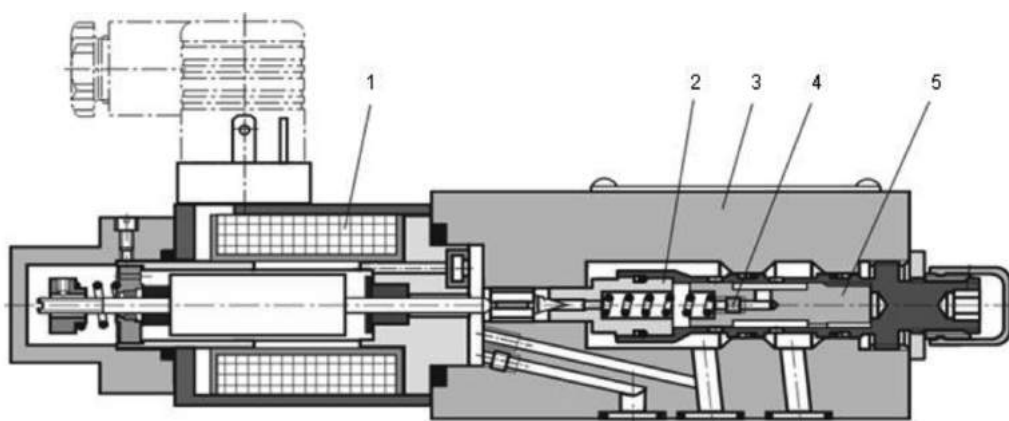


Рисунок 1. Пропорциональный клапан давления с электромагнитным управлением

ниже уравнений, составленных с учетом следующих допущений и ограничений: магнитная цепь электромагнита не насыщена, потери в стали не учитываются, катушка якоря и рабочий механизм рассматриваются жесткой системой с ограниченным продольным перемещением [1–11].

Потокосцепление для ненасыщенной системы

$$\Psi = L(x) \cdot i, \quad (1)$$

где $L(x)$, i — индуктивность и ток катушки электромагнита.

Индуктивность катушки представляется в виде линейного уравнения

$$L(x) = L_0 + K_L \cdot x, \quad (2)$$

где L_0 — начальная величина индуктивности; K_L — эмпирический коэффициент; x — перемещение якоря.

Скорость перемещения якоря

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

Уравнение напряжения на клеммах электромагнита

$$\begin{aligned} u &= i \cdot r + \frac{d\Psi}{dt} = i \cdot r + \frac{d(L(x) \cdot i)}{dt} = \\ &= i \cdot r + (L_0 + K_L \cdot x) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot K_L \cdot v, \end{aligned} \quad (4)$$

где r — активное сопротивление катушки.

Изменение потокосцепления по времени с учетом уравнений (1) – (3)

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi}{dt} &= \frac{d(L(x) \cdot i)}{dt} = L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{d(L(x))}{dt} = \\ &= L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{d(L(x))}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \\ &= (L_0 + K_L \cdot x) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{d(L_0 + K_L \cdot x)}{dx} \cdot v = \\ &= (L_0 + K_L \cdot x) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot K_L \cdot v. \end{aligned} \quad (5)$$

Изменение тока из выражения (4)

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - i \cdot r - i \cdot K_L \cdot v}{L_0 + K_L \cdot x} \quad (6)$$

Уравнение сил электромагнита

$$F_T = F_D + F_{II} + F_C + m \cdot \frac{dv}{dx} \quad (7)$$

Тяговая сила электромагнита

$$F_T = K_T \cdot \Psi^2, \quad (8)$$

где K_T — эмпирический тяговый коэффициент.

Сила демпферного сопротивления

$$F_D = K_D \cdot v, \quad (9)$$

где K_D — коэффициент демпфирования.

Сила, создаваемая возвратной пружиной клапана давления,

$$F_{II} = F_{II0} + c \cdot x, \quad (10)$$

где c — коэффициент жесткости пружины; F_{II0} — начальная сила, создаваемая пружиной.

Сила сопротивления, создаваемая внешней нагрузкой, H :

$$F_C = f(\Delta P), \quad (11)$$

где ΔP — перепад давления на золотнике.

Равнодействующая сила

$$F_0 = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (12)$$

где m — масса подвижной части; a — ускорение.

Уравнение движения якоря

$$\begin{aligned} m \cdot \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{L_0 + K_L \cdot x}{dx} - \\ &- K_D \cdot v - (F_{II0} + c \cdot x) - F_C. \end{aligned} \quad (13)$$

Моделирование

Совокупность уравнений (3), (6), (13) позволяет имитировать перемещение якоря на заданное расстояние и исследовать динамические характеристики электромагнита. Расчетные параметры и коэффициенты пропорционального клапана давления с электромагнитным

Таблица 1. Параметры и коэффициенты модели

Название	Обозначение	Величина
Максимальное перемещение	x_{max}	6 мм
Активное сопротивление катушки	r	2,5 Ом
Индуктивность катушки	$L(x)$	$(0,0023x+0,1068)$ Гн
Тяговая сила электромагнита	F_T	$(1,05 \Psi^2)$ Н
Сила, создаваемая возвратной пружиной клапана давления	F_{II}	$(0,01 + c \cdot x)$ Н
Сила демпферного сопротивления	F_D	$(0,5v)$ Н

управлением, необходимые для данного моделирования, приведены в таблице 1.

Зависимость индуктивности катушки электромагнита $L(x)$ в функции от перемещения x , приведенная в таблице 1, получена опытным путем. Результаты эксперимента аппроксимированы линейным уравнением. В соответствии с полученным выражением построен график (рисунок 2), показывающий как меняется индуктивность катушки электромагнита $L(x)$ при изменении положения якоря.

С учетом результатов линеаризации и принятых ранее упрощений состояние разомкнутой системы пропорционального клапана с

электромагнитным управлением можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = (u - r \cdot i) \cdot \frac{1}{L_{H0}}, \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} (K_T \cdot \Psi^2 - K_D \cdot v - (F_{H0} + c \cdot x) - F_C), \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь L_{H0} — средняя индуктивность катушки электромагнита в рабочем диапазоне, Гн.

Для проверки адекватности предложенных соотношений получены переходные характеристики нелинейной и квазилинейной моделей пропорционального электромагнита. Результаты математического моде-

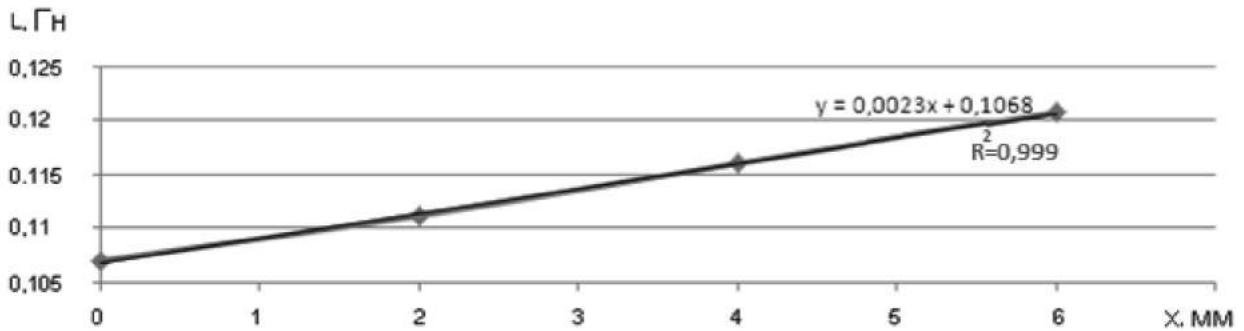


Рисунок 2. Результаты эксперимента

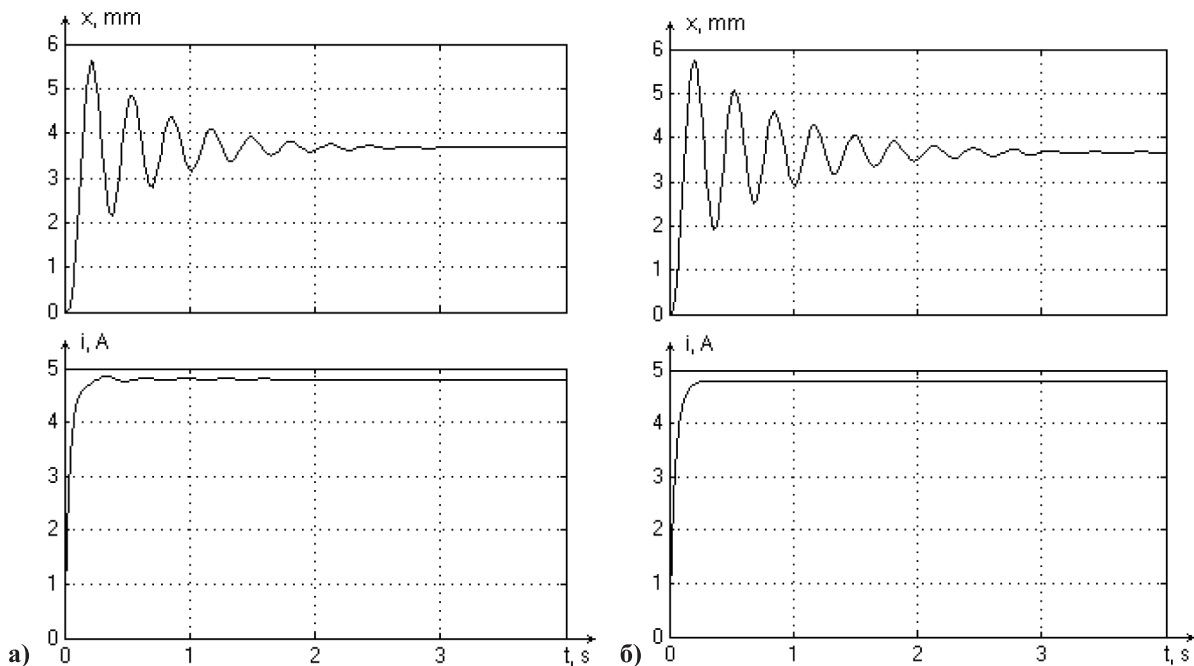


Рисунок 3. Динамические характеристики пропорционального электромагнита для нелинейной (а) и квазилинейной (б) моделей

лирования отображены на рисунке 3. Видно, что переходные характеристики тока в обоих случаях практически соответствуют экспоненте. Это объясняется большой электромагнитной инерционностью катушки. Переходные характеристики перемещения якоря носят колебательный затухающий характер. Время перемещения якоря пропорционального электромагнита определяется, в основном, постоянной времени его катушки.

Как видно из графиков, полученные с помощью линеаризованных уравнений переходные характеристики электромагнита (рисунок 3, а) практически совпадают с графиками модели, в которой учтены нелинейные свойства данной системы (рисунок 3, б). Таким образом, систему уравнений (14) можно рассматривать как квазилинейную

динамическую модель пропорционального электромагнита клапана давления в системе гидропривода.

Выводы

1. Квазилинейная динамическая модель пропорционального электромагнита, полученная путем линеаризации эмпирических данных, может быть использована для синтеза замкнутого контура регулирования тока, входящего в состав позиционной системы управления клапаном давления.

2. Переходная характеристика перемещения якоря носит колебательный характер. Для устранения колебательности и получения стабильной характеристики системы требуется ввести обратные связи и выбрать соответствующий закон регулирования.

Список литературы

1. Liu J.R. et al. Research on the Electro-Hydraulic Variable Valve Actuation System Based on a Three-Way Proportional Reducing Valve // *International Journal of Automotive Technology*. 2009. Т. 10. №. 1. P. 27–36.
2. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // *Известия вузов. Электромеханика*. 2012. № 1. С. 72–75.
3. Боровин Г.К., Костюк А.В., Платонов А.К. Математическое моделирование гидравлической системы управления шагающей машины // *Математичні машини і системи*. 2009. № 4. С. 127–138.
4. Математическое моделирование и автоматизация проектирования тяговых электрических аппаратов / А.Г. Никитенко, В.Г. Щербаков, Б.Н. Лобов, Л.С. Лобанова. М.: Высшая школа, 1996. 530 с.
5. Бородин О.А., Денисов В.А. Исследование позиционного гидропривода при неопределенности параметров // *Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сб. тр. IV Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов (12–14 апреля 2016 г.)*. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. С. 280–282.
6. Денисов В.А., Бочкачев А.В. Управление линейным электроприводом малых перемещений // *Электротехника*. 2011. № 2. С. 16–19.
7. Денисов В.А. Системы позиционного электропривода с переменной структурой управления. М.: Изд-во Спутник+, 2013. 119 с.
8. Денисов В.А. Теория автоматического управления. Тольятти: Тольятт. гос. ун-т, 2007. 284 с.
9. Xue L., Fan X., Tao G. Development of Test System for Proportional Electromagnet Actuators' Performance // *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*. 2009. Т. 2. P. 18.
10. Татевосян А.С., Пимонова У.В., Поляков Д.А., Шелковников С.В., Шелковникова Ю.В. Уравнения динамики электромагнита постоянного тока и исследование его динамических характеристик // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1–1.
11. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций // *Доклады АН ВШ РФ. Серия «Технические науки»*. 2015. № 3 (38). С. 75–84.
12. Геча В.Я. Определения тягового усилия и динамических характеристик цилиндрического электромагнита с различ-

ной формой штока // Электротехнические комплексы и системы управления. 2003. № 1. С. 2–7.

13. Cristofori D., Vacca A. The Modeling of Electrohydraulic Proportional Valves // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. 2012. T. 134. No. 2. P. 021008.

14. Денисов В.А., Третьякова М.Н., Бородин О.А., Макаров С.В. Синтез и исследование работы позиционной системы с линейным актуатором // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2016. Т. 16, № 2. С. 90–97.

15. Москвитин А.И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. М.: Изд-во АН СССР, 1950.

16. Ряшенцев Н.П., Тимошеного Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. Новосибирск: Наука Сиб. отделение, 1970. 260 с.

17. Сотсков Ю.С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств. М.-Л.: Энергия, 1965. 576 с.

18. Ивашин В.В., Певчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. 2013. № 6. С. 42–46.

19. Никитенко А.Г. Электромагнитные механизмы. Анализ и синтез. М.: Высшая школа, 1998. 330 с.

20. Алексеев И.В., Волков А.Н. Динамика быстродействующих цикловых механизмов с линейным электромагнитным приводом // Динамика, прочность и надежность технологических машин: сб. науч. тр. СПбГТУ. СПб., 1998. № 2. С. 112–119.

References

1. Liu J.R. et al. Research on the Electro-Hydraulic Variable Valve Actuation System Based on a Three-Way Proportional Reducing Valve // International Journal of Automotive Technology. 2009. V. 10. No. 1. P. 27–36.

2. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Electromagnetic Drives for Pulsed and Vibroimpulse Technologies // Izvestiya

Vuzov. Electromechanics. 2012. No. 1. P. 72–75. (in Russ.)

3. Borovin G.K., Kostyuk A.V., Platonov A.K. Mathematical Modeling of the Hydraulic Control System of a Walking Machine // Mathematical Machines and Systems. 2009. No. 4. P. 127–138. (in Russ.)

4. Mathematical Modeling and Automation of the Design of Traction Electrical Apparatus / A.G. Nikitenko, V.G. Scherbakov, B.N. Lobov, L.S. Lobanova. M.: Vysshaya shkola, 1996. 530 p. (in Russ.)

5. Borodin O.A., Denisov V.A. Investigation of a Positional Hydraulic Drive under Uncertainty of Parameters // Energy Efficiency and Energy Security of Production Processes: Collection of Works of IV All-Russian Scientific-Technical Conference of Students, Undergraduates, Graduate Students (April 12–14, 2016). Tolyatti: Izd-vo TGU, 2016. P. 280–282. (in Russ.)

6. Denisov V.A., Bochkachev A.V. Control of a Linear Electric Drive of Small Displacements // Electrical Engineering. 2011. No. 2. P. 16–19. (in Russ.)

7. Denisov V.A. Variable Control Structure Variable Actuator Systems. Moscow: Izd-vo Sputnik, 2013. 119 p. (in Russ.)

8. Denisov V.A. Theory of Automatic Control. Tolyatti: Tolyat. gos. un-t, 2007. 284 p. (in Russ.)

9. Xue L., Fan X., Tao G. Development of Test System for Proportional Electromagnet Actuators' Performance // Mechanical & Electrical Engineering Magazine. 2009. V. 2. P. 018.

10. Tatevosyan A.S., Pimonova U.V., Polyakov D.A., Shelkovnikov S.V., Shelkovnikova Yu.V. Equations of Dynamics of a Direct Current Electromagnet and Investigation of its Dynamic Characteristics // Modern Problems of Science and Education. 2015. No. 1–1. (in Russ.)

11. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Dynamic Model of the Electromagnetic Drive of Oscillatory Motion for Systems for Generating Low-Frequency Vibrations // Reports of the Academy of Sciences of the Russian Federation. Series «Technical Sciences». 2015. No. 3 (38). P. 75–84. (in Russ.)

12. Gecha V.Ya. Determination of Traction and Dynamic Characteristics of a Cylindrical

Electromagnet with a Different Shape of the Rod // *Electrotechnical Complexes and Control Systems*. 2003. No. 1. P. 2–7. (in Russ.)

13. Cristofori D., Vacca A. The Modeling of Electrohydraulic Proportional Valves // *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. 2012. V. 134. No. 2. P. 021008.

14. Denisov V.A., Tretyakova M.N., Borodin O.A., Makarov S.V. Synthesis and Study of the Work of a Positioning System with a Linear Actuator // *Vestnik of the South Ural State University. Series «Energy»*. 2016. V. 16. No. 2. P. 90–97. (in Russ.)

15. Moskvitin A.I. *Electric Reciprocating Machines*. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1950. (in Russ.)

16. Ryashentsev N.P., Timoshenogo E.M., Frolov A.V. *Theory, Calculation and Design of Impact Electromagnetic Machines*. Novosibirsk: Nauka Sib. otделение, 1970. 260 p. (in Russ.)

17. Sotskov Yu.S. *Basics of Calculation and Design of Electromechanical Elements of*

Automatic and Telemechanical Devices. Moscow-Leningrad: Energiya, 1965. 576 p. (in Russ.)

18. Ivashin V.V., Pevchev V.P. Features of the Dynamics of Operation and Energy Diagrams of a Pulsed Electromagnetic Drive with Parallel and Series Connection of the Field Windings // *Electrical Engineering*. 2013. No. 6. P. 42–46. (in Russ.)

19. Nikitenko A.G. *Electromagnetic Mechanisms. Analysis and Synthesis*. Moscow: Vysshaya shkola, 1998. 330 p. (in Russ.)

20. Alekseev I.V., Volkov A.N. *Dynamics of High-Speed Cyclic Mechanisms with Linear Electromagnetic Drive // Dynamics, Strength and Reliability of Technological Machines: Collection of Scientific Works of SPbGTU*. Saint-Petersburg, 1998. No. 2. P. 112–119. (in Russ.)



Хузьяшев Р. Г.
Khuzhashev R. G.

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры
«Электроэнергетические системы и сети»,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет»,
г. Казань, Российская Федерация



Кузьмин И. Л.
Kuzmin I. L.

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Релейная защита и автоматизация
электроэнергетических систем»,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет»,
г. Казань, Российская Федерация



Новиков С. И.
Novikov S. I.

ведущий специалист службы
электрических режимов,
филиал Акционерного общества
«Системный оператор Единой
энергетической системы»,
Региональное диспетчерское
управление Татарстана,
г. Казань, Российская Федерация



Тукаев С. М.
Tukaev S. M.

студент кафедры
«Электроэнергетические системы и сети»,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет»,
г. Казань, Российская Федерация

УДК 621.316

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Рассматриваются способы определения места повреждения в распределительных сетях с древовидной топологией. Существующие способы предусматривают измерение аварийных сигналов тока вблизи узловых точек сети. Это осуществляется мобильными устройствами путем пешего обхода линии, либо стационарными устройствами, установленными на проводах линии. В качестве перспективного метода рассмотрен волновой метод, основанный на регистрации сигналов напряжения аварийного переходного процесса в концах ответвлений распределительной сети. Это позволяет устанавливать датчики комплекса в конечных трансформаторных подстанциях, что решает проблему их электропитания и защиты от вандализма. Информация с датчиков комплекса передается на удаленный сервер, где совместно обрабатывается. Численным моделированием в пакете «MATLAB/Simulink»

показано, что величина скорости распространения сигнала аварийного переходного процесса зависит от габаритов линии электропередачи, сопротивления почвы, способа заземления нейтрали сети, вида аварии и способа регистрации сигнала переходного процесса и может достигать значений порядка 214 м/мкс. Приведены результаты экспериментальных измерений скорости распространения сигналов переходных процессов в распределительной сети 10 кВ, которые находятся в интервале значений 200–250 м/мкс. Оценена погрешность алгоритма определения места повреждения при известных координатах источника сигнала переходного процесса, которая не превышает нескольких сотен метров. Полученная погрешность указывает на работоспособность волнового алгоритма определения места повреждения в распределительных сетях 6–10 кВ. С целью уменьшения погрешности определения места повреждения предлагается разработать алгоритмы контроля скорости распространения сигналов переходного процесса.

Ключевые слова: сигнал, переходной процесс, определение места повреждения, фазовая скорость, заземление нейтрали, скорость распространения, погрешность, древовидная топология, моделирование, MATLAB/Simulink.

INVESTIGATION OF THE SPEED OF PROPAGATION OF THE TRANSIENT SIGNALS OVER OVERHEAD POWER LINES

The article is devoted to the ways of determining the fault location in distribution networks with a tree topology. Existing methods provide for the measurement of current alarms near network nodes. This can be done with the using mobile devices by walking around the line, or by stationary devices installed on the line wires. As a promising method, the wave method based on the recording of voltage signals of an emergency transient process at the ends of the branches of the distribution network is considered. This allows the installation of sensors in the terminal transformer substations, which solves the problem of their power supply and protection from vandalism. The information from the complex sensors is transmitted to the remote server, where it is processed together. Numerical simulation in the «MATLAB/Simulink» package shows that the speed of propagation of a transient signal depends on the dimensions of the power line, the soil resistance, the method of grounding the network neutral, the type of failure and the method of recording the transient signal, and can reach values of the order of 214 м/μs. The results of experimental measurements of the speed of propagation of transient signals in the distribution network of 10 kV, which are in the range of values of 200–250 м/μs, are presented. The error in the algorithm for determining the fault location at known coordinates of the transient signal source is estimated, which does not exceed several hundred meters. The received error indicates the operability of the wave algorithm for determining the fault location in distribution networks of 6–10 kV. In order to reduce the error in determining the location of the damage, it is proposed to develop algorithms for controlling the propagation velocity of the transient signals.

Key words: signal, transient, fault location, phase velocity, neutral ground, propagation velocity, error, tree topology, simulation, MATLAB/Simulink.

Введение

Определение места повреждения (ОМП) в сетях 6–10 кВ в настоящее время выполняется с использованием топографических средств. Это подразумевает использование устройств, фиксирующих аварийные сигналы тока и напряжения непосредственно в узловых точках разветвленной воздушной линии (ВЛ). Устройства подразделяют на мобильные, которыми пользуются при поиске однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), и стационарные, которые устанавли-

ваются на фазные провода и опоры ВЛ. Примером первых является переносной прибор «Квант» [1], которым пользуются для поиска места устойчивого ОЗЗ. Примером стационарных устройств являются индикаторы фирмы «Антракс» [2], которые монтируются на провода ВЛ и предназначены для определения зоны повреждения при межфазных КЗ и ОЗЗ. С целью повышения точности ОМП при межфазных коротких замыканиях (КЗ) и ОЗЗ и уменьшения количества стационарных устройств в [3] предлагается в

концах ответвлений ВЛ регистрировать сигналы напряжения переходных процессов, рождаемых аварийными коммутациями. Каждое устройство регистрирует время прихода сигнала переходного процесса (ПП) в единой для всех устройств спутниковой шкале времени. Тогда алгоритм ОМП на ВЛ, соединяющей каждую пару устройств, определяется выражением:

$$x = \frac{L}{2} + \frac{dT \cdot V}{2}, \quad (1)$$

где L — расстояние между парой устройств; d_T — разница времени прихода сигнала ПП в парные устройства; V — скорость распространения сигнала вдоль ВЛ; x — расстояние до места повреждения.

Как видим из (1), погрешность ОМП зависит от точности определения расстояния между устройствами, разности времени и величины скорости распространения сигнала. Величина расстояния по ВЛ искажается провисанием провода, которое не превышает долей процента от длины линии. Точность определения времени прихода переднего фронта сигнала ПП определяется точностью привязки к спутниковой шкале времени, которая составляет десятые доли микросекунды, и интервалом дискретизации входного сигнала в регистрирующем устройстве, которое также составляет десятые доли микросекунды.

Известно, что величина скорости распространения электромагнитных сигналов по ВЛ определяется их частотой и модой распространения [4]. Для типовой трехфазной ВЛ определяются три моды распространения электромагнитных колебаний:

- первая мода (средняя фаза — две крайние);
- вторая мода (крайняя левая фаза — средняя и крайняя правая);
- нулевая мода (все три фазы — земля).

Затухание и скорость распространения гармонических сигналов каждой моды определяются комплексной величиной постоянной распространения [5].

Численное моделирование параметров распространения сигнала вдоль ВЛ

Удельные параметры активного сопротивления и индуктивности трехпроводной ВЛ в рамках теории скин-эффекта зависят от

частоты гармонического сигнала и сопротивления почвы, над которой расположена ВЛ. Учет этого факта позволяет [6, 7] рассчитать частотную зависимость величины постоянной распространения. Исследуем зависимость фазовой скорости распространения гармонического сигнала от проводимости почвы и габаритов ВЛ в пакете «MATLAB/Simulink». На рисунках 1 и 2 изображены частотные зависимости фазовой скорости нулевой и первой мод для ВЛ 10 кВ и 110 кВ с учетом разной проводимости земли. Скорость распространения сигнала первой моды практически не зависит от габаритов ВЛ и проводимости почвы. Скорость распространения сигнала нулевой моды заметно уменьшается с уменьшением габаритов ВЛ и сопротивления почвы.

Среда распространения электромагнитных колебаний в ВЛ является неоднородной и состоит из двух сред: воздушного промежутка, определяемого габаритами ВЛ, и земляного промежутка, глубина которого определяется скин-эффектом. Эта комбинированная среда наибольшее влияние оказывает на распространение нулевой моды. С увеличением доли земляного промежутка, что происходит при уменьшении габаритов ВЛ пропорционально уменьшению класса напряжения, отличие скорости распространения электромагнитных волн от скорости света увеличивается.

Измерение скорости распространения сигнала по модельным осциллограммам

По результатам моделирования [8] «запаздывание фронта волн второй группы по отношению к первой достигает (при длине линии 600 км) нескольких десятков, а волн нулевой группы — нескольких сотен микросекунд, т. е. при времени распространения сигнала первой моды в 2 мс это соответствует скорости 300 м/мкс, скорость распространения сигналов второй моды уменьшится на 1–4 % и составит (297–288 м/мкс), а для волн нулевой моды — 10–40 % (270–180 м/мкс).

Согласно экспериментальным измерениям, выполненным георадарами [9], скорость распространения электромагнитных колебаний в разных почвах колеблется от 30 до 200 м/мкс.

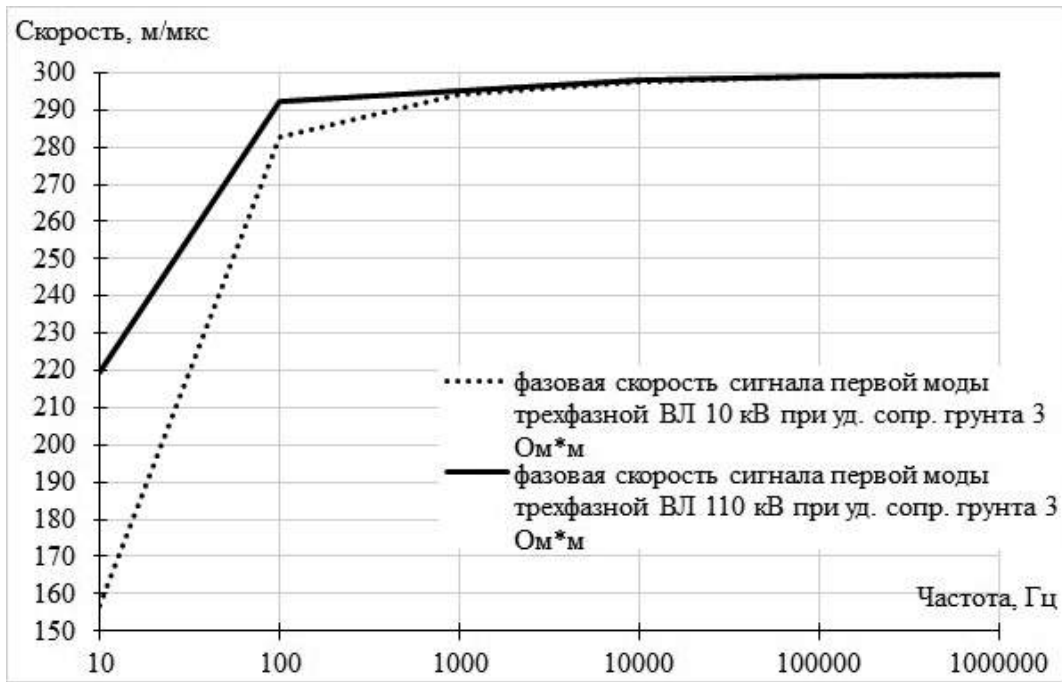


Рисунок 1. График зависимости фазовых скоростей первой моды трехпроводной ЛЭП 10-110 кВ от частоты при различных сопротивлениях грунта

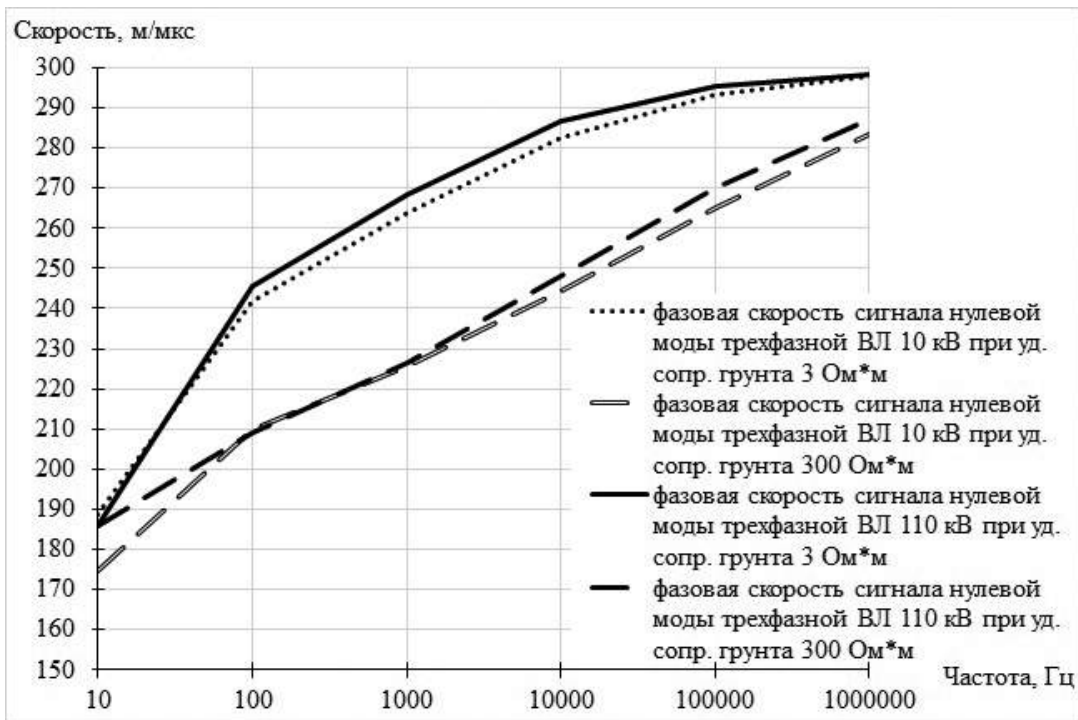


Рисунок 2. График зависимости фазовых скоростей нулевой моды трехпроводной ЛЭП 10-110 кВ от частоты при различных сопротивлениях грунта

В общем случае сигнал, распространяющийся по фазному проводу ВЛ, является комбинацией сигналов всех трех модовых каналов. Согласно исследованиям [7], нулевой канал характеризуется более выраженной дисперсией или зависимостью скорости распространения от частоты и большей величиной затухания относительно первого и вто-

рого межфазных каналов. Показано, что, вследствие более сильного затухания сигнала нулевой моды по сравнению с межфазными модами, передний фронт сигнала переходного процесса состоит из двух составляющих. Первая составляющая обусловлена сигналом, имеющим большую скорость и распространяющимся по межфазному каналу

с меньшей дисперсией, т.е. с менее расплывшимся передним фронтом. Вторая составляющая обусловлена сигналом, имеющим меньшую скорость и распространяющимся в нулевом канале с большей дисперсией, т.е. с более расплывшимся передним фронтом.

С целью моделирования распространения аварийных сигналов в пакете «MATLAB/Simulink» была составлена схема и произведен расчет осциллограмм сигналов на всех трех фазах ВЛ. ВЛ запитывалась источниками синусоидального сигнала частотой 50 Гц, сдвинутыми по фазе на треть периода. С целью максимального устранения сигналов переотражения от концов линии место аварии в виде замыкания фазы А на землю

выбиралось в начале ВЛ. Рассматривались два вида заземления: изолированная нейтраль, характерная для распределительных сетей 6-35 кВ и заземленная нейтраль, характерная для сетей более высокого напряжения. На рисунках 3, 4 приведены графики временных осциллограмм, замеренных в начале ВЛ и на расстоянии 20 км от начала. Полученные осциллограммы показывают, что при ОЗЗ возбуждается лишь нулевая мода, а при однофазном и межфазном КЗ возбуждаются все моды.

Результаты моделирования распространения сигнала ступенчатой формы в пакетах «MATLAB» и «EMTP» [7] убедительно показывают уменьшение скорости распростране-

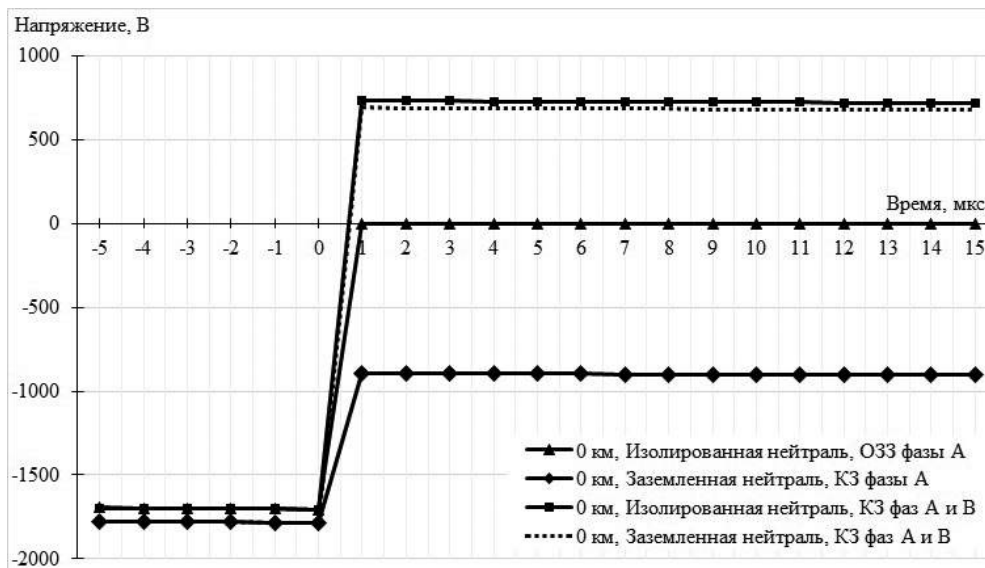


Рисунок 3. Временные зависимости напряжения фазы А в месте повреждения

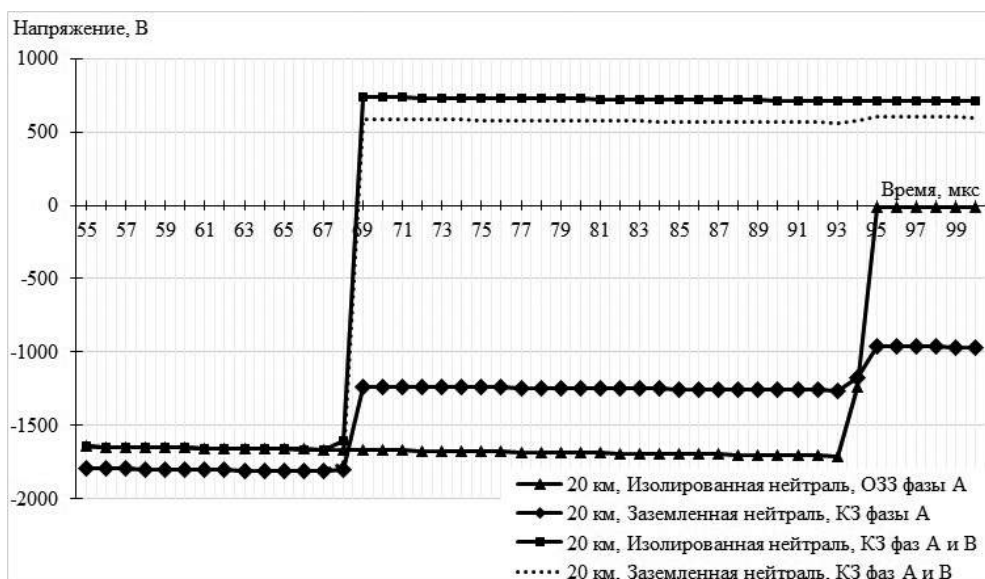


Рисунок 4. Временные зависимости напряжения фазы А на удалении 20 км от места повреждения

ния нулевой моды относительно первой (межфазной) вплоть до величин 214 м/мкс.

Экспериментальное измерение скорости программно-аппаратным комплексом

Рассмотрим результаты экспериментальных измерений на ВЛ 10 кВ, которые позволяют оценить точность ОМП разрабатываемого комплекса. Прототипы разрабатываемых датчиков были установлены в КТП в начале и в конце линии. Расстояние между датчиками 4810 м. Промежуточная КТП, расположенная на удалении 3330 м от концевой КТП, оборудована секционным разъединителем. Коммутации головного выключателя и секционного разъединителя формируют сигналы переходного процесса.

На удаленном сервере автоматически обрабатываются временные осциллограммы сигналов переходного процесса, синхронно сработавших датчиков, записанные в единой спутниковой шкале времени. Разность времен начала сигналов переходного процесса несет информацию о месте его генерации. На рисунках 5 и 6 приведены примеры сигнала переходного процесса, вызванного ОЗЗ в голове линии. В таблицах 1 и 2 приведены усредненные результаты определения скорости распространения сигналов нормальных и аварийных коммутаций, что возможно при известных координатах генерации сигналов — голова линии и месторасположения секционного выключателя.

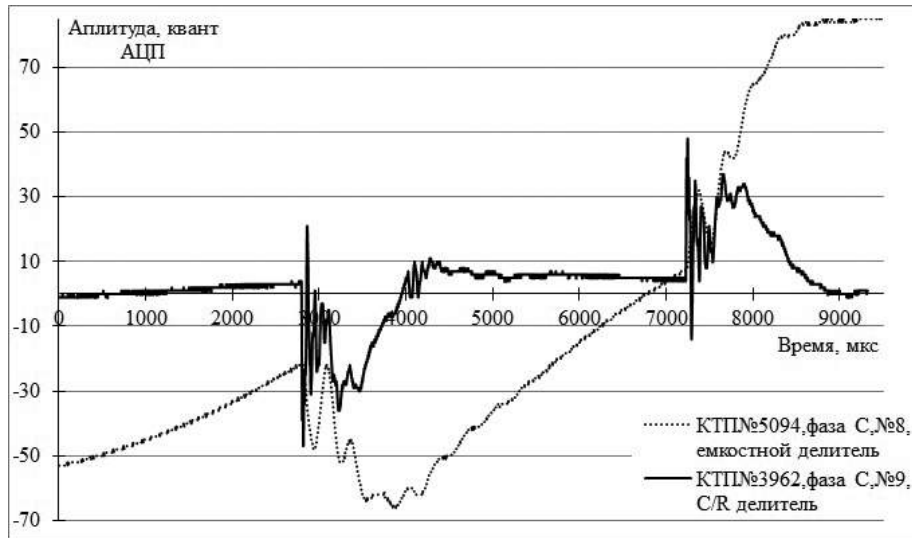


Рисунок 5. Синхронные осциллограммы аварийной коммутации 01.09.2016 в 21:07

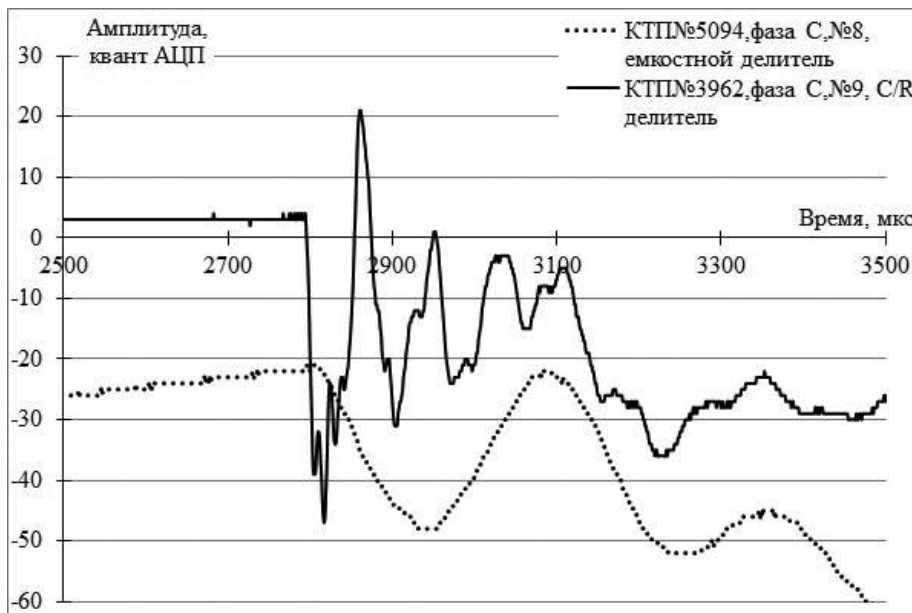


Рисунок 6. Синхронные осциллограммы аварийной коммутации 01.09.2016 в 21:07 с малым временным масштабом

Таблица 1. Параметры скорости распространения сигнала при его распространении от начала ВЛ, общее число регистраций равно 11

Параметры	Разность времени регистрации синхронных сигналов dT , мкс	Погрешность ОМП dX , м	Приведенная погрешность ОМП dX , %
Среднее значение	23,0	376	8
Станд. отклонение	5,0	333	7
Скорость, м/мкс	209,2		

Таблица 2. Параметры скорости распространения сигнала при его распространении от секционного выключателя, общее число регистраций равно 6

Параметры	Разность времени регистрации синхронных сигналов dT , мкс	Погрешность ОМП, dX м	Приведенная погрешность ОМП dX , %
Среднее значение	7,5	0	0
Станд. отклонение	1,3	45	1
Скорость, м/мкс	246,1		

Экспериментально замеренная скорость распространения сигнала нулевой моды находится в рамках, предсказываемых численным моделированием. Зависимость скорости распространения сигнала на разном удалении от места возникновения говорит либо о неодинаковости скорости нулевой моды на разных участках ВЛ, либо об уменьшении скорости распространения с увеличением пройденного расстояния, что может быть вызвано дисперсией и сильным увеличением затухания с ростом частоты гармонических составляющих сигнала.

Выводы

Проведенный анализ литературы убедительно показывает, что скорость распростра-

нения нулевой моды в трехпроводной ВЛ значительно отличается от скорости света. Отсюда следует, что при разработке алгоритма программно-аппаратного комплекса ОМП, необходимо предусмотреть действия для мониторинга этой скорости.

Результаты моделирования распространения сигнала ступенчатой формы в пакетах «MATLAB» и «EMTP» показывают уменьшение скорости распространения нулевой моды относительно межфазной вплоть до величин 214 м/мкс.

Результаты экспериментальных измерений показывают работоспособность волнового алгоритма ОМП в сетях с изолированной нейтралью.

Список литературы

1. Прибор «Квант» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rza.ru/catalog>.
2. Индикатор короткого замыкания фирмы «Антракс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://antraks.ru>.
3. Патент RU 2 372 624 C1 (РФ), МПК G 01 R 31/08. Способ определения места однофазного замыкания в разветвленной воздушной линии электропередач, способ определения места междуфазного короткого замыкания в разветвленной воздушной линии электропередач и устройство контроля тока и напряжения для их осуществления / Р.Г. Хузяшев, И.Л. Кузьмин (РФ). Заявл. 12.03.2008; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31.
4. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272 с.
5. Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
6. Carson J.R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return // Bell System Technical Journal. 1926. No. 5. P. 539–540.
7. Смирнов А.Н. Волновой метод двусторонних измерений для определения места повреждения воздушной линии электропередачи 110-220 кВ: дисс. ... канд. техн. наук. М.: ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», 2015. 209 с.
8. Лачугин В.Ф. и др. Исследование волновых процессов для релейной защиты

линий сверхвысокого напряжения // Электричество. 1983. № 3.

9. Статья «Георадиолокация» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Георадиолокация>.

References

1. The Device «Quantum» [Electronic Resource]. Access Mode: <http://www.rza.ru/catalog>.

2. The Short-Circuit Indicator of the Firm «Anthrax» [Electronic Resource]. Access mode: <http://antraks.ru>.

3. Patent RU 2 372 624 C1 (RF), IPC G 01 R 31/08. A Method for Determining the Single-Phase Closure in a Branched Overhead Power Transmission Line, a Method for Determining the Location of a Phase-to-Phase Short Circuit in a Branched Overhead Power Transmission Line and a Current and Voltage Monitoring Device for Their Implementation / R.G. Khuzyashev, I.L. Kuzmin (Russian Federation). Claimed 12.03.2008; publ. 10.11.2009, bul. No. 31.

4. Kostenko M.V., Perelman L.S., Shkarin Y.P. Wave Processes and Electrical Distur-

bances in Multi-Wire High-Voltage Lines. Moscow: Energia Publ., 1973. P. 272.

5. Shalyt G.M., Eisenfeld A.I., Maluy A.S. Determination of Fault Location of Power Transmission Lines According to Emergency Mode Parameters. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983. P. 208.

6. Carson J.R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return // Bell System Technical Journal. 1926. No. 5. P. 539–540.

7. Smirnov A.N. Wave Method of Bilateral Measurements for Determining the Location of Damage to the 110-220 kV Overhead Transmission Line: Diss. ... Cand. Tech. Sciences. Moscow: JSC «Power Engineering Institute G.M. Krzhizhanovskogo», 2015. P. 209.

8. Lachugin V.F. et al. Investigation of Wave Processes for Relay Protection of Ultrahigh Voltage Lines // Electricity. 1983. No. 3.

9. Article «Georadiolocation» [Electronic Resource]. Access Mode: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Georadiolocation>.



Яхиббаева Л. М.
Yakhibbaeva L. M.

*кандидат филологических наук, доцент
кафедры «Иностранные языки»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

*Cand. Sci. Philol., Assistant Professor
of Foreign Languages Department,
FSBEI HE «Ufa State Petroleum
Technological University»,
Ufa, Russian Federation*



Чатурова Д. И.
Chaturova D. I.

*магистрант кафедры электротехники
и электрооборудования предприятий,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

*Undergraduate Student of Electrical
Engineering and Equipment of Enterprises
Department, FSBEI HE «Ufa State Petroleum
Technological University»,
Ufa, Russian Federation*

УДК 622.692.4.07

TECHNOLOGICAL HEATING COMPLEX FOR SUBSEA PIPELINES BASED ON INDUCTION HEATING SYSTEM

Prospecting and exploration operations have increased in areas of seas and oceans as a result of intensive growth of raw hydrocarbons usage in all branches of industry. Hydrocarbon resources development in the north seas of the Arctic Ocean is becoming more and more relevant.

Oil product produced from the offshore field can be transported by means of tankers or a pipeline system. The latter method of transportation increases reliability and environmental friendliness of the technological process, however, the economic efficiency of oil-pipeline depends on physical and chemical properties of the oil pumped through the oil-pipeline. When transporting an oil product through a subsea pipeline, the oil product temperature drops because of the low environmental temperature. Therefore, oil product viscosity increases and cross-section of a pipeline decreases. All this results in pump load increase and electrical power costs. That is why it is necessary to decrease the parameter of the oil product viscosity. This problem can be solved by physical, chemical and thermal methods. But some of them are not applicable under water, and others are economically feasible.

The task of the oil product viscosity reduction and maintenance of its temperature at a desired level requires application of new technologies and systems. At the same time they must secure high reliability, long service life and the least capital expenditures. Such systems include electric heating systems. Nowadays direct electric heating has become rather popular, but this system is not suitable for distant pipelines and it has a number of significant disadvantages. And this is the reason why an effective heating system based on induction electrothermal technologies are required to be developed.

Key words: hydrocarbon resources, continental shelf, subsea pipeline, viscosity control, direct electric heating, induction-heating system, secondary power source.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПОДОГРЕВА ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ИНДУКЦИОННОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В связи с интенсивным ростом потребления углеводородного сырья во всех сферах промышленности увеличились поисково-разведочные работы в акваториях морей и океанов. Все большую актуальность приобретает освоение углеводородных ресурсов северных морей Северного Ледовитого океана.

Добытый нефтепродукт с морского месторождения может транспортироваться танкерами или трубопроводной системой. Последний способ транспортировки повышает надежность и экологичность технологического процесса, однако экономическая эффективность нефтепровода зависит от физико-химических свойств перекачиваемой по нему нефти. При транспортировке нефтепродукта по подводному трубопроводу температура нефтепродукта падает из-за низких температур окружающей среды. Следовательно, увеличивается вязкость нефтепродукта и уменьшается рабочее сечение трубопровода. Все это приводит к увеличению нагрузки на насос и затрат на электроэнергию. Поэтому возникает необходимость в уменьшении параметра вязкости нефтепродукта. Данную проблему можно решить физическим, химическим и термическим методами. Однако некоторые из них неприменимы под водой, а другие экономически неэффективны.

Задача снижения вязкости нефтепродукта и поддержания его температуры на необходимом уровне требует применения новых технологий и систем. При этом они должны обеспечить высокую надежность, большой срок службы и наименьшие капитальные затраты. К таким системам относятся электрические системы нагрева. На сегодняшний день уже получил популярность прямой электрический нагрев, однако данная система не подходит для протяженных трубопроводов и имеет ряд существенных недостатков. В связи с этим возникает необходимость в создании эффективной системы нагрева на основе индукционных электротермических технологий.

Ключевые слова: углеводородные ресурсы, континентальный шельф, подводный трубопровод, регулирование вязкости, прямой электрический нагрев, индукционная нагревательная система, вторичный источник питания.

Nowadays the most part of oil and gas production is still carried out onshore.

Nevertheless, a large number of gas and oil is already being produced offshore. Now 30 % of the world's oil and gas development is carried out offshore — and this figure is rising with every passing year. Oil and gas are produced in offshore 35 countries, among which are such leading countries as Norway, Canada and the USA [1].

Russia has the largest continental shelf, the area of which is 6.3 million square kilometers, and 52 % of this territory is promising for oil and gas production. That is why the extraction of hydrocarbon resources on the continental shelf is considered to be one of the main strategic tasks of the Russian Federation [2]. In this case it is necessary to develop cost-effective technologies, capable of ensuring safe and effective oil and gas production [3].

One of the methods for increasing environmental security and flow capacity is the use of oil and gas pipeline transporting. However, during oil product delivery via a subsea pipeline, the oil product temperature decreases because of the low environmental temperature. As a result of this, pumped liquid viscosity increases and a pipeline cross-section decreases due to asphalt-resin-paraffin sediments, which lead to an increase of pump load and considerable energy expenditure. Consequently, the necessity occurs to regulate rheological properties of oil, namely — the viscosity reduction [4].

There are many different methods for regulating the rheological properties of pumped liquid: physical, chemical, thermal, electrical [4]. As for subsea pipelines heating, it is optimal to use the electrical method. Well-known methods of pipelines electrical heating by thermal field formation are shown in Table 1.

Table 1. Electrical methods for regulating the rheological properties of pumped liquid

Heating method	Heating source type
Resistive	of constant power
	of variable power
Inductive	indirectly inductive (skin-system)
	of commercial frequency
	of semi-high frequency
Direct	by alternating current
	by direct current
Super-high frequency	by electromagnetic field of super-high frequency

Direct electric heating is one of the widely used heating systems for subsea pipelines. When heating flow lines in offshore fields, direct electrical heating has been widely applied. The operating principle of the direct electrical heating is immediate passage of electric current through the material of a metal pipe (Figure 1) [5].

Heat removal in the pipe P is determined by the following relationship:

$$P = I^2 \cdot R,$$

where I is the current in the pipe, A;

R is the pipe resistance, Ohm.

But such system has some disadvantages being as follows:

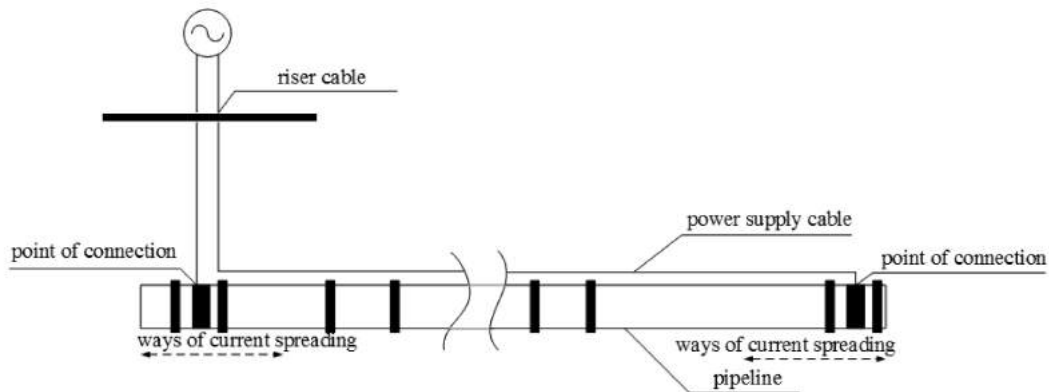
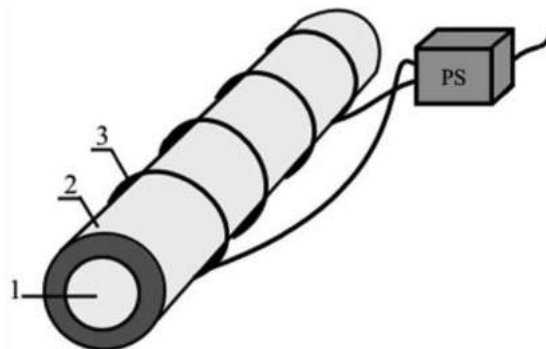
- high thermal-power losses in the pipe;
- high economic expenses involved in cable and supply systems;

- lack of heat-transfer process control;
- non-uniform current distribution in the area of welding joints;
- residual potential on the pipeline surface;
- negative impact of electric current on the environment.

Thus, from the foregoing we can conclude that this system is effective for short pipelines only.

In order to eliminate the disadvantages mentioned above, induction-heating system is offered to use; it consists of secondary power source and a heating element located on the facility — inductor (Figure 2) [6].

As an example, a process pipeline with a diameter of 526 mm and with the length of

**Figure 1.** Basic diagram of subsea pipelines direct electrical heating operation

1 — pumped liquid; 2 — pipeline; 3 — inductor; PS — power supply

Figure 2. Induction-heating system

100 km was taken. The calculation showed that, the induction-heating system (IHS) with capacity of 34 kW maintains the temperature of oil in the range from +30 °C to +60 °C for the space of 60 km. For further efficient oil pumping, it is necessary to install one more IHS (on the pipeline section of 60 km) or to increase the capacity of initial IHS (Figure 3).

Figure 4 shows the induction-heating system layout on the underwater part of a pipeline with the local and stepped method. As for the secondary power source, it can be located both on the platform and in immediate vicinity from the inductor (under water), but when transferring the

energy, losses are usually reduced. In the first case, supply of secondary power source is carried out from the electric power substation; and in the second case, it is carried out from the power cable connected through the coupling [7].

As a result, induction-heating system is environmentally friendly, as heating isn't spread into environment from outside, and there is an opportunity to regulate the process of heating. This system is also adapted in various power supply circuits of an offshore oil and gas platform, such as centralized and autonomous, and induction-heating system power losses are parts per million per cent.

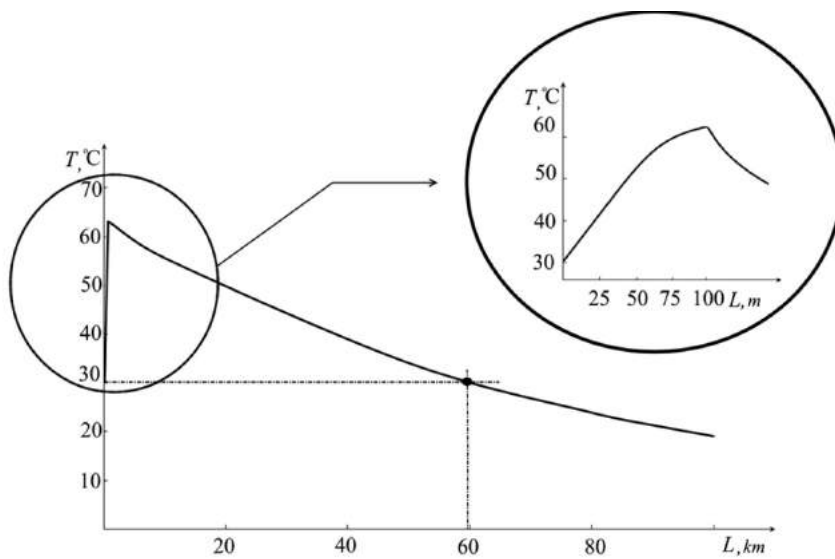


Figure 3. Diagram of pumped liquid temperature distribution with the induction-heating method

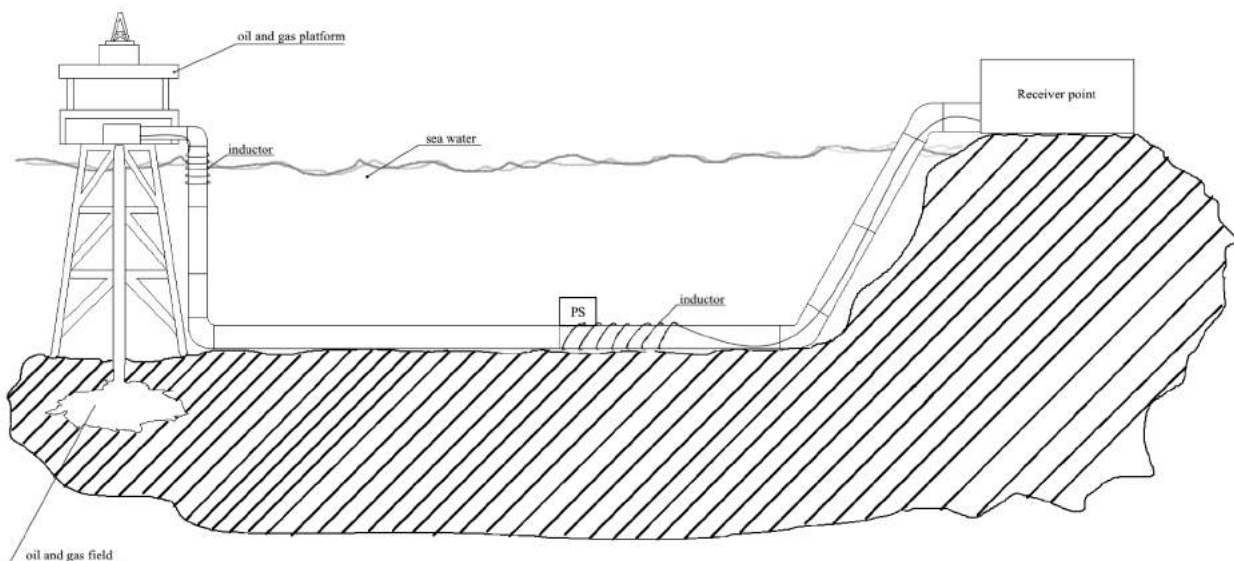


Figure 4. Induction-heating system layout on the underwater part of a pipeline with the local and stepped method

Conclusion

Thus, we can conclude, that the use of the induction-heating system for subsea pipelines

makes it possible to increase safety and efficiency of the technological process.

References

1. Philipov A.V. Oil and Gas — Marine Sequel of the Earth History // Oil and Gas Vertical. 2013. No. 12. P. 104–107.
2. Chaturova D.I. Heating Systems Analysis of Offshore Pipelines // Subsurface Management Problems: Collection of Research Papers of International Forum-Competition of Young Scientists. 2016. P. 190–191.
3. Chaturova D.I. Monitoring Complex of Offshore Oil and Gas Platform Facilities as a Part of Subsea Pipelines Heating System // Electric Drive, Electric Technologies and Electric Equipment of Enterprises: Collection of Research Papers of the III International (IV All-Russian) Scientific and Technical Conference, 2017. — P. 430–435.
4. Chaturova D.I. Heating Systems Analysis of Offshore Pipelines // Actual Problems of Science and Technology: Collection of Research Papers of the VIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists. 2015. P. 45–51.
5. Khrenkov N.N. Direct Electric Heating of Underwater Pipelines // Industrial Electric Heating and Electric Warming: Electronic Journal. M., 2013. Issue 2. URL: <http://ru.calameo.com/read/0017674059a262e79f9cb> (accessed: 01.10.2016).
6. Konesev S.G., Kirillov R.V., Kondratyev E.Yu., Sadikov M.R., Khazieva R.T., Khlyupin P.A. Induction Heating System for Length of the Pipeline // Oil and Gas Business. 2014. Part 12, No. 4. P. 40–47.
7. Chaturova D.I., Khlyupin P.A. Technological Complex of the Heating System of Underwater Field Pipelines // Actual Problems of Science and Technology: Materials of IX International Scientific-Practical Conference of Young Scientists. 2016. P. 324–326.

Список литературы

1. Филиппов А.В. Нефть и газ — морское продолжение земной истории // Нефтегазовая вертикаль. 2013. № 12. С. 104–107.
2. Чатурова Д.И. Анализ систем подогрева шельфовых трубопроводов // Проблемы недропользования: Сб. науч. тр. Междунар. форума-конкурса молодых ученых. 2016. С. 190–191.
3. Чатурова Д.И. Комплекс мониторинга объектов морской нефтегазовой платформы в составе системы нагрева подводных трубопроводов // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб.к науч. тр. III Междунар. (VI Всеросс.) науч.-техн. конф. 2017. С. 430–435.
4. Чатурова Д.И. Анализ систем подогрева шельфовых трубопроводов // Актуальные проблемы науки и техники: сб. матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. 2015. С. 45–51.
5. Хренков Н.Н. Прямой электрический нагрев подводных трубопроводов // Промышленный электрообогрев и электроотопление: электрон. журн. 2013. Вып. 2. URL: <http://ru.calameo.com/read/0017674059a262e79f9cb> (дата обращения: 01.10.2016).
6. Конесев С.Г., Кириллов Р.В., Кондратьев Э.Ю., Садиков М.Р., Хазиева Р.Т., Хлюпин П.А. Индукционные нагревательные системы для протяженных нефтепроводов // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12, № 4. С. 40–47.
7. Чатурова Д.И., Хлюпин П.А. Технологический комплекс системы подогрева подводных промысловых трубопроводов // Актуальные проблемы науки и техники: матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. 2016. С. 324–326.



Ерохин В. В.
Erokhin V. V.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Авиационное и радиоэлектронное оборудование»,
Иркутский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет гражданской авиации»,
г. Иркутск, Российская Федерация

УДК 621.396

БИКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ СИГНАЛА ТРАНСПОНДЕРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ

В системах подвижной связи с многостанционным доступом энергетическая проблема решается путем управления уровнем мощности передатчика. Разработанные алгоритмы управляют излучаемой мощностью станции на основе анализа отношения сигнал/помеха. Автоматическое зависимое наблюдение вещательного типа представляет собой синхронную систему обмена данными согласно логике работы, в которой имеется возможность определения дальности между абонентами сети и их местоположения. При этом измеренная дальность является исходной информацией для синтеза алгоритма управления мощностью транспондера системы. В процессе управления мощностью изменяется отношение сигнал/шум, что влияет на качество определения дальности, при этом зависимость точности оценки от изменения мощности в общем случае неоднозначна — уменьшение мощности ухудшает точность измерения дальности и, как следствие, качество навигационных определений. В этой связи возникает задача управления мощностью при условии одновременной минимизации двух критериев оптимальности, решение которой базируется на методах теории игр и многокритериальной оптимизации.

Научную ценность работы представляет синтезированный алгоритм управления мощностью сигнала транспондера системы автоматического зависимого наблюдения на основе методов теории игр и многокритериальной оптимизации, который позволяет находить компромиссное решение при двух критериях оптимизации.

Практическую значимость работы составляют предложения по реализации предложенного алгоритма управления мощностью, который позволит обеспечить требуемые энергетические характеристики линии передачи данных при высокой точности измерения дальности между объектами, что подтверждается результатами имитационного статистического моделирования.

Ключевые слова: транспондер, многокритериальная оптимизация, теория игр, управление мощностью, фильтр Калмана, оптимальное управление, компромиссное решение, автоматическое зависимое наблюдение, псевдодальность, отношение сигнал/помеха.

BICRITERIAL OPTIMIZATION OF THE TRANSPONDER SIGNAL POWER OF THE AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE SYSTEM

In mobile communication systems with multiple access power the problem is solved by controlling the transmitter power level. The developed algorithms control the radiated power of the station based on the analysis of the signal-to-noise ratio. Automatic dependent surveillance of the broadcast type is a synchronous data exchange system according to the logic of operation, which is possible to determine the distance between subscribers of the network and their location. In this case, the measured range is the initial information for the synthesis of the power control algorithm of the transponder system. In the power control process, the signal-to-noise ratio changes, which affects the quality of the range determination, while the accuracy of the estimate depends on the

power change in the general case ambiguous — the reduction in power degrades the accuracy of the range measurement and, as a consequence, the quality of the navigation definitions. In connection, there arises the problem of power control under the condition of simultaneous minimization of two optimality criteria, the solution of which is based on the methods of game theory and multicriteria optimization.

The scientific value of the work is represented by a synthesized algorithm for controlling the signal strength of a transponder of the automatic dependent observation system based on the methods of game theory and multi-criteria optimization, which allows finding a compromise solution under two optimization criteria.

The practical importance of the work is made by proposals for the implementation of the proposed power control algorithm, which will provide the required power characteristics of the data transmission line with high accuracy of measuring the range between objects, which is confirmed by the results of simulation.

Key words: transponder, multicriteria optimization, game theory, power control, Kalman filter, optimal control, compromise solution, automatic dependent surveillance, pseudo-range, signal-to-noise ratio.

Введение

Система автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В) является способом наблюдения, при котором динамические управляемые объекты: воздушные суда и транспортные средства, обмениваются информацией о параметрах траекторного движения, полученной на основе глобальной навигационной спутниковой системы, а также транслируют эти данные в центр управления воздушным движением [1–3]. В системе АЗН-В применяется УКВ линия передачи данных (ЛПД), допустимое отношение сигнал/шум (ОСШ) при функционировании которой составляет 12 дБ. При наложении сигналов транспондер декодирует более мощный сигнал, оставив слабый ниже шумового порога [1–3].

В системах подвижной связи с кодовым разделением каналов энергетическая проблема решается путем управления уровнем мощности передатчика. Разработанные алгоритмы управления позволяют изменять излучаемую мощность станции на основе анализа отношения сигнал/помеха (ОСП) [4, 5]. При организации обмена данными в синхронной системе АЗН-В транспондер измеряет время распространения сигнала на основе единой шкалы времени. Совокупность измеренных псевдодальностей (ПД) позволяет на основе координат передающих объектов, декодированных из полученных сообщений, определить местоположение. Причем уровень мощности должен удовлетворять

показателям точности измерения ПД для эффективного решения задач местоопределения [1–3]. В процессе управления мощностью изменяется ОСШ, что влияет на качество определения ПД, при этом уменьшение мощности ухудшает точность измерения ПД и, как следствие, качество навигационных определений. Радиальная средне-квадратическая погрешность (СКП) σ_R определения плановых координат представляется в виде

$$\sigma_R = \sigma_{ПД} G\Phi,$$

где $\sigma_{ПД}$ — СКП измерения ПД; $G\Phi$ — геометрический фактор, характеризующий взаимное расположение объектов.

Требования к одновременному достижению высоких характеристик энергетических и точностных показателей являются противоречивыми. Поэтому возникает задача управления мощностью при условии одновременной минимизации двух критериев оптимальности — отклонения мощности сигнала от требуемого значения и погрешности измерения ПД. Минимумы указанных критериев достигаются при разных значениях мощности сигнала, поэтому возникает необходимость выбора правил принятия решения задачи бикритериальной оптимизации при выполнении действующих ограничений. Решение данной задачи может быть получено методами теории игр и многокритериальной (векторной) оптимизации [6–8].

Цель статьи — синтез алгоритма управления мощностью сигнала транспондера мето-

дами теории игр и многокритериальной оптимизации.

Постановка задачи. Рассматриваемая система, в которой осуществляются операции управления и оценивания, описывается уравнениями динамики и наблюдения. Пусть уравнение динамики для требуемой мощности P_{TP} задано в виде

$$P_{TP,v} = a_{TP,v} P_{TP,v-1} + g_{v-1} n_{TP,v-1}, \quad (1)$$

где v — временной индекс; $a_{TP,v}$ — коэффициент динамики мощности; g_{v-1} — коэффициент ограничений на шумы системы; $n_{TP,v}$ — дискретный белый гауссовский шум (ДБГШ) с известными характеристиками [4, 5].

Уравнение динамики для управляемой мощности P_y представим в виде функции двух управляющих зависимостей, имеющих противоположное целевое предназначение [6–8]:

$$P_{y,v+1} = a_{y,v/v+1} P_{y,v} + b_{y,v/v+1} (u_v + \omega_v), \quad (2)$$

где $a_{y,v}$ — коэффициент динамики управляемой мощности, коэффициенты динамики $a_{TP,v}$ и $a_{y,v}$ в уравнениях (1) и (2) одинаковы; $b_{y,v}$ — коэффициент управляющих воздействий системы; u_v и ω_v — управляющие воздействия; $u_v, \omega_v \in U$ — множество допустимых значений управлений.

Оценка требуемой мощности и времени задержки сигнала производится на основе обработки наблюдений в транспондере. Модель сообщения и наблюдений представляет собой измерение ПД в виде:

$$x_{v+1} = \Phi_{v/v+1} x_v + B_{v+1} (\omega_{v+1} + u_{v+1}) + n_{v+1}, \quad (3)$$

$$\xi_v = H_v x_v + n_{\xi,v}, \quad (4)$$

где $\Phi_{v/v+1}$ — матрица динамики системы; H_v — матрица наблюдений; B_v — матрица управляющих воздействий; n_v и $n_{\xi,v}$ — векторы независимых ДБГШ с нулевыми математическими ожиданиями и ковариационными матрицами V_v и ψ_v .

Оптимальность управления понимают в смысле минимизации того или иного критерия качества. В теории оптимального управления рассматриваются задачи с локальным критерием, обеспечивающим оптимальность в каждый момент времени. При решении практических задач управления мощностью

потери зависят не от абсолютных значений, а от их разности или ошибки, при этом показателем качества является обобщенный квадратичный функционал ошибки управления, который применительно к рассматриваемому случаю представим в виде [9]:

$$J_{1,v} = M\{c_{1,v}(x_v, \hat{x}_v)\} = M\{(x_v - \hat{x}_v)^T Q_v (x_v - \hat{x}_v)\},$$

где $x_v = [d, V_d]^T$ — истинное значение вектора состояния оцениваемых параметров в момент времени t ; \hat{x}_v — оптимальная оценка вектора состояния; $c_{1,v}(x_v, \hat{x}_v)$ — заданная неотрицательно определенная квадратичная функция текущих потерь; Q_v — симметричная неотрицательно определенная матрица штрафов.

Следующая цель — формирование таких управлений u_v , для которых управляемое значение мощности $P_{y,v}$ наилучшим образом отслеживает требуемое значение мощности $P_{TP,v}$. Для поиска оптимального управления будем использовать квадратичный критерий качества, который в общем виде записывается в виде [9]

$$J_{2,v} = M\{c_{2,v}(P_{TP,v}, P_{y,v})\} = M\{(P_{TP,v} - P_{y,v})^2\}, \quad (5)$$

где $c_{2,v}(P_{TP,v}, P_{y,v})$ — функция потерь, которая возрастает с увеличением отклонения управляемой мощности относительно требуемого значения.

При поиске оптимального управления используют интегральные квадратичные критерии качества, которые применительно к решаемой задаче записывается в виде [9]

$$J_1(\omega) = \min_{\omega_1^{N-1} \in U} M\left[\sum_{v=1}^N \{(x_v - \hat{x}_v)^T Q_v (x_v - \hat{x}_v)\}\right] = \min_{\omega_1^{N-1} \in U} M\left[\sum_{v=1}^N c_{1,v}(x_v, \hat{x}_v)\right], \quad (6)$$

$$J_2(u) = \min_{u_1^{N-1} \in U} M\left[\sum_{v=1}^N \{q_{y,v}(P_{TP,v} - P_{y,v})^2\}\right] = \min_{u_1^{N-1} \in U} M\left[\sum_{v=1}^N c_{2,v}(P_{TP,v}, P_{y,v})\right]. \quad (7)$$

Для бикритериальной задачи возможно компромиссное решение, которое удовлетворяет в некотором смысле компонентам векторного критерия [6–8]. Для формирования целевой функции $J(\omega, u)$ для векторного показателя $J = [J_1, J_2]$ воспользуемся методом линейной свертки [6–8]:

$$J(\omega, u) = \beta_1 J_1(\omega) + \beta_2 J_2(u),$$

где $\beta_j > 0$ — весовые коэффициенты важности критериев.

Синтез алгоритма. Для получения необходимых условий оптимальности удобно использовать идеи методов теории игр [8]. При заданных оптимальных управлениях критериальную функцию $J(\omega, u)$ с помощью уравнений процесса можно выразить через значения управляемой мощности $P_{y,v}$ на любом шаге процесса в виде [8]

$$J(u, \omega) = f(P_{Y,1}, P_{Y,2}, \dots, P_{Y,v}, \dots, P_{Y,N}).$$

Пусть процесс описывается уравнением (2) и оптимальными управлениями являются такие, которые обеспечивают минимаксное значение критериальной функции $J(\omega, u)$, т.е.

$$\min_{u_0} \max_{\omega_0} \dots \min_{u_v} \max_{\omega_v} \dots \min_{u_{N-1}} \max_{\omega_{N-1}} J(u, \omega).$$

Для нахождения алгоритма оптимального управления введем функцию Беллмана-Стратоновича, определяемую следующим выражением [10]:

$$S_v(\xi'_v) = \min_{u_v \in U} \max_{\omega_v \in U} M\{c_v(x_v) + S_{v+1}(\xi'_{v+1}) | \xi'_v, \omega_v, u_v\}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что оптимальные управления являются функциями номера шага процесса v и вектора состояния x_v , кроме того, управление ω выбирается при известном управлении u . Поэтому оптимальные управления будем обозначать следующим образом: $\hat{u}_v(x), \hat{\omega}_v(x) = \hat{\omega}_v(x, \hat{u})$, тогда [10]

$$S_{N-v}(\xi_1^{N-v}) = \min_{u \in U} \max_{\omega \in U} M\{c_{N-v}(x_{N-v}) + S_{N-v+1}(\xi_{N-v+1}) | \xi_1^{N-v}, \hat{\omega}_{N-v}, \hat{u}_{N-v}\}. \quad (9)$$

Для усеченных рисков уравнение (9) принимает вид [10]

$$S_v(\gamma_v) = \min_{u_v \in U} \max_{\omega_v \in U} M\{c_v(x_v, \hat{x}_v) + S_{v+1}(\gamma_{v+1}) | \gamma_v, \omega_v^{v+1}, u_v^{v+1}\},$$

где $\gamma_v = [\hat{x}_v, R_v]$ — вектор достаточных координат.

Параметры вектора достаточных координат γ_v рассчитываются на основе уравнений фильтра Калмана [9]:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{v+1} &= \Phi_{v/v+1} \hat{x}_v + B_{v+1}(\omega_{v+1} + u_{v+1}), \\ \hat{x}_{v+1} &= \tilde{x}_{v+1} + R_{v+1} H_{v+1}^T V_{v+1}^{-1} [\xi_{v+1} - H_{v+1}(\tilde{x}_v)], \\ R_{v+1}^{-1} &= [\Phi_{v/v+1} R_v \Phi_{v/v+1}^T + G_{v/v+1} Q_{v+1} G_{v/v+1}^T]^{-1} + H_{v+1}^T V_{v+1}^{-1} H_{v+1}, \end{aligned}$$

Для получения гарантированного результата бикритериальная оптимизация сводится к следующей процедуре [6, 7]:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} \max_{\omega \in \Omega} J(\omega, u).$$

На первом этапе определяется функция $\varphi(u) = \max_{\omega \in \Omega} J(\omega, u)$ решением задачи максимизации $J(\omega, u)$ по ω при заданном управлении u . Затем решается задача минимизации функции $\varphi(u)$ по u [6, 7]:

$$u^* = \arg \min_{u \in U} \varphi(u).$$

На первом этапе для нахождения оптимального управления воспользуемся методом спуска, математическую формализацию которого можно представить в виде [6, 11]:

$$\begin{aligned} \omega_v[k+1] &= \omega_v[k] + h_k p_k, \\ k &= 0, 1, 2, \dots, n, \end{aligned}$$

где p_k — вектор, формирующий направление спуска

h_k — шаг поиска;

$\omega_k[k]$ — k -ое приближение, k — номер итерации, n — число итераций.

На втором этапе применяется метод Хука-Дживса, в соответствии с которым алгоритм оптимизации мощности сигнала можно представить в виде [11]:

1. Задаются значением начальной мощности $P_{y,v}[0]$ и приращением ΔP , допустимым значением ε изменения ΔP , требуемой точностью δ ;

2. На основе предположения, что $P_{y,v}[0]$ задает базисную точку $P_{y,v}^{\text{баз}}$, вычисляется значение функции $\varphi_k^{\text{баз}}(u_v)$;

3. Циклически изменяется $P_{y,v}$ на величину $P_{y,v}$, т.е. $P_{y,v}[k] = P_{y,v}^{\text{баз}} + \Delta P$ и $P_{y,v}[k] = P_{y,v}^{\text{баз}} - \Delta P$. Вычисляются значения функции $\varphi_k(u_v)$ и сравниваются с $\varphi_k^{\text{баз}}(u_v)$. Если $\varphi_k(u_v) < \varphi_k^{\text{баз}}(u_v)$ то $P_{y,v}$ получает новое значение, и вычисления повторяются. Иначе значение мощности остается неизменным и выполняется переход к пункту 4;

4. Выполняется сравнение $P_{y,v}$ и ε ; если $P_{y,v} < \varepsilon$, то вычислительная процедура прекращается, иначе уменьшают значения ΔP и переходят к пункту 3. Вычислительный процесс останавливается при условии $|P_{y,v}[k] - P_{y,v}[k-1]| < \varepsilon$ или $|\varphi_k(u_v) - \varphi_{k-1}(u_v)| < \delta$ [11].

Геометрическая интерпретация задачи бикритериальной оптимизации мощности представлена на рисунке 1.

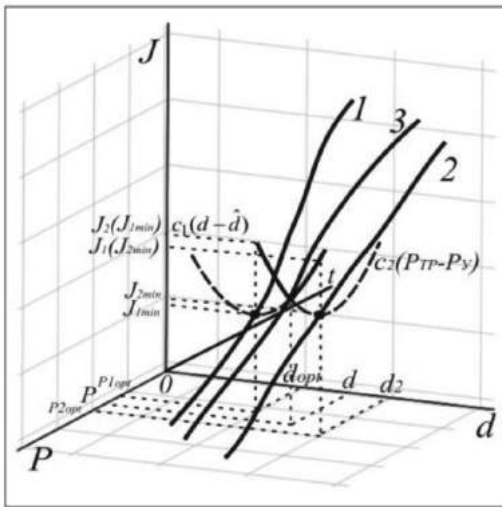
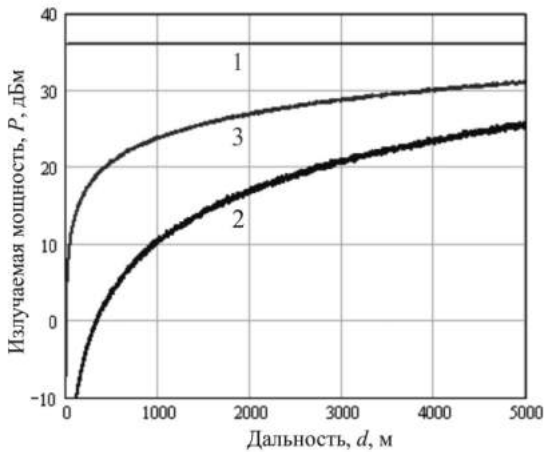


Рисунок 1. Геометрическая интерпретация задачи бикритериальной оптимизации

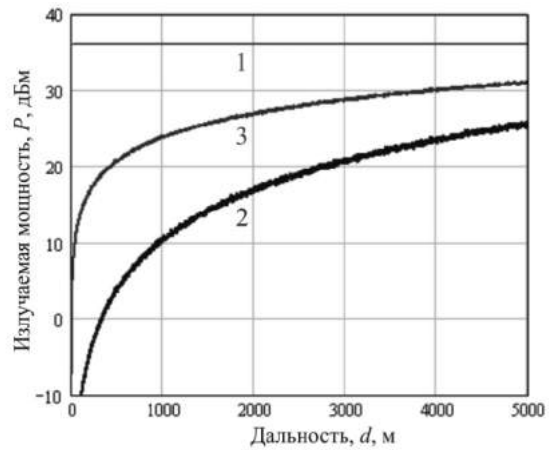


1 — максимально-возможная излучаемая мощность;
2 — управляемая мощность сигнала минимизирующая отклонение текущего значения относительно требуемого; 3 — мощность, вычисленная по результатам бикритериальной оптимизации

Рисунок 2. Зависимость управляемой мощности излучаемого сигнала от дальности

Результаты моделирования. Результаты моделирования алгоритма оптимизации мощности приведены на рисунках 2, 3. На рисунке 2 представлены зависимости управляемой мощности от дальности, на рисунке 3 — результаты сравнительного анализа энергетических характеристик принимаемого сигнала без управления и при реализации алгоритма управления. Моделирование проведено при условии, что в соответствии с тактико-техническими характеристиками максимальное значение мощности излучаемого сигнала передатчиком транспондера равно 36 дБм [1].

Анализ полученных зависимостей показывает, что реализация предложенного алгоритма позволяет обеспечить требуемые энергетические характеристики при уровне мощности, обеспечивающем высокую точность измерения дальности между объектами.



1 — максимально-возможная мощность принимаемого сигнала; 2 — мощность сигнала в результате минимизации отклонения текущего значения относительно требуемого; 3 — мощность принимаемого сигнала, вычисленная по результатам бикритериальной оптимизации; 4 — требуемое значение мощности

Рисунок 3. Зависимость мощности принимаемого сигнала от дальности

Вывод

Предложен способ решения задачи управления мощностью сигнала транспондера, обеспечивающий минимизацию отклонения от заданного значения и погрешность определения псевдодальности, основанный на методах теории игр и многокритериальной оптимизации. Синтезирован алгоритм бикритериальной оптимизации на основе мини-

максного управления. Показано, что разработанный алгоритм позволяет находить компромиссное решение при двух критериях оптимизации.

Таким образом, разработанный алгоритм управления позволяет находить компромиссное решение задачи бикритериальной оптимизации мощности сигнала транспондера системы АЗН-В.

Список литературы

1. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации / Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В. Васильев и др.; под ред. С.Г. Пятко и А.И. Красова. СПб.: Политехника, 2004. 446 с.
2. Cho T., Lee C., Choi S. Multi-Sensor Fusion with Interacting Multiple Model Filter for Improved Aircraft Position Accuracy // *Sensors*. 2013. 13. P. 4122-4137. DOI:10.3390/s130404122.
3. Abdulaziz A., Yaro A.S., Adam A.A., Kabir M.T., Salau H.B. Optimum Receiver for Decoding Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Signals // *American Journal of Signal Processing*. 2015. No. 5 (2). P. 23–31.
4. Шелухин О.И., Березенко С.В. Управление мощностью мобильной станции в сетях с кодовым разделением каналов на основе оценки ошибки сигнал-помеха // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2006. Т. 2, № 2. С. 27–29.
5. Артюшенко В.М., Енютин К.А. Управление уровнем мощности в системах подвижной связи // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2008. Т. 4, № 1, 2. С. 80–83.
6. Малышев В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 440 с.
7. Лазарев Ю.Н., Гераськин М.И. Алгоритм решения многокритериальных задач управления // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2001. Т. 3, № 1. С. 80–85.
8. Bonanno G. Game theory // *University of California, Davis*. 2015. 578 p.
9. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.
10. Стратонович Р.Л. Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления. М.: МГУ, 1966. 319 с.
11. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2, свободный (дата обращения: 10.09.2017).

References

1. Automated Systems of Air Traffic Control: New Information Technologies in Aviation / R.M. Akhmedov, A.A. Bibutov, A.V. Vasiliev et al.; Ed. S.G. Pyatko and A.I. Krasova. Saint-Petersburg: Politechnica, 2004. 446 p.
2. Cho T., Lee C., Choi S. Multi-Sensor Fusion with Interacting Multiple Model Filter for Improved Aircraft Position Accuracy // *Sensors*. 2013. 13. P. 4122-4137. DOI: 10.3390/s130404122.
3. Abdulaziz A., Yaro A.S., Adam A.A., Kabir M.T., Salau H.B. Optimum Receiver for Decoding Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Signals // *American Journal of Signal Processing*. 2015. No 5(2). P. 23–31.
4. Shelukhin O.I., Berezenko S.V. Mobile Station Power Control in Code-Division-Based Networks Based on Signal-to-Interference Error Estimation // *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2006. T. 2, No. 2. P. 27–29.
5. Artyushenko V.M., Enyutin K.A. Controlling the Power Level in Mobile Communication Systems // *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2008. T. 4, No. 1, 2. P. 80–83.
6. Malyshev V.V. Optimization Methods in Problems of System Analysis and Control. Moscow: MAI-PRINT Publ., 2010. 440 p.
7. Lazarev Yu.N., Geraskin M.I. Algorithm for Solving Multicriteria Control Problems // *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2001. Vol. 3, No. 1. P. 80–85.
8. Bonanno G. Game Theory // *University of California, Davis*. 2015. 578 p.
9. Sage E.P., White C.S. Optimum System Management. Moscow: Radio and Communication, 1982. 392 p.
10. Stratonovich R.L. Conditional Markov Processes and Their Application to the Theory of Optimal Control. Moscow: Moscow State University, 1966. 319 p.
11. Trifonov A.G. Statement of the Optimization Problem and Numerical Methods for its Solution. [Electronic Resource]. Available at: URL: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2, free (accessed 10.09.2017).



Султанов А. Х.
Sultanov A. Kh.

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



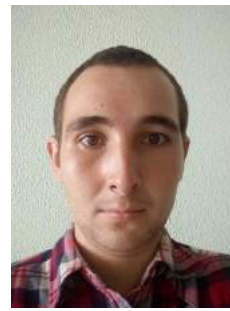
Мешков И. К.
Meshkov I. K.

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



Мешкова А. Г.
Meshkova A. G.

*аспирант, инженер кафедры
телекоммуникационных систем,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Иванов В. В.
Ivanov V. V.

*аспирант, кафедры
телекоммуникационных систем,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621.391.037.3

ПОДАВЛЕНИЕ ВНЕПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ OFDM В СЕТЯХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ

Целью данной работы является разработка метода подавления внеполосного излучения, а также повышение спектральной эффективности системы ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)) на основе дополнительной обработки передаваемого сигнала с использованием оконных функций.

Ключевые слова: ортогональное частотное мультиплексирование, оконная функция, коэффициент скругления спектра, коэффициент формы, цифровое телерадиовещание, внеполосное излучение, спектральная эффективность.

OUT-OF-BAND EMISSION SUPPRESSION AND SPECTRAL EFFICIENCY IMPROVEMENT OF THE OFDM SYSTEM IN DIGITAL BROADCASTING NETWORKS

The aim of this work is to develop a method for off-frequency emission suppressing, and to improve the spectral efficiency of the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) system based on additional processing of the transmitted signal using window functions.

Key words: orthogonal frequency multiplexing, window function, spectrum roll-off factor, shape factor, digital television and radio broadcasting, off-frequency emission, spectral efficiency.

В настоящее время во всем мире идут активные работы по внедрению и расширению областей применения систем беспроводной передачи данных, радиосвязи, радиовещания и телевидения, использующих технологию ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)). Использование данной технологии позволяет эффективно использовать отведенную полосу частот и бороться с помехами, возникающими при передаче полезной информации по радиоканалу при сохранении высоких скоростей передачи.

В качестве областей применения данной технологии можно выделить:

— в беспроводных каналах связи технология OFDM используется в следующих стандартах цифрового наземного и спутникового телерадиовещания: DVB-T, DVB-T2, DVB-H, DVB-SH, DVB-T2lite, T-DMB, ISDB-T, MediaFLO, Eureka-147, DAB, DAB+, DRM, DRM+, отечественной системе РАВИС;

— в проводных каналах связи используется в стандарте кабельного цифрового телевизионного вещания DVB-C2 и передачи данных ADSL и VDSL, а также для передачи данных по линиям электропередачи на основе стандарта PLC.

Очень активно OFDM используется в стандартах передачи данных IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16d/e, IEEE 802.16m, LTE и LTE-A и будущих сетей поколения 5G. Еще одним из перспективных и интересных применений OFDM является ее использование в сверхширокополосных сетях передачи данных на основе стандарта IEEE 802.15.3a (UWB – Ultra-Wideband Technology) и последующих разработок.

Однако используемые в OFDM ортогональные поднесущие с прямоугольной формой модулирующего импульса или «приподнятого косинуса» не позволяют бороться в достаточной степени с такими негативными эффектами, как межсимвольная и межканальная интерференция, интерференция по соседнему каналу, временное смещение символов и смещение поднесущих частот, внеполосное излучение. Для компенсации этих явлений используются различные типы защитных интервалов и виртуальные поднесущие, снижающие полезную скорость передачи данных и производительность сети. Также можно увеличить количество поднесущих частот. Однако существуют методы, позволяющие без повышения вычислительной сложности алгоритмов приема и передачи дополнительно снизить негативные факторы, ухудшающие работу системы OFDM. На передающей стороне дополнительно вводятся блоки обработки цифровых данных на основе оконных функций, позволяющих произвести спектральный анализ на ограниченном интервале времени, повысить эффективность работы и получить технологический запас на реализацию более сложной системы в целом. В связи с этим разработка методов повышения эффективности использования технологии OFDM, которые не добавляют вычислительной сложности в алгоритмы обработки сигналов на передающей стороне при сохранении ортогональности поднесущих частот, является актуальной научно-технической задачей.

Решение поставленной задачи выполняется на основе обработки сигнала, представленного на структурной схеме (рисунок 1).

На передающей части символ OFDM после ОБПФ циклически расширяется и

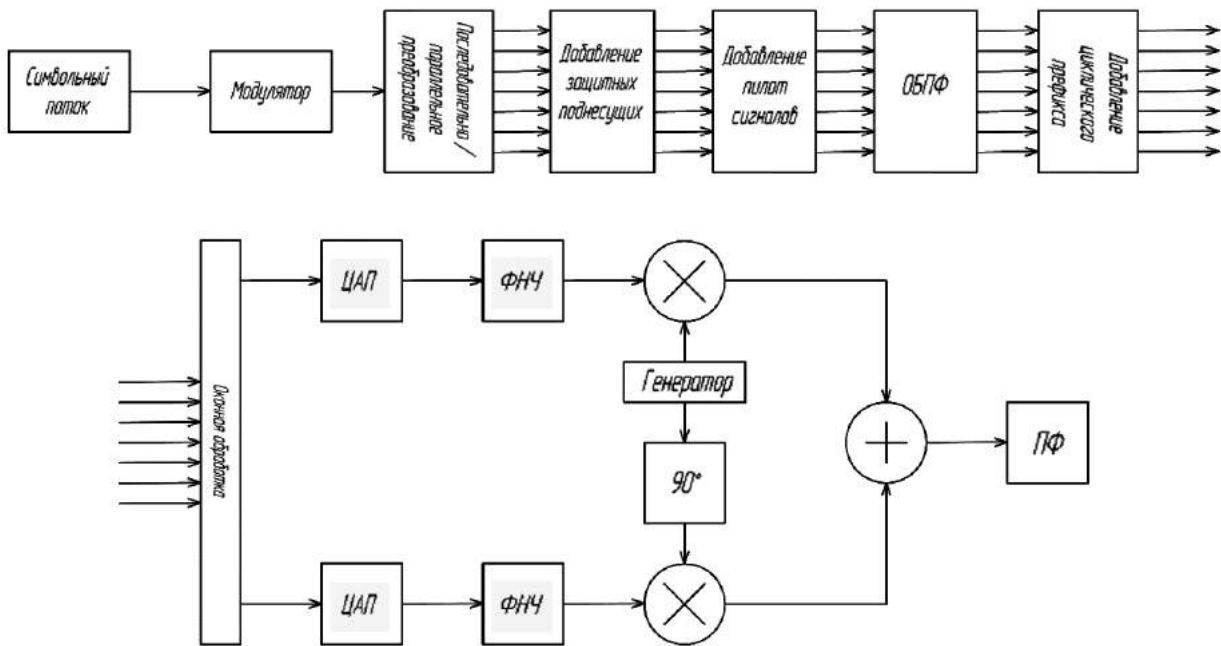


Рисунок 1. Структурная схема передатчика OFDM

затем применяется оконная функция таким образом, чтобы она затрагивала только защитную часть символа – защитный интервал (CP), а оригинальная часть остается неизменной. Основная цель оконной функции в передатчике в том, чтобы сделать спектр резко идущим вниз. Оконная функция делает амплитуду символа OFDM плавно переходящей к нулю на границах символа. С другой стороны, если оконная функция не используется, то спектр внеполосных сигналов уменьшается довольно медленно из-за резкого фазового перехода на границах символа, что может приводить к внеполосному излучению на смежных полосах частот, которое вызывает нарушение электромагнитной совместимости с другими системами передачи и возникновение интерференции по соседнему каналу (ACI — Adjacent Channel Interference).

Увеличение крутизны спада спектральной плотности мощности (СПМ) может привести к увеличению символьной скорости системы за счет более крутого спада спектральных составляющих на границе, а также сглаживанию временных переходов между активным интервалом предыдущего символа и защитным интервалом последующего символа, где возникают разрывы функций, кото-

рые в ограниченном по полосе пропускания канале преобразуются в переходные процессы, искажающие сигналы защитных интервалов, что приведет к уменьшению межсимвольной интерференции (ISI) и повысит крутизну спектра группового сигнала, а также к более эффективному использованию отведенной маски частот и уменьшению влияния межканальной интерференции (ICI) за счет локализации отсчетов FFT. Функция оконного косинуса была применена в IEEE 802.11 WLAN и IEEE 802.16 WMAN [1].

Важнейшим условием, необходимым для любой функции формирования импульса, является то, что преобразование Фурье импульса $p(t)$ должно иметь спектральные нули на частотах $\pm 1/T_{sub}$, $\pm 2/T_{sub}$, ... для обеспечения ортогональности поднесущих. Импульсные формы, которые полностью соответствуют этим требованиям, называются импульсами Найквиста [2, 3]. Большинство данных оконных функций использовались на приемной стороне для подавления ICI. Предлагается в качестве дальнейшего развития и получения новых результатов на передающей стороне использовать оптимизированную оконную функцию BTRC – OBTRC и MBH, в которых

используются дополнительные параметры для управления формой спектра.

Импульсную характеристику ОБТРС можно выразить как:

$$P_{\text{ОБТРС}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{T}, & 0 \leq |t| \leq \frac{T(1-\alpha)}{2} \\ \frac{1}{T} \exp\left(\gamma_n \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right)^n\right), & \frac{T(1-\alpha)}{2} \leq |t| \leq \frac{T}{2}, \\ \frac{1}{T} \left[1 - \exp\left(\gamma_n \left(\frac{T(1+\alpha)}{2} - |t|\right)^n\right)\right], & \frac{T}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+\alpha)}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

где α — коэффициент скругления спектра; n — порядок рекурсивного фильтра, который определяет различные типы импульсов; γ_n — постоянная, которая определяется как:

$$\gamma_n = -\frac{2^n \ln 2}{(\alpha T)^n}. \quad (2)$$

Далее предлагается решить эту же задачу на основе другой оконной функции — МВН. Для применения этой формы импульса в системе OFDM семейство оконной функции должно быть дополнено условием и иметь вид:

$$P_{\text{МВН}}(t, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{T}, & 0 \leq |t| \leq \frac{T(1-\alpha)}{2} \\ \beta - \left(\frac{4\beta-2}{2\alpha T}\right) \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right) + (1-\beta) \cos\left(\frac{\pi}{\alpha T} \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right)\right), & \frac{T(1-\alpha)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+\alpha)}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

Преобразование Фурье окна предлагаемого семейства при $T = 1$ выражается как:

$$P_{\text{МВН}}(f) = \text{Sinc}(f) \left\{ \left[\frac{2(1-\beta) \cos(\alpha \pi f)}{1-4f^2\alpha^2} \right] - \left[\frac{(1-2\beta) \sin(\alpha \pi f)}{\alpha \pi f} \right] \right\}. \quad (4)$$

Параметры β и α , которые являются параметром формы окна и коэффициентом скругления, определяют форму окна и его производительность в системе OFDM.

Для оценки предложенного метода повышения эффективности использования спектра проведено имитационное моделирование в пакете MATLAB режима работы OFDM

для стандарта DVB-T2 и DRM+. Для этого из [4, 5] были выбраны параметры системы, представленные в таблице 1 и задающие режим передачи OFDM.

Для оценки работоспособности разработанного метода выбираются и описываются критерии эффективности. Основным критерием для оценки, связанным с формированием сигнала в системах OFDM, является мощность передачи вне полосы (ООВ) на передатчике. Для оценки эффективности предлагается использовать 2 критерия:

1) уровень внеполосного излучения относительно отведённой маски частот;

2) ширину СПМ группового сигнала по маске на уровне первого перегиба и, как следствие, оценку эффективности использования спектра.

Для получения численных показателей в соответствии с рекомендациями международного союза электросвязи SM.1541-3 «Нежелательные излучения в области внеполосных излучений» [6] и МСЭ-R SM.1046-2 «Определение использования радиочастотного спектра и эффективности радиосистемы» [7] для оценки по первому критерию проведено сравнение излучения за пределами необходимой ширины полосы, которое возникает в диапазоне частот, отделенном от присвоенной частоты излучения менее чем на 250 % от необходимой ширины полосы излучения, и, как правило, будет считаться излучением в области ООВ. В имитационной модели проводится сравнение уровней внеполосного излучения в области ООВ, СПМ группового сигнала для оптимизируемых форм импульса с СПМ группового сигнала, обработанных прямоугольным окном. Для оценки по второму критерию проведено сравнение коэффициента эффективности использования спектра на основе относи-

Таблица 1. Технические характеристики режимов вещания DRM+ и DVB-T2

Технические характеристики цифровой системы телерадиовещания	DRM+ Режим Е	DVB-T2 Режим 1 К
Полоса частот	95 кГц	7,61 МГц
Количество поднесущих	213	853
Частотный разнос поднесущих	444,44 Гц	8929 Гц
Длительность символа OFDM	2,25 мс	112 мкс
Длительность защитного интервала	0,25 мс	28 мкс
Общая длительность символа OFDM	2,5 мс	140 мкс

тельной спектральной эффективности (RSE), которая служит для сравнения спектральной эффективности двух подобных типов радиосистем, обеспечивающих одну и ту же службу. В работе проводится сравнение занимаемой полосы для оптимизируемых форм импульсов. В качестве стандартной взята система, использующая преобразование прямоугольным окном. Кроме того, проводится сравнение крутизны спада СПМ группового сигнала для оптимизированных форм импульса со стандартным. Результат приводится в процентном соотношении для каждого сравнения. Для систем с технологией OFDM коэффициент спектральной эффективности определяется [8]:

$$\eta = \frac{\log_2(M)}{1 + \frac{\alpha}{L}}, \quad (5)$$

где M — кратность модуляции; L — число параллельно передаваемых потоков; α —

коэффициент скругления спектра формирующего фильтра. При использовании оконного преобразования коэффициент спектральной эффективности запишем в виде:

$$\eta = \frac{\log_2(M)}{1 + \frac{\alpha}{LB} \left(1 - \frac{\Delta B}{B}\right)}, \quad (6)$$

где ΔB — экономия полосы за счёт увеличения крутизны среза СПМ.

В первую очередь оценивается уровень внеполосного излучения для предложенных оконных функций. По первому критерию оценка будет производиться следующим образом: для оценки уровня внеполосного излучения проводится интегрирование СПМ в частотной области, за пределами выделенной маски частот для стандартной системы и системы с оконным преобразованием МВН и ОБТРС. Сравнимые области ООВ для режима DVB-T2 1К и DRM+ проиллюстрированы на рисунке 2 соответственно.

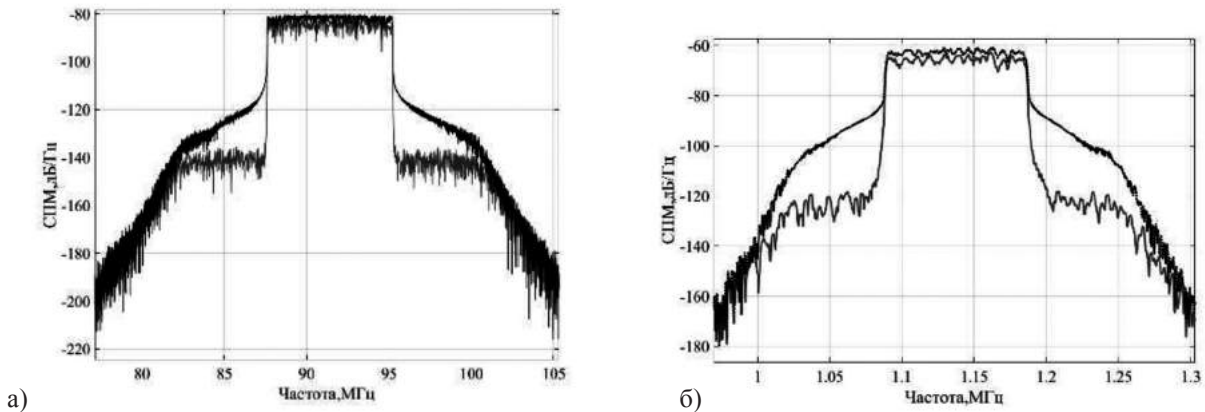


Рисунок 2. Сравнение СПМ в режимах: DVB-T2 1К (а) и DRM+ (б)

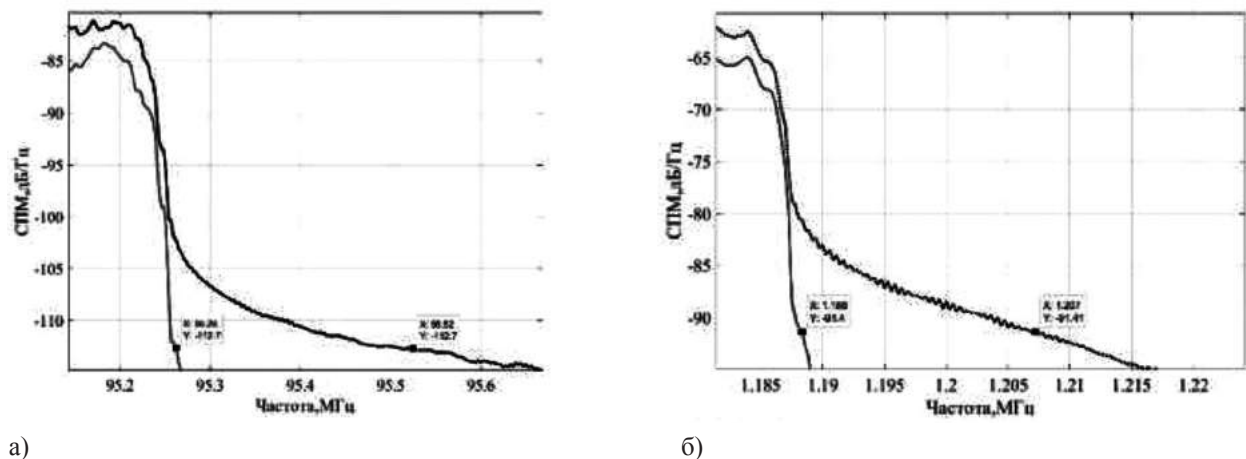


Рисунок 3. Сравнение на уровне первой точки перегиба для систем: DVB-T2 1К (а) и DRM+ (б)

Далее приводится оценка эффективности использования спектра для предложенных оконных функций. Оценка эффективности использования спектра приводится на основе сравнения ширины полосы частот стандартной системы и системы с оконным преобразованием. Сравнение происходит на уровне первой точки перегиба для систем DVB-T2 и DRM+. Сравнимые участки проиллюстрированы на рисунке 3 соответственно.

Также оценивается коэффициент спектральной эффективности и символьной скорости для предложенных оконных функций. В качестве модуляции выбрана квадратурная фазовая модуляция QPSK.

По полученным данным производится анализ и строятся зависимости, приведенные на рисунках 4–6. На основе данного анализа сделаны выводы о рациональности использования предложенного метода в качестве технического решения для повышения спектральной эффективности и уменьшения уровня внеполосных составляющих. Сделаны выводы об оптимальных соотноше-

ниях коэффициента скругления и дополнительных свободных параметров (коэффициент формы и степень формы). На рисунке 4 показана зависимость (в процентах) уровня внеполосных спектральных составляющих от коэффициента формы (оконная функция МВН) для режима вещания DVB-T2 и DRM+.

Выводы из данных рисунка 4:

для подавления внеполосных спектральных составляющих, используя оконную функцию семейства МВН, оптимальное значение коэффициента формы является 1. С увеличением коэффициента скругления уровень внеполосной мощности понижается непропорционально (так как высокие значения α ограничивают производительность системы, логично использовать значения до 0,25). По мере увеличения соотношения количества поднесущих на частотную полосу эффективность метода уменьшается.

На рисунке 5 показана зависимость RSE (в процентах) от коэффициента формы (оконная функция МВН) для режимов вещания DVB-T2 и DRM+ соответственно.

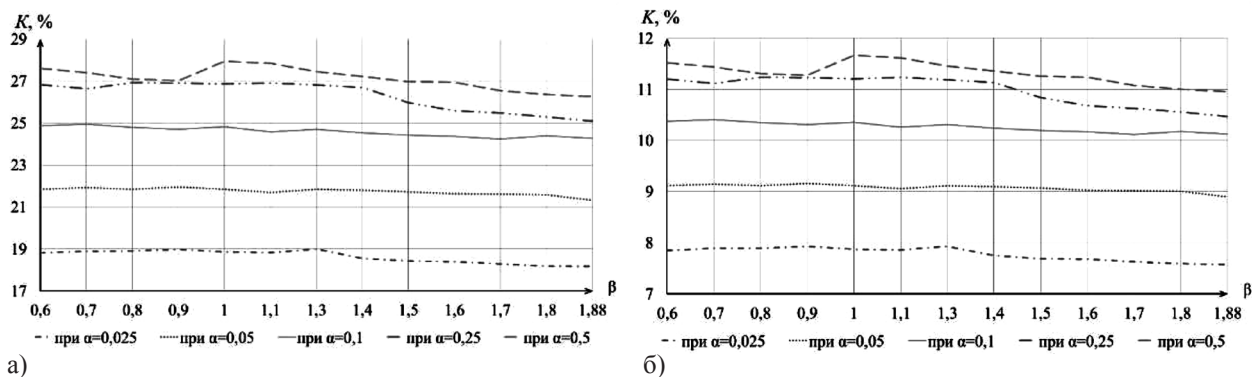


Рисунок 4. Зависимость уровня внеполосных спектральных составляющих от коэффициента формы при фиксированном коэффициенте скругления: DVB-T2 1K (а) и DRM+ (б)

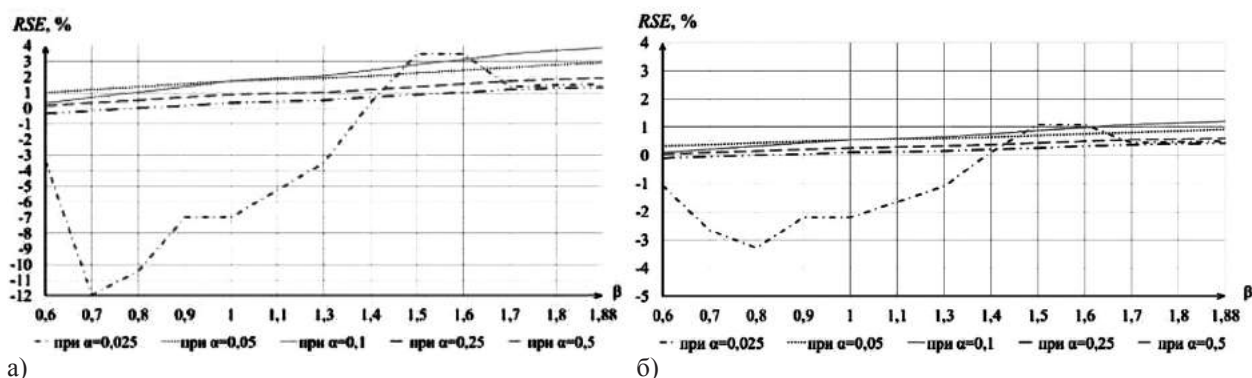


Рисунок 5. Зависимость RSE от коэффициента формы при фиксированном коэффициенте скругления DVB-T2 1K (а) и DRM+ (б)

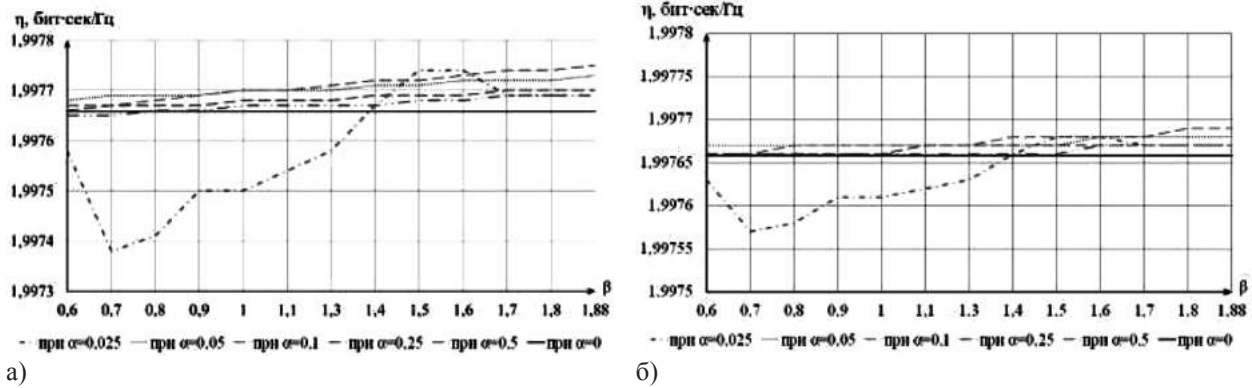


Рисунок 6. Зависимость коэффициента спектральной эффективности от коэффициента формы при фиксированном коэффициенте скругления: DVB-T2 1K (а) и DRM+ (б)

Выводы из данных рисунка 5:

для увеличения относительной спектральной эффективности, при использовании оконной функции семейства МВН, оптимальное значение коэффициента формы является 1,88. С увеличением коэффициента скругления относительная спектральная эффективность изменяется пропорционально. По мере увеличения соотношения количества поднесущих на частотную полосу эффективность метода уменьшается.

На рисунке 6 показана зависимость коэффициента спектральной эффективности от коэффициента формы (оконная функция МВН) для режимов вещания DVB-T2 и DRM+ соответственно.

Выводы из данных рисунка 6:

для увеличения коэффициента спектральной эффективности при использовании оконной

функции семейства МВН оптимальное значение коэффициента формы 1,88. С увеличением коэффициента скругления коэффициент спектральной эффективности изменяется пропорционально. По мере увеличения соотношения количества поднесущих на частотную полосу эффективность метода уменьшается.

Вывод

Разработанный метод позволяет уменьшить спад внеполосного излучения в зависимости от выбранного режима БПФ и стандарта вещания, параметров управления формой окна по сравнению с «прямоугольной» формой оконной функции от 5 % до 26 %, повысить символьную скорость передачи данных до 5 % и повысить коэффициент спектральной эффективности до 0,05 %.

Список литературы

1. IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) // Specific, IEEE. NY, 10016-5997, USA. March, 29, 2012. P. 1591–1593.
2. Stylianos D.A., Matthaïou M., Karagiannidis G.K., Nossek A.J. Optimized «Better Than» Raised-Cosine Pulse for Reduced ICI in OFDM Systems // IEEE. Doha, Qatar. June, 03, 2010. P. 1–4.
3. Saxena R., Joshi H.D. Performance Improvement in an OFDM System with MBH

- Combinational Pulse Shape // Digital Signal Processing. January, 2013. Vol. 23, Issue 1. P. 314–321.
4. Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2 // Report TECH 3348 — EBU. Switzerland, Geneva. May, 2011. P. 33–35.
5. ETSI ES 201 980 V4.1.1 Digital Radio Mondiale (DRM) // System Specification. France, 2014. P. 134–142, 145–148.
6. Рекомендация МСЭ-R SM.1541-3. Нежелательные излучения в области внеполосных излучений // ИТУ Международный союз электросвязи. Женева, 2011. С. 40–43, 47–48.
7. Рекомендация МСЭ-R SM.1046-2. Определение использования радиочастот-

ного спектра и эффективности радиосистемы // ITU Международный союз электросвязи. Женева, 2011. С. 1-4.

8. Зубарев Ю.Б., Кривошеев М.И., Красносельский И.Н. Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы // Научно-исследовательский институт радио (НИИР). 2001. С. 134.

References

1. IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks. Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) // Specific, IEEE. NY, 10016-5997, USA. March, 29, 2012. P. 1591–1593.
2. Stylianos D.A., Matthaiou M., Karagiannidis G.K., Nossek A.J. Optimized «Better Than» Raised-Cosine Pulse for Reduced ICI in OFDM Systems // IEEE. Doha, Qatar. June, 03, 2010. P. 1–4.
3. Saxena R., Joshi H.D. Performance Improvement in an OFDM System with MBH Combinational Pulse Shape // Digital Signal Processing. January, 2013. Vol. 23, Issue 1. P. 314–321.
4. Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2 // Report TECH 3348 — EBU. Switzerland, Geneva. May, 2011. P. 33–35.
5. ETSI ES 201 980 V4.1.1 Digital Radio Mondiale (DRM) // System Specification. France, 2014. P. 134-142, 145-148.
6. Recommendation MSE-R SM.1541-3. Unwanted Emissions in the Field of Out-of-Band Radiations // ITU International Union of Telecommunications. Geneva, 2011. P. 40–43, 47–48.
7. Recommendation MSE-R SM.1046-2. Determination of the Use of the Radio-Frequency Spectrum and the Efficiency of the Radio System // ITU International Union of Telecommunications. Geneva, 2011. P. 1–4.
8. Zubarev Ju.B., Krivosheev M.I., Krasnosel'skij I.N. Digital Television Broadcasting. Fundamentals, Methods, Systems // Scientific Research Institute of Radio (NIIR). 2001. P. 134.



Мухаметзянов Э. В.
Mukhametzyanov E. V.

кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель кафедры
«Общонаучные дисциплины»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
филиал в г. Салават,
г. Салават, Российская Федерация



Родионов А. С.
Rodionov A. S.

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

УДК 654.9

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ УЛЬЕВ НА ПАСЕКЕ

В статье рассматривается разработка многоканального цифрового регистрационного комплекса для мониторинга состояния пчелосемей, который облегчит и систематизирует работы, производимые пчеловодом на пасеке. Разработанный регистрационный комплекс состоит из таких элементов, как wi-fi модуль ESP 8266, который осуществляет сбор информации с датчиков веса, влажности и температуры и передачу на микрокомпьютер пасеки, в качестве которого выступает микрокомпьютер Raspberry Pi. Передача данных осуществляется методом Get запросов к серверу, установленному на микрокомпьютере, где данные обрабатываются и записываются в базу данных sqlite3. Данный многоканальный комплекс кроме пчеловодства может быть использован для удаленного предоставления производственной информации по запросу пользователя, в волоконно-оптических системах учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования, для управления и автоматизации и в диагностике других производственных процессов.

Ключевые слова: ESP 8266, регистрационный комплекс, автоматизация пчеловодства, тензодатчики, датчик температуры, контроль состояния улья.

AUTOMATED SYSTEM MONITORING AND ANALYSIS OF THE STATUS OF THE HIVES IN THE APIARY

The article discusses the development of multi-channel digital registration systems for monitoring the state of bee colonies which will facilitate and sistematize work produced by the beekeeper in the apiary. Designed registration the complex consists of items such as wi-fi ESP 8266 module, which collects information from weight sensors, temperature and humidity and transfer to the apiary microcomputer which is a microcomputer the Raspberry Pi. Data transmission is done with the Get method requests to the server installed on the microcomputer where the data is processed and written to the database sqlite3. This multi-channel complex in addition to beekeeping can be used to remotely provide production information for a user's query, fiber-optic systems of accounting, monitoring and forecasting of work of high voltage equipment, for the control and automation and in the diagnosis of other manufacturing processes.

Key words: ESP 8266, registration complex, automation of beekeeping, strain gauges, temperature sensor, control the state of the hive.

Процесс пчеловодства на сегодняшний день мало автоматизирован, по-прежнему надо наблюдать за каждым ульем вручную, чтобы предупредить ослабление семьи, роение и прочее.

Диагностика состояния ульев производится на основе достаточно разнородной информации: температура, уровень шума, влажность, вес и т.д. Оценка описанных параметров на сегодняшний день производится непосредственно самим пчеловодом. Причем такой подход имеет ряд недостатков: сложность контроля пасеки; сложность сбора статистики и предоставление результатов в удобном для анализа виде, например в виде графика с возможностью делать срезы по различным параметрам; значительные затраты времени на сбор этой статистики. Автоматизация данных процессов позволит пчеловоду проводить более эффективное управление пасекой.

Многоканальный цифровой регистрационный комплекс относится к системам сбора, обработки и передачи информации и может

быть использован в пчеловодстве на индивидуальных и коллективных пасеках. Устройство для контроля состояния пчелиных семей и процесса сбора меда в улье содержит размещенные в улье датчики температуры, уровня влажности и акустического шума, тензодатчики для контроля веса улья, подключенные к wi-fi модулю с микроконтроллером.

Данный многоканальный комплекс кроме пчеловодства может быть использован для удаленного предоставления производственной информации по запросу пользователя [1], в волоконно-оптических системах учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования [2], для управления и автоматизации [3, 4] и в диагностике других производственных процессов.

На рисунке 1 приведена блок-схема предлагаемого многоканального цифрового регистрационного комплекса «Устройство для контроля состояния пчелиных семей и процесса сбора меда», который содержит раз-

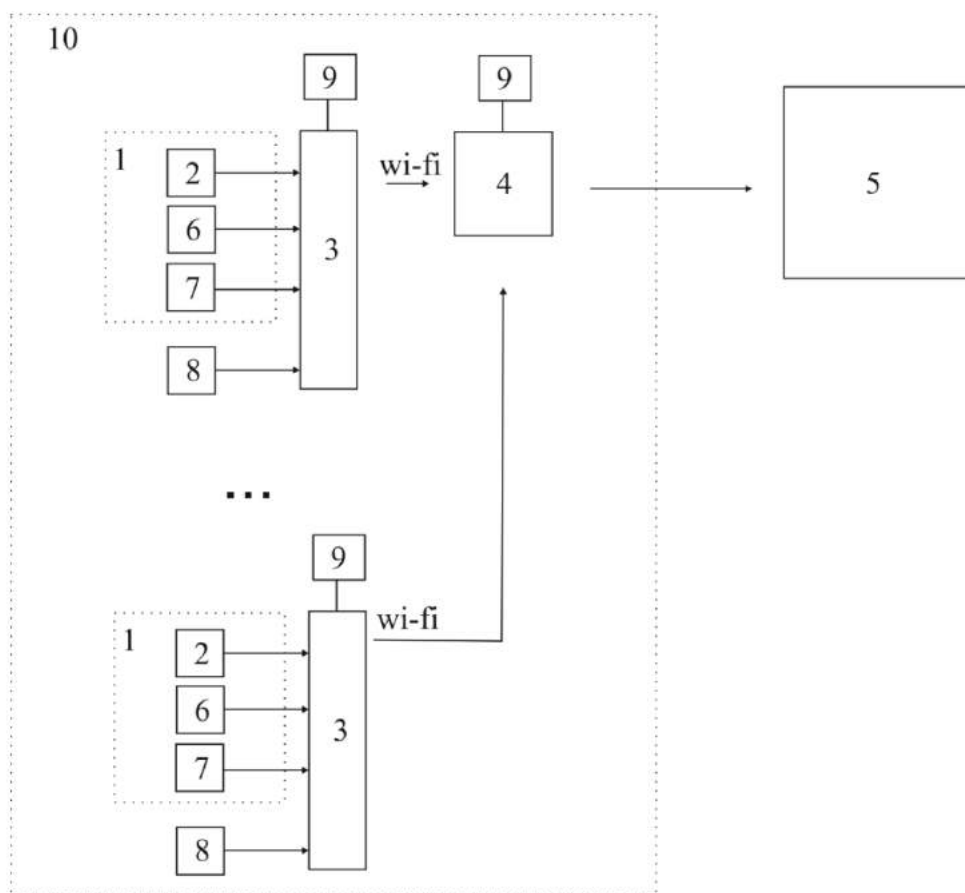


Рисунок 1. Регистрационный комплекс мониторинга, сохранения и аналитико-статистической обработки данных о состоянии пчелосемей и процессе медосбора

мешенные в улье 1 датчики: температуры 2, веса улья 8, влажности 6, акустических сигналов 7, подключенные к входу wi-fi модуля 3, данные с которого могут быть переданы непосредственно на мобильный телефон пасечника, на котором установлено программное обеспечение, или на микрокомпьютер пасеки 4 для сбора и дальнейшей передачи в единую базу данных 5.

Регистрационный комплекс мониторинга, сохранения и аналитико-статистической обработки данных о состоянии пчелосемей и процессе медосбора работает следующим образом.

— Производится контроль через определенные промежутки времени следующих параметров:

1. датчик температуры 2 измеряет температуру воздуха в районе рамок улья;
2. датчик веса улья 8 измеряет вес улья в процессах развития пчелосемьи и сбора меда;
3. датчик акустических сигналов 7 фиксирует уровень акустического шума в улье;
4. датчик влажности 6 фиксирует уровень влажности в улье.

— Данные о температуре воздуха в районе рамок улья, весе улья и уровне акустического шума и влажности в улье передаются через wi-fi модуль 3, смартфон пчеловода на базе android или на микрокомпьютер пасеки, где накапливаются и обрабатываются для дальнейшей передачи в единую базу данных. Аналогично фиксируется температура наружного воздуха, измеряемая датчиком температуры наружного воздуха.

Регистрационный комплекс позволяет следить за жизнедеятельностью пчелиной семьи, а также анализировать влияние погодных условий на процесс сбора меда.

В экстренной ситуации, например, при скачкообразном уменьшении веса улья или резком возрастании акустического шума, что может свидетельствовать о попытке хищения меда, через wi-fi модуль 3 передается информация о вскрытии улья.

Контроль состояния пчелиных семей и процесса сбора меда осуществляется на каждом улье пасеки.

Многоканальный регистрационный комплекс обеспечивает дистанционный контроль состояния пчелиной семьи и процесса сбора меда.

В качестве wi-fi модуля был выбран микроконтроллер ESP8266, разработанный компанией Espressif Systems.

Анализ разных способов программирования ESP8266 с учетом возможности расширения и создания собственных алгоритмов работы [5] показал, что оптимальной средой программирования ESP8266 в данном случае является Arduino IDE.

Для организации работы многоканального цифрового регистрационного комплекса к ESP-модулю подключены датчики температуры, веса, влажности и акустических сигналов.

Рассмотрим подробнее эти датчики и схемы их подключения к ESP-модулю.

В качестве датчика температуры используется датчик DS18B20 — это цифровой измеритель температуры. DS18B20 обменивается данными с микроконтроллером по однопроводной линии связи, используя протокол интерфейса 1-Wire. Диапазон измерения температуры составляет от минус 55 °С до 125 °С. Для диапазона от минус 10 °С до 85 °С погрешность не превышает 0,5 °С.

У каждой микросхемы DS18B20 есть уникальный серийный код длиной 64 разряда, который позволяет нескольким датчикам подключаться к одной общей линии связи, т.е. через один порт микроконтроллера можно обмениваться данными с несколькими датчиками, распределенными на значительном расстоянии. Режим позволяет подключать несколько датчиков и крайне удобен для мониторинга температуры в нескольких зонах улья.

Датчик имеет следующие выводы: GND — общий провод или по-другому земля подключается к пину ESP-модуля с таким же названием, DQ — с этого вывода считываются данные, он может быть подключен к одному из пинов GPIO ESP-модуля, информация с которого в дальнейшем будет считываться программой, VDD — питание. Питание может быть использовано внешнее, но в

нашем случае питание берется из вывода 3.3v ESP-модуля.

Для измерения веса использовались тензодатчики давления, которые помогают преобразовать уровень деформации в электрические сигналы. В нашем случае использовались четыре тензодатчика, соединенные мостовой схемой. Тензодатчики, соединенные мостовой схемой, работают следующим образом: на выводы E- и E+ подается напряжение, показания о весе получаются из анализа напряжения на выводах S- и S+, которое меняется в зависимости от давления, оказываемого на датчики.

При подключении тензодатчиков к ESP-модулю используется HX711 модуль, 24-битный АЦП с усилителем.

АЦП HX711 имеет два разъема: для подключения к тензодатчикам и для подключения к контроллеру с подачей питания:

— разъем, обозначенный на плате J1, используется для подключения тензодатчиков. Обозначение контактов: E+, E- (питание тензодатчиков); A-, A+ (канал A); B-, B+ (канал B);

— разъем, обозначенный на плате JP2, используется для подключения к контроллеру и для подачи питания. Обозначение контактов: VCC (напряжение питания), GND (общий контакт), DT (данные), SCK (частота) — интерфейс ИС (I2C).

АЦП HX711 может питаться как от контроллера, так и от внешнего источника питания. Напряжение питания 2,6-5,5 вольт постоянного тока.

Показания влажности определяются датчиком DHT22.

Датчик DHT11 и его собратья DHT21, DHT22, AM2301, AM2302 измеряют относительную влажность воздуха и температуру.

Список литературы

1. Левина Т.М., Бажанова Т.В. Удаленное предоставление производственной информации по запросу пользователя // Сб. тез. докл. VI науч.-техн. конф. молодых специалистов ООО «БашНИПИнефть». 2016. С. 115–116.
2. Ураксеев М.А., Левина Т.М., Шамаев Ф.Ф., Кулябин А.С. Разработка

Датчики достаточно точные и дешевые, имеют цифровой выход.

Для регистрации уровня шума использован модуль микрофона AVR PIC KY-037 высокой чувствительности

В качестве центрального микрокомпьютера был выбран Raspberry Pi 3 B — одноплатный компьютер размером с банковскую карту [6].

Программный комплекс для центрального микрокомпьютера включает в себя сервер lighttpd с PHP5, необходимый для работы с базой данных на sqlite3. Программный комплекс «Пасечный учет» представляет собой базу данных SQLite с программной оболочкой на PHP [7] для редактирования и внесения изменений.

Регистрация данных с датчиков осуществляется следующим образом: ESP-модуль три раза в день принимает данные с датчиков и отправляет их по беспроводной линии связи на микрокомпьютер, на микрокомпьютере php-скрипт обрабатывает эти данные и заносит в базу данных в таблицу параметры улья. Другие данные в таблицы заносятся непосредственно пчеловодом через веб-интерфейс.

Вывод

Многоканальный цифровой регистрационный комплекс позволяет в полной мере получать информацию о состоянии пчелосемей на пасеке, что намного облегчает работу пчеловода на пасеке. Модуль ESP 8266, перепрошиваемый с использованием среды разработки Arduino IDE [8], обеспечивает сбор информации с датчиков и ее отправку по линиям беспроводной связи на микрокомпьютер.

волоконно-оптических систем для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования в субд с веб-интерфейсом // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. № 1. С. 97–103.

3. Родионов А.С., Ефимова Д.А. Разработка системы управления промышленными данными // Естественные и математические

науки в современном мире. 2015. № 36-37. С. 41–46.

4. Родионов А.С., Юсупова Л.Р. Автоматизация процесса создания и обработки заявок, связанных с отказом оборудования в нефтегазовых предприятиях // Сб. тез. докл. VI науч.-техн. конф. молодых специалистов ООО «БашНИПИнефть». 2016. С. 133–134.

5. Мухаметзянов Э.В., Насырова Р.Т., Курбангалиев А.М., Исламгулов Р.Р. Применение Wi-Fi ESP8266 в ходе проведения лабораторных работ по физике // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2016. № 1 (3). С. 95–98.

6. Петин В. Микрокомпьютеры Raspberry Pi: практическое руководство. СПб.: БХВ-Петербург, 2015. 240 с.

7. Колисниченко Д. PHP и MySQL. Разработка Web-приложений. СПб.: БХВ-Петербург, 2015. 593 с.

8. Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 256 с.

References

1. Levina T.M., Bazhanova T.V. Remote Provision of Production Information upon User Request // Collection of Thesis of Reports of VI Scientific-Technical Conference of Young Specialists of ООО «BashNIPIneft». 2016. P. 115–116.

2. Urakseev M.A., Levina T.M., Shamaev F.F., Kuljabin A.S. Development of Fiber-

Optic Systems for Recording, Monitoring and Forecast of High-Voltage Equipment Operation in DBMS with Web-Interface // Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2015. T. 11. No. 1. P. 97–103.

3. Rodionov A.S., Efimova D.A. Development of Industrial Data Management System // Natural and Mathematical Sciences in the Modern World. 2015. No. 36–37. P. 41–46.

4. Rodionov A.S., Jusupova L.R. Automation of the Process of Creating and Processing Applications Related to Equipment Failure in Oil and Gas Enterprises // Collection of Thesis of Reports of VI Scientific-Technical Conference of Young Specialists of ООО «BashNIPIneft». 2016. P. 133–134.

5. Muhametzjanov Je.V., Nasyrova R.T., Kurbangaliev A.M., Islamgulov R.R. Application of Wi-Fi ESP8266 in the Course of Laboratory Work on Physics // Information Technologies. Problems and Solutions. 2016. No. 1 (3). P. 95–98.

6. Petin V. Microcomputers Raspberry Pi: Practical Guide. Saint-Petersburg: BHV-Peterburg, 2015. 240 p.

7. Kolisnichenko D. PHP and MySQL. Web Application Development. Saint-Petersburg: BHV-Peterburg, 2015. 593 p.

8. Sommer U. Programming of Microcontroller Cards Arduino/Freduino. Saint-Petersburg: BHV-Peterburg, 2012. 256 p.



Журавлева Н. А.
Zhuravleva N. A.

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



Кутуева А. В.
Kutueva A. V.

аспирант кафедры
«Технология нефти и газа»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
старший преподаватель кафедры
«Пожарная безопасность»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Доломатов М. Ю.
Dolomatov M. Yu.

доктор химических наук, профессор,
профессор кафедры
«Технология нефти и газа»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
профессор кафедры «Физическая
электроника и нанофизика»,
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
университет», г. Уфа, Российская Федерация



Быстров А. И.
Bystrov A. I.

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник отдела
фундаментальных исследований,
ГУП «Институт нефтехимпереработки
Республики Башкортостан»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 66.011, 004

АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ВЫХОДА ЦЕЛЕВОГО ПРОДУКТА

Актуальность разработки программы расчета равновесных выходов продуктов процесса пиролиза многокомпонентных углеводородных систем подтверждается тем, что пиролиз является одним из основных способов переработки нефтяных остатков и отходов пластических масс. При этом одной из важных задач пиролизного производства является увеличение

селективности процесса по целевым продуктам, что возможно путём совершенствования технологии, модернизации печей и других аппаратов, а также разработки моделей, методик и программ, позволяющих оптимизировать выход целевых продуктов пиролиза за счет установления оптимальных параметров процесса. Целью данной работы является разработка программы расчета для оптимизации выходов продуктов процесса пиролиза. В работе представлены алгоритм оптимизации процесса пиролиза многокомпонентных углеводородных систем с целью максимизации выхода целевого продукта, блок-схема алгоритма и программа моделирования параметров распределения пиролиза газовых смесей. В основе алгоритма лежат методы равновесной термодинамики систем с хаосом химического состава, любое вещество при этом рассматривается как многокомпонентная система со случайным распределением состава, в которой существует непрерывное распределение состава по термодинамическим потенциалам. В частности, использована модель, разработанная профессором М. Ю. Долматовым, устанавливающая зависимость параметров функции нормального распределения продуктов пиролиза по стандартным температурам кипения от режимных параметров процесса и позволяющая без поликомпонентной идентификации состава продуктов пиролиза получать информацию о выходе продуктов. Проведен литературный обзор, патентный анализ существующих программных продуктов расчета выходов процесса пиролиза, реализующих различные методики, рассмотрены их достоинства и недостатки. Представлена программа, разработанная в MS Excel на VBA, она реализует процесс оптимизации и расчет выхода целевого продукта, получаемые в процессе расчета кривые нормального распределения состава по термодинамическим функциям в дифференциальной и интегральной формах визуализируются. Приведены результаты расчетов, проведенных по предлагаемой программе, подтверждающие возможность увеличения селективности процесса по целевым продуктам пиролиза за счет установления оптимальных параметров процесса.

Ключевые слова: пиролиз, равновесный выход продуктов процесса пиролиза, многокомпонентные углеводородные системы, переработка нефтяных остатков и отходов пластических масс, селективность процесса по целевым продуктам пиролиза, методы равновесной термодинамики систем с хаосом химического состава.

DEVELOPMENT OF THE PROGRAM FOR THE CALCULATION OF THE PRODUCTS EQUILIBRIUM YIELDS BY THE PYROLYSIS PROCESS OF MULTICOMPONENT HYDROCARBONIC SYSTEMS

The relevance of the program development for the calculation of the products equilibrium yields by the pyrolysis process of multicomponent hydrocarbonic systems is confirmed by the fact that pyrolysis is one of the main ways of processing of oil residues and waste of plastics. At the same time one of important tasks of pyrolysis production is increase in selectivity of process on target products that is possible by improvement of technology, modernization of furnaces and other devices and also development of the models, techniques and programs allowing to optimize an exit of target products of pyrolysis due to establishment of optimum parameters of process. The purpose of this work is development of the program for optimization calculation of products yields by pyrolysis process. In work is presented the algorithm of pyrolysis process optimization of multicomponent hydrocarbonic systems for the purpose of maximizing an yields of a target product, the flowchart of an algorithm and the program of modeling of parameters of distribution of pyrolysis of gas mixes. Methods of equilibrium thermodynamics of systems with chaos of the chemical composition are the cornerstone of an algorithm, any substance at the same time is considered as multicomponent system with casual distribution of structure in which there is a continuous distribution of structure on thermodynamic potentials. In particular, the model developed by professor M.Yu. Dolmatov, establishing dependence of parameters of function of normal distribution of products of pyrolysis on standard temperatures of boiling from regime parameters of process, and allowing to obtain information on an yields of products without multicomponent identification of structure of products of pyrolysis is used. The literary review, the patent analysis of the existing software products of calculation of the yields of process of pyrolysis realizing various techniques is carried out their merits and demerits are considered. The developed program realized in MS Excel on VBA is submitted, it realizes the process of optimization and calculation

of an yields of a target product received in the course of calculation curves of normal distribution of structure on thermodynamic functions in differential and integrated forms are visualized. Results of the calculations which are carried out in the offered program, the increases in selectivity of process confirming an opportunity on target products of pyrolysis due to establishment of optimum parameters of process are given.

Key words: pyrolysis, equilibrium yield of products of the pyrolysis process, multicomponent hydrocarbon systems, processing of oil residues and plastic waste, selectivity of the process for the desired pyrolysis products, methods of equilibrium thermodynamics of systems with chaos of chemical composition.

Одним из основных способов переработки нефтяных остатков и отходов пластических масс, как известно, является термическое разложение путем пиролиза при температурах 700–1200 °С. В результате процесса пиролиза образуются газы, часть из которых являются наиболее ценными, например этилен, пропилен. Поэтому одной из важных задач пиролизного производства является увеличение селективности процесса по целевым продуктам. Достижение высокой селективности возможно путём совершенствования технологии, модернизации печей и других аппаратов, а также разработки моделей, методик и программ, позволяющих оптимизировать выход целевых продуктов пиролиза за счет установления оптимальных параметров процесса.

Целью данной работы является создание на основе модели выхода продуктов пиролиза, разработанной под руководством профессора М. Ю. Долматова [1], алгоритма и программы расчета равновесных выходов продуктов процесса пиролиза многокомпонентных углеводородных систем.

Известны два подхода к моделированию выхода продуктов пиролиза: *детерминированный* — на основе детального описания механизма процесса термического распада углеводородов согласно свободно-радикальной теории Райса и на основе *феноменологических вероятностно-статистических методов*.

Большинство кинетических моделей пиролиза углеводородного сырья основано на детальном описании механизма процесса термического распада углеводородов. Однако детерминированные модели, позволяющие успешно прогнозировать результаты пиролиза индивидуальных углеводородов и легких бензиновых фракций, не всегда приемлемы к описанию процессов пиролиза тяжелого нефтяного сырья.

Известно, что разработка математических моделей в виде системы интегро-дифференциальных уравнений, отражающих процессы пиролиза многокомпонентного сырья, затруднительна, т.к. отсутствует информация о составе сырья и промежуточных стадиях процесса [1–4], а также ввиду сложности учета всего исключительного многообразия элементарных реакций, отсутствия полной информации о составах, неопределенности в выборе численных значений кинетических параметров и необходимости привлечения мощных ЭВМ для решения систем дифференциальных уравнений.

Целесообразно применять вероятностно-статистические методы исследования, так как процесс пиролиза зависит от множества случайных факторов. Несмотря на случайный характер явлений существуют определенные закономерности в изменении средних параметров процесса. Нерегулярность, свойственная случайным событиям, при большом количестве испытаний, как правило, компенсируется появлением статистической закономерности, стабилизацией частот наступлений случайных событий.

Поликомпонентность высококипящих нефтяных фракций определяет стохастический характер процессов, протекающих в них, и указывает на целесообразность вероятностно-статистического подхода к исследованию процессов пиролиза тяжелых нефтяных смесей. В этом случае информацию о стохастическом характере поведения компонентов и активных частиц, связанных в единую статистическую систему, несет в себе соответствующая функция распределения.

Впервые вероятностно-статистическое моделирование процессов пиролиза было рассмотрено в работах М. Ю. Долматова и С. И. Амировой [5–7]. На основе этих работ авторами были разработаны программы

моделирования процессов пиролиза. Известны программы, реализующие расчет процессов пиролиза по детерминированным моделям, а также программа SPYRO (<http://www.spyrosuite.com>).

Недостатками разработанных программ являются использование сложных методов, требующих мощных ЭВМ, и отсутствие оптимизации выхода целевого продукта и расчета оптимальных параметров процесса пиролиза.

В представленной работе приведены алгоритм и программа для расчета оптимального состава продуктов пиролиза сложных углеводородных систем. В основе алгоритма лежат методы равновесной термодинамики систем с хаосом химического состава, которые рассмотрены в работах [1–4].

Согласно данной теории любое вещество рассматривается как многокомпонентная система со случайным распределением состава, в которой существует непрерывное распределение состава по термодинамическим потенциалам, в частности в углеводородных системах может быть реализовано Гауссово распределение.

Ниже представлен алгоритм оптимизации процесса пиролиза многокомпонентных углеводородных систем с целью максимизации выхода целевого продукта.

1 В качестве исходных данных для нахождения оптимального значения целевого продукта принимаются выходы продуктов пиролиза (% масс.) при различных температурах процесса, термодинамических свойствах продуктов пиролиза, влажности и времени контакта.

2 Перевод выходов продуктов из процентов в массовые доли, эти значения являются $\Phi(Z)$ в зависимости (1)

$$x' = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^Z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 + \Phi(Z), \quad (1)$$

$$t = \theta + \sigma Z, \quad (2)$$

где x' — относительная доля отдельной фракции в смеси продуктов;

Z — параметр, который определяется по таблице Лапласа;

t — стандартные температуры кипения соответствующей фракции в смеси;

$\Phi(Z)$ — функция Лапласа;

θ — среднее значение температуры кипения смеси;

σ — соответствующая дисперсия.

3 По известным значениям $\Phi(Z)$ определяем Z , используя соотношение (1) и таблицу Лапласа.

4 Строим уравнение регрессии методом наименьших квадратов, выходными и входными параметрами являются найденные значения вероятностей, Z и стандартные температуры кипения соответственно.

5 В полученном уравнении $t = b + aZ$ коэффициент a является дисперсией, коэффициент b — средним значением температуры смеси.

6 Рассчитываем теоретические значения выходов продуктов пиролиза, используя закон нормального распределения Гаусса, применяя при этом полученные на предыдущем шаге значения дисперсии и среднего значения температуры смеси:

$$P(\Delta T_1 < \Delta T < \Delta T_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\Delta T_1}^{\Delta T_2} e^{-\left[\frac{\Delta T_i - \Delta T_s}{\sigma\sqrt{2}}\right]^2} dT, \quad (3)$$

где $P(T)$ — функция распределения состава по термодинамическим потенциалам;

P — вероятность выхода продукта;

ΔT_i — термодинамический потенциал i -го соединения;

ΔT_s — средняя температура кипения всех молекулярных соединений;

σ — среднее квадратичное отклонение.

7 Проводим оптимизацию значений выходов в зависимости от степени конверсии в соответствии с блок-схемой алгоритма моделирования параметров распределения пиролиза газовых смесей (рисунок 1).

8 По рассчитанным параметрам нормального распределения строятся два уравнения регрессии следующего вида:

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3,$$

где x_1 — расход водяного пара;

x_2 — время контакта;

x_3 — температура;

a_1, a_2, a_3 — коэффициенты уравнения регрессии.

9 Производится расчет выходов продуктов пиролиза на основе функции нормального распределения.

10 Выход твердых продуктов пиролиза — пироуглерода и кокса для нефтяных остат-

ков определяется по данным из оптических спектров поглощения [1].

11 Рассчитывается оптимальное значение требуемого целевого продукта пиролиза методом Ньютона, изменяя при этом параметры процесса. Задание полученных значений расхода водяного пара, времени контакта и температуры в производстве позволит управлять процессом.

Результаты расчетов и графики по представленному выше алгоритму в реализо-

ванной программе представлены на рисунках 2, 3.

В таблице, представленной на рисунке 1, приведены расчетные и экспериментальные значения выходов продуктов пиролиза ($x_{расч}$, $x_{эксперим}$) и определены параметры распределения, которые позволяют предсказать оптимальный выход при любой температуре и времени контакта. На рисунке 3 представлены кривые нормального распределения состава по температурам кипения в дифференциальной и интегральной формах.

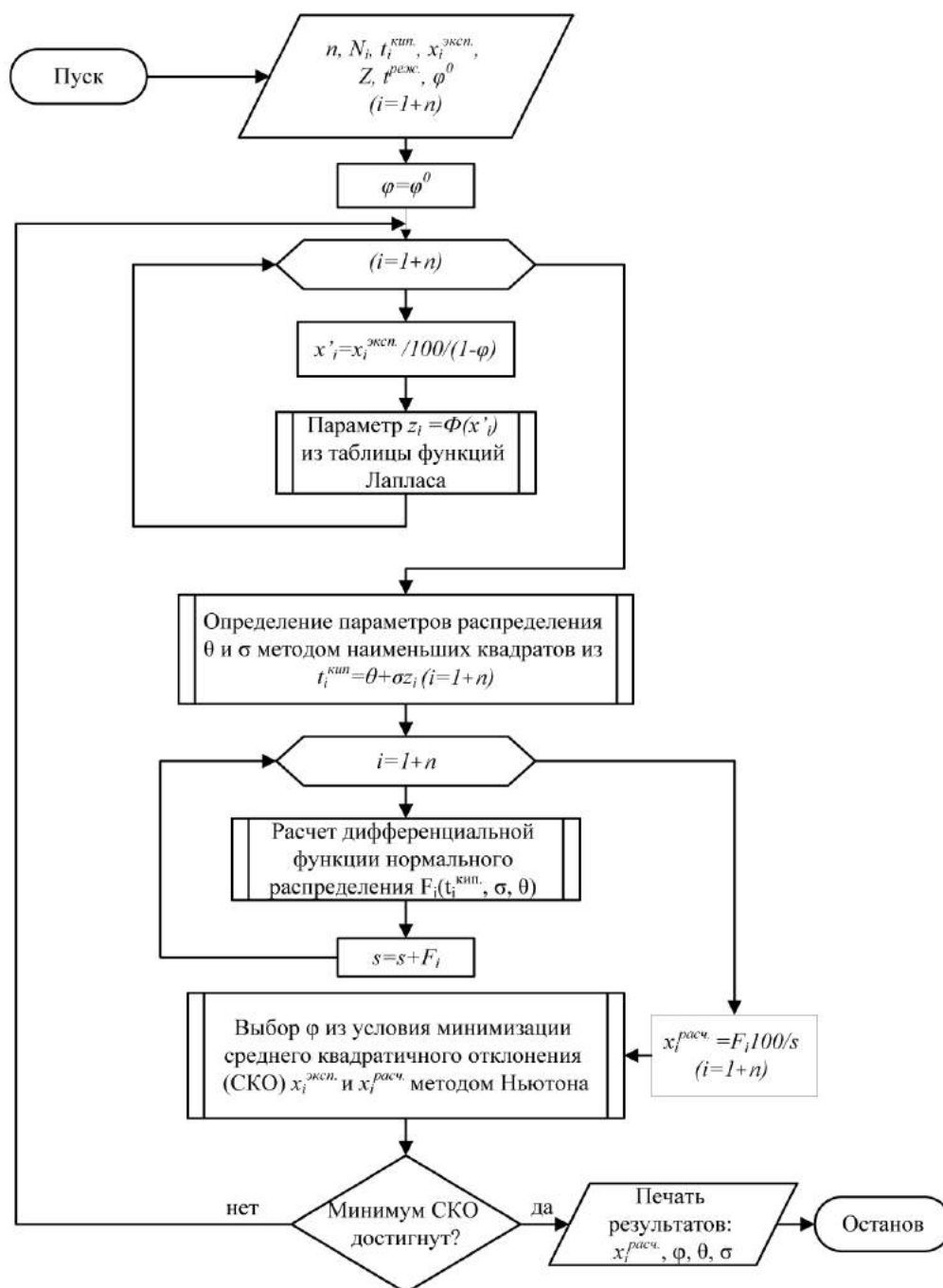


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма моделирования параметров распределения пиролиза газовых смесей

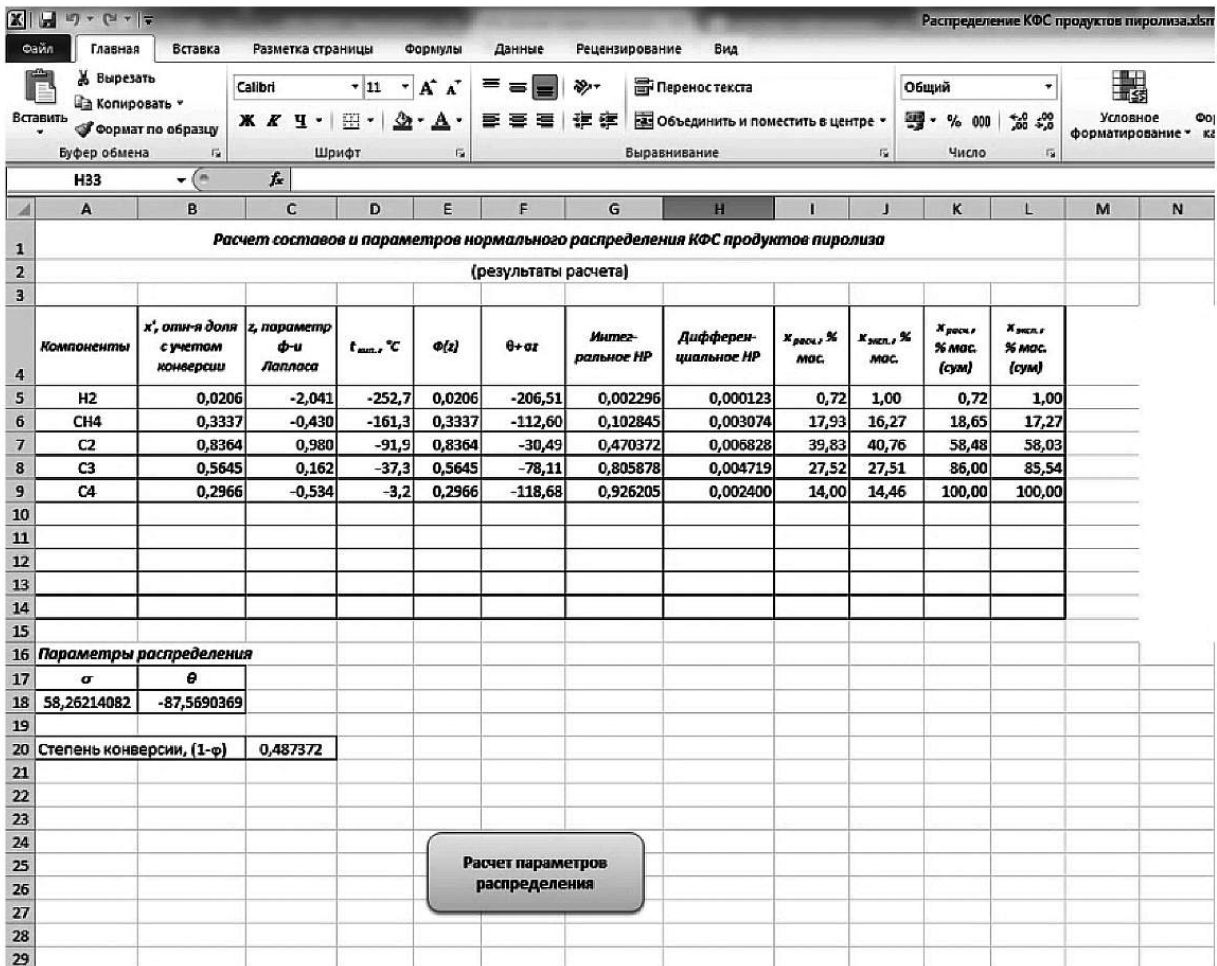


Рисунок 2. Результаты расчетов

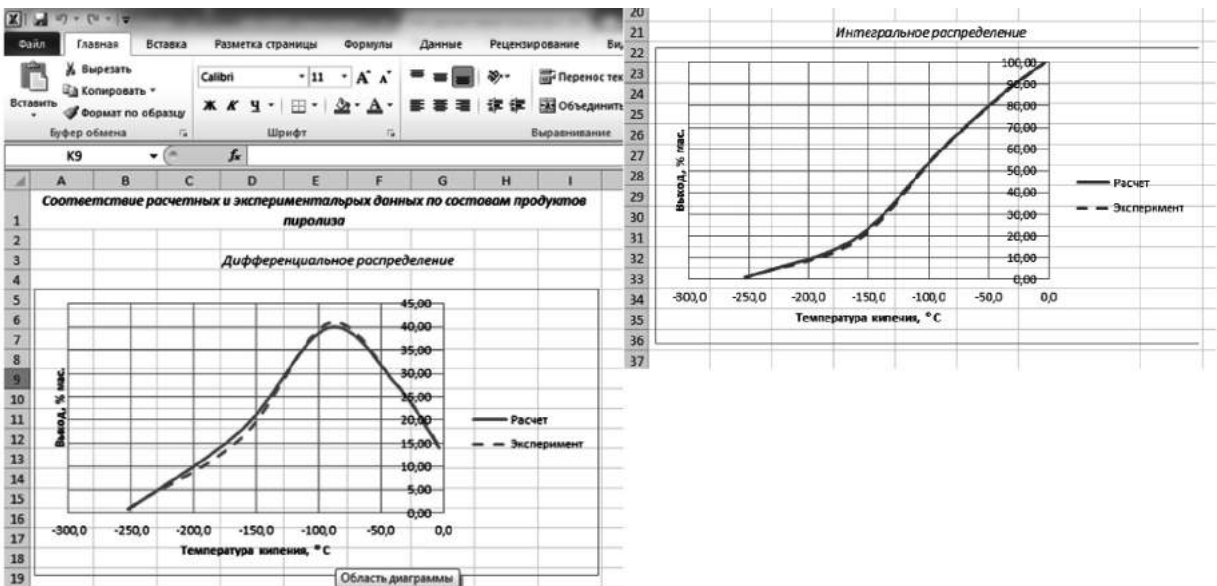


Рисунок 3. Графики по разработанному алгоритму

Вывод

Представлены алгоритм и программа, позволяющие проводить расчеты равновес-

ных выходов газообразных и твердых продуктов процесса пиролиза многокомпонентных углеводородных систем.

Список литературы

1. Доломатов М.Ю. Фрагменты теории реального вещества. От углеводородных систем к галактикам. М.: Химия, 2005. 208 с.
2. Доломатов М.Ю. Некоторые физико-химические аспекты прогнозирования свойств многокомпонентных систем в условиях экстремальных воздействий // ЖВХО им. Д.И. Менделеева. 1990. Т. 35. № 5. С. 632.
3. Доломатов М.Ю., Амирова С.И. Новый подход к прогнозированию процесса пиролиза углеводородных смесей и его практическое использование // Нефтепереработка и нефтехимия. 1991. № 8. С. 49–57.
4. Амирова С.И. Вероятностно-статистическое моделирование процессов пиролиза тяжелых нефтяных смесей: автореф. ... канд. техн. наук. М., 1991. 16 с.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614677. Расчет выхода продуктов пиролиза пропана / Ф.Р. Муртазин, Р.Г. Хасанов, П.В. Кугато. Дата регистрации: 06.05.2014.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612056. Моделирование химико-технологических процессов в реакторах с использованием схем высокого порядка точности / Р.В. Жалнин, Е.Е. Пескова, О.С. Язовцева, В.И. Назаров. Дата регистрации: 14.02.2017
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612056. TETRAN-PRO / Н.М. Корцен-

штейн, Г.Я. Герасимов, Ю.Б. Шмельков. Дата регистрации 05.12.2016.

References

1. Dolomatov M.Ju. The Theory of Real Substance. From Hydrocarbonic Systems to Galaxies. Moscow: Himija, 2005. 208 p.
2. Dolomatov M.Ju. Some Physical and Chemical Aspects of Predicting the Properties of Multicomponent Systems under Extreme Conditions // ZhVHO im. D. I. Mendeleeva. 1990. T.35. № 5. S. 632.
3. Dolomatov M.Ju., Amirova S.I. A New Approach to Predicting the Process of Pyrolysis of Hydrocarbon Mixtures and its Practical Use // Oil Refining and Petrochemistry. 1991. № 8. P. 49–57.
4. Amirova S.I. Probabilistic-Statistical Modeling of Pyrolysis Processes of Heavy Oil Mixtures: Avtoref. ... Cand. Techn. Sci. Moscow, 1991. 16 p.
5. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2014614677. Calculation of the Yield of Pyrolysis Products of Propane / F.R. Murtazin, R.G. Hasanov, P.V. Kugatov. Registration Date: 06.05.2014.
6. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2017612056. Modeling of Chemical-Technological Processes in Reactors Using High Accuracy Schemes / R.V. Zhalnin, E.E. Peskova, O.S. Jazovceva, V.I. Nazarov. Registration Date: 14.02.2017.
7. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2017612056. TETRAN-PRO / N.M. Korcenshtejn, G.Ja. Gerasimov, Ju.B. Shmel'kov. Registration Date: 05.12.2016.



Сироткин С. Л.
Sirotkin S. L.

*кандидат технических наук,
ведущий инженер-конструктор
Научно-конструкторского бюро
моделирующих и управляющих систем,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный
университет»,
г. Таганрог, Российская Федерация*



Коньков А. Н.
Konkov A. N.

*начальник сектора
Научно-конструкторского бюро
моделирующих и управляющих систем,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный
университет»,
г. Таганрог, Российская Федерация*

УДК 681.3

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ КОНФЛИКТОВ В ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Статья относится к области применения и эксплуатации локальных вычислительных сетей. Рассматривается функционирование локальных вычислительных сетей по протоколу CSMA/CD — коллективный доступ с контролем несущей и обнаружением конфликтов. В канале используется код «Манчестер-2». Предлагается три метода обнаружения конфликтов, возникающих в канале связи при одновременном обращении абонентов к каналу при отсутствии несущей. Предложенные методы защищены патентами Российской Федерации. Первый метод основан на том, что все импульсы в канале дифференцируются, и, если амплитуда дифференцированных импульсов превышает пороговый уровень, определяется конфликт. Второй метод заключается в том, что также осуществляется дифференцирование всех импульсов в канале связи, и с помощью реверсивного счетчика осуществляется сложение и вычитание дифференцированных импульсов, т.е. вычитаются собственные импульсы, а складывается суммарное количество импульсов. При достижении кода на выходе реверсивного счетчика порогового значения срабатывает схема сравнения кодов, и определяется конфликт. Третий метод в отличие от второго при смешивании сигналов в канале связи от двух и более абонентов определяет конфликт при обнаружении превышения уровня суммарного сигнала или при обнаружении снижения уровня суммарного сигнала.

Ключевые слова: локальная вычислительная сеть, канал связи, конфликт, дифференцированные импульсы, пороговый уровень, пороговый код, реверсивный счетчик, схема сравнения кодов, смешивание сигналов в канале, равноранговая сеть.

THE METHODS FOR DETECTION OF CONFLICT IN LOCAL AREA NETWORKS

The article refers to the application and operation of local-computation-inflammatory networks. We consider the operation of local computer networks, protocol CSMA / CD — carrier-sense multiple access with collision detection. The code used in the channel «Manchester-2». It proposed three methods for detection of conflicts arising in the communication channel while handling subscribers to the channel in the absence of a carrier. The proposed methods are protected by patents of the Russian Federation. The first method is based on the fact that all pulses are differentiated in the channel and, if the amplitude of the differentiated pulse exceeds a threshold level determined conflict. The second method is that differentiation is also performed of all

the pulses in a communication channel and using a down counter is carried out addition and subtraction of the differentiated pulse, i.e. deducted own impulses, and develops total number of pulses. Upon reaching the code output down counter threshold comparison circuit triggered codes and determined conflict. The third method, unlike the second method, when mixing the signals in the communication channel between two or more subscribers defines a conflict detection signal exceeding the level of total detection or reduction of the total signal.

Key words: local area network, communication channel, conflict, differentiated impulses, threshold, threshold code, reverse counter, comparison circuit codes, mixing the signals in channel, equal rank network.

В локальных вычислительных сетях (ЛВС) шинной конфигурации используется метод коллективного доступа с контролем несущей и обнаружением конфликтов (КДОН/ОК), или Carrier sense with collision detection (CSMA/CD) [1, 2].

Наиболее широкое распространение метод CSMA/CD получил в сетях типа Ethernet, в которых чаще всего используется код «Манчестер-2». Абоненты к моноканалу подключаются через импульсные трансформаторы, что обеспечивает коллективный доступ к моноканалу и гальваническую развязку абонентов ЛВС.

Так как сеть (CSMA/CD) является равно-ранговой сетью, станции запрашивают канал

только тогда, когда у них есть данные для передачи. Соперничество за канал может возникать тогда, когда сигналы вводятся в кабель от разных станций примерно одновременно [1], т.е. в сети возникает конфликт. При конфликте возникают наложения и искажения сигналов.

Для устранения конфликтов необходимо их обнаруживать. Для этого в настоящей статье предложено три метода определения конфликтов, защищенных патентами РФ [3–5].

Схема устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по первому методу представлена на рисунке 1, а временная диаграмма его работы — на рисунке 2.

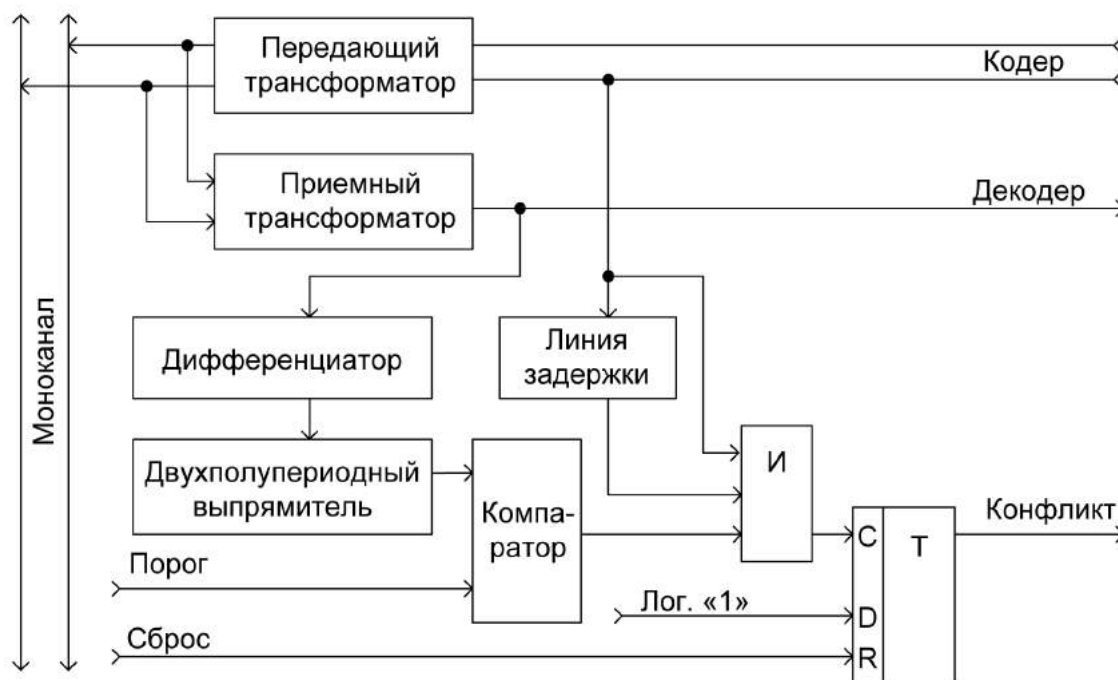


Рисунок 1. Схема устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по первому методу

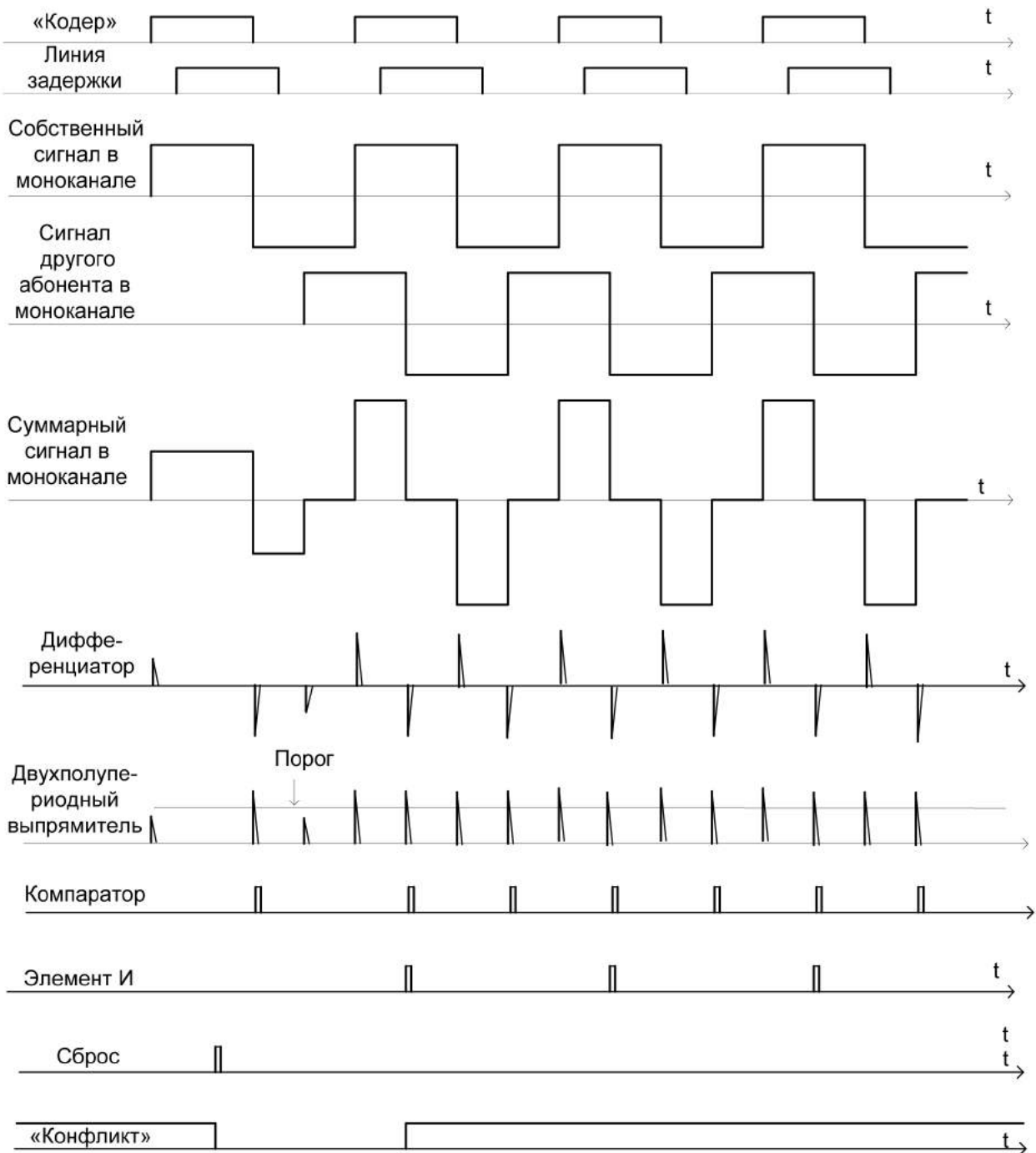


Рисунок 2. Временная диаграмма работы устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по первому методу

Устройство работает следующим образом. Дифференцируются все фронты импульсов в моноканале. Когда нет конфликта, от каждого информационного импульса при дифференцировании образуются два разнополярных импульса. Отрицательный импульс, образующийся от заднего фронта, с помощью двухполупериодного выпрямителя переводится в положительную область.

При конфликте в моноканале в результате сложения сигналов от нескольких абонентов формируется суммарный сигнал, который, как показано на рисунке 1, имеет дополнительные фронты, причем при сложении сигналов в моноканале увеличиваются амплитуды дифференцированных импульсов, и компаратор обнаруживает это увеличение амплитуды. Компаратор срабатывает при

любом импульсе, большем порогового уровня, но обнаружение конфликта происходит только в моменты действия собственного импульса кодера. Это реализуется на схеме совпадения И, которая пропускает импульс от компаратора только во время действия собственного сигнала и устанавливает триггер в единичное состояние, означающее наличие конфликта.

Схема устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по второму методу представлена на рисунке 3, а временная диаграмма его работы — на рисунке 4.

Так же, как по первому методу, по второму методу осуществляется дифференцирование всех фронтов в моноканале и перевод отрицательных импульсов в поло-

жительную область. Затем на реверсивном счетчике при отсутствии конфликта складывается и вычитается одинаковое число импульсов, и код на его выходе не изменяется при значении меньшем порогового. При конфликте увеличивается число дифференцированных импульсов, и код на выходе реверсивного счетчика увеличивается. Когда этот код достигнет порогового значения, срабатывает устройство сравнения кодов, и на основании этого вырабатывается сигнал «Конфликт».

Недостатком данного устройства является то, что если после обнаружения конфликта сразу же исчезнет сигнал в моноканале, код на выходе реверсивного счетчика не сможет уменьшиться и отменить ложный

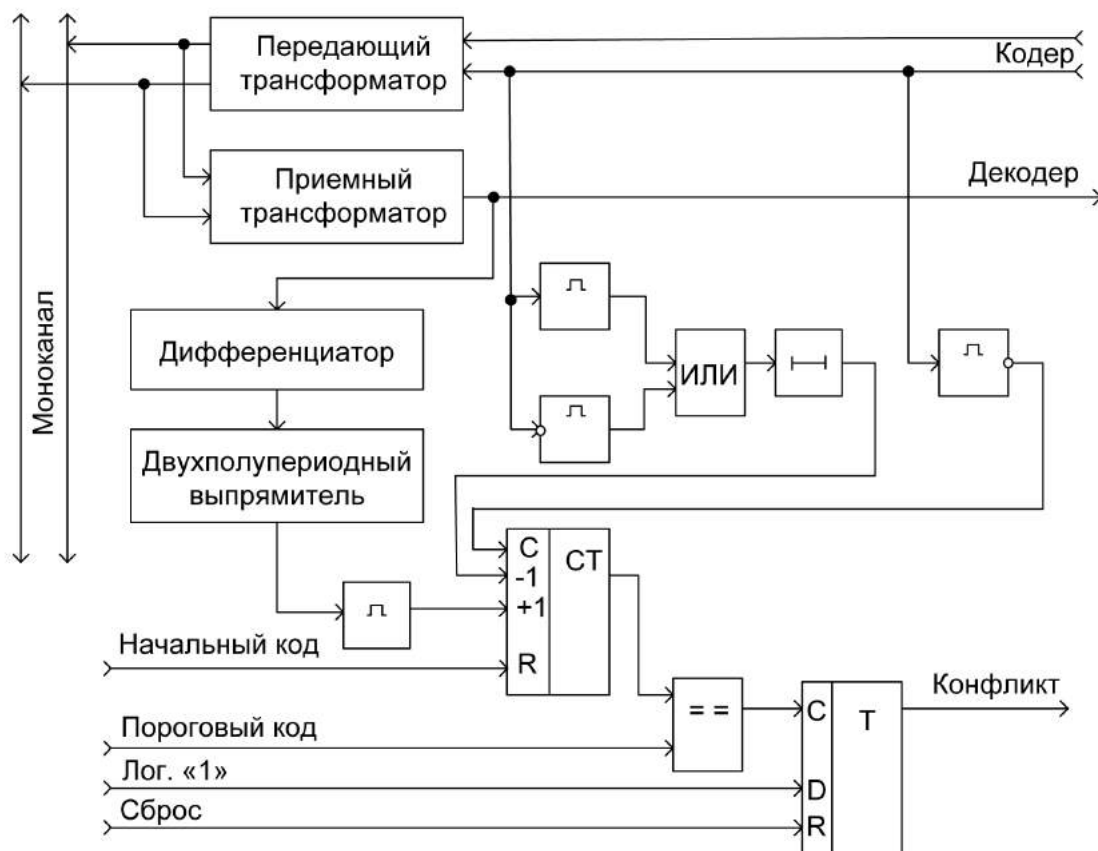


Рисунок 3. Схема устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по второму методу

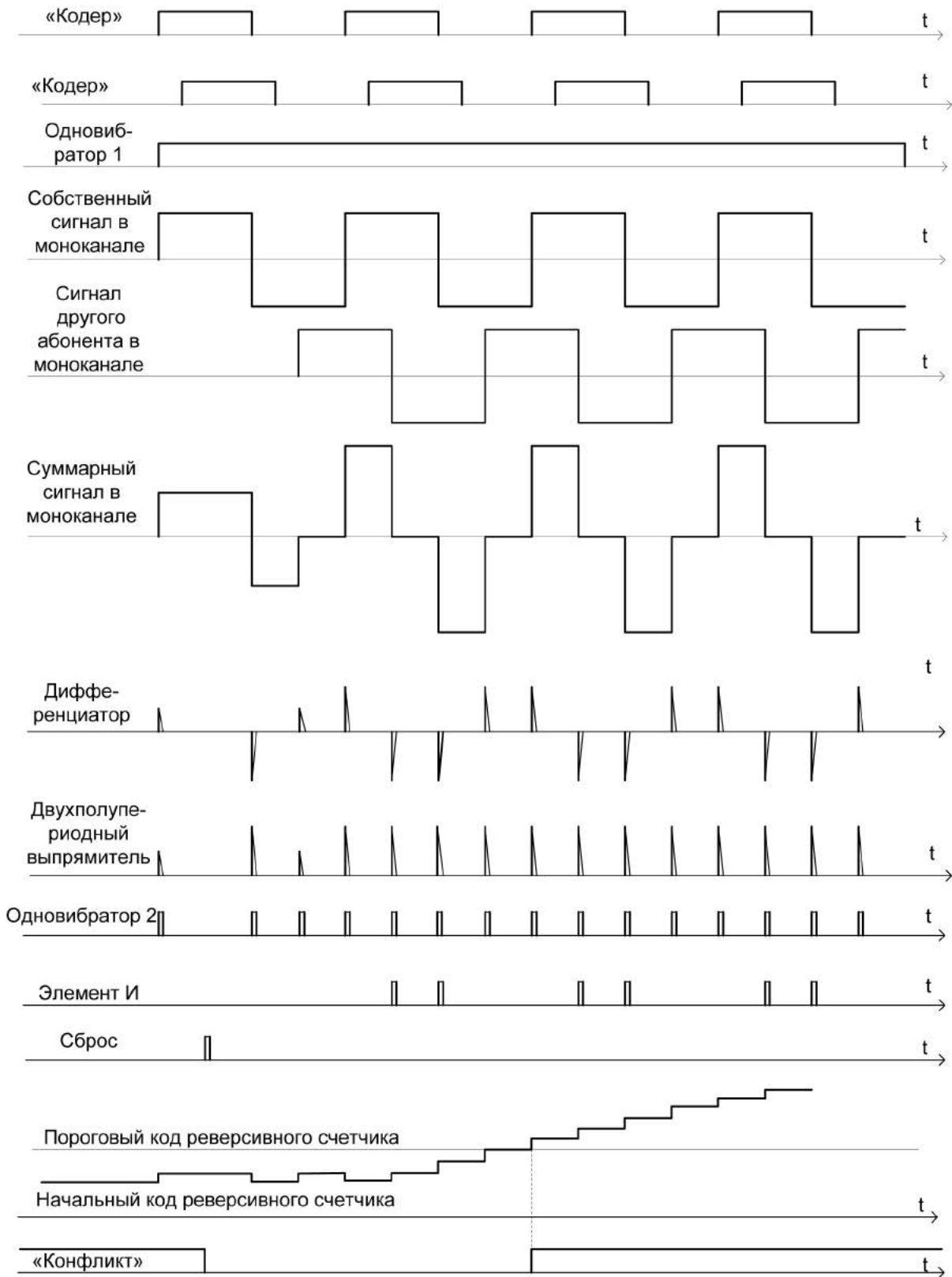


Рисунок 4. Временная диаграмма работы устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по второму методу

конфликт. Поэтому более надежно определять конфликт по оценке средней частоты дифференцированных импульсов, образующихся при сложении сигналов от нескольких абонентов.

Схема устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по третьему методу представлена на рисунке 5, а временная диаграмма его работы — на рисунке 6.

Устройство работает следующим образом. Сигнал в моноканале не дифференцируется, а просто берется его положительная часть. При конфликте в суммарном сигнале

образуются импульсы, по амплитуде отличающиеся от собственных импульсов в зависимости от фазы слагаемых сигналов. Если происходит подавление сигналов, то суммарные импульсы уменьшаются по амплитуде; если происходит сложение сигналов, то суммарные импульсы увеличиваются по амплитуде. С помощью двух компараторов определяется увеличение или уменьшение амплитуды суммарных импульсов. Конфликт в ЛВС определяется по наличию увеличения или уменьшения амплитуды импульсов в моноканале.

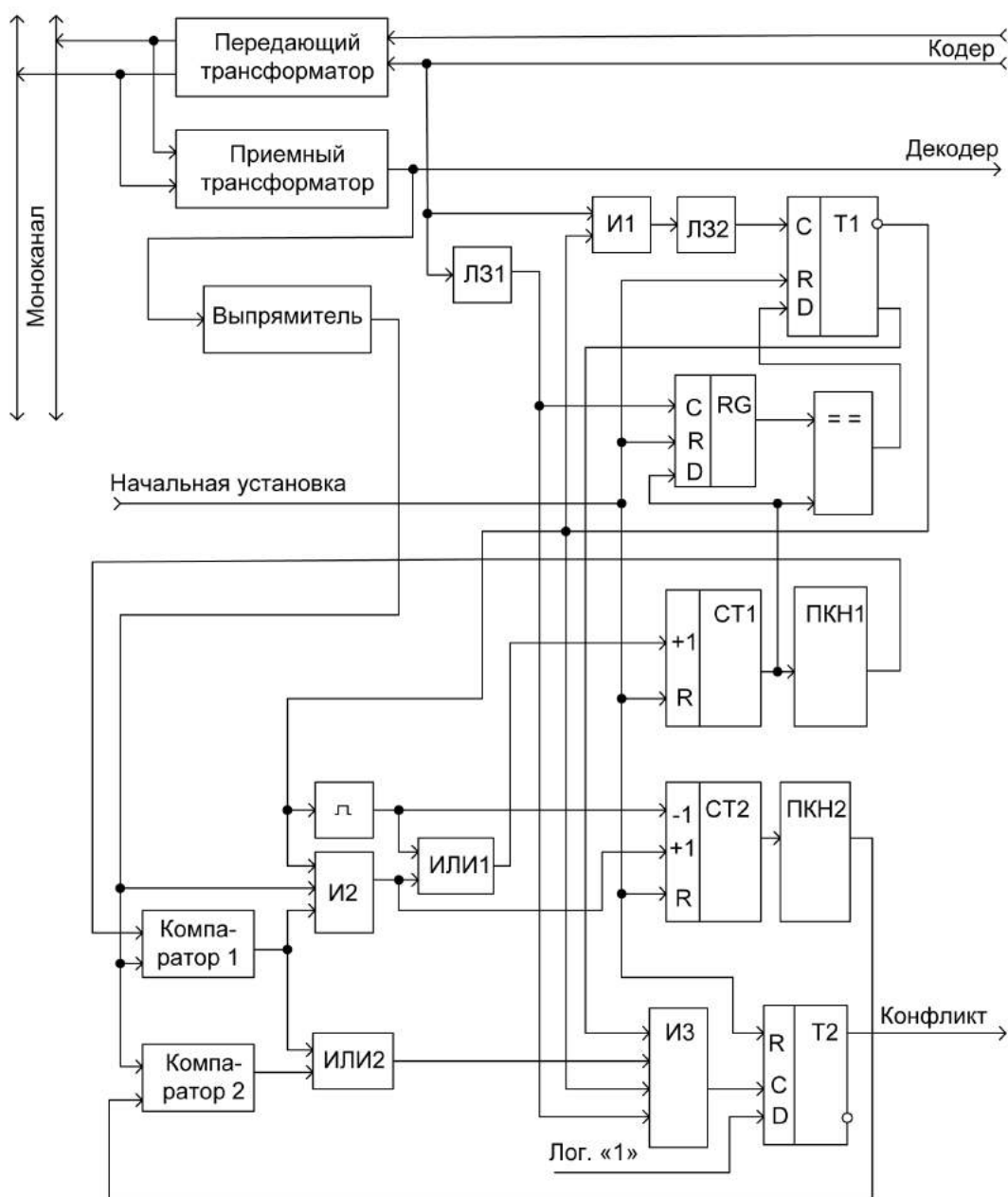


Рисунок 5. Схема устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по третьему методу

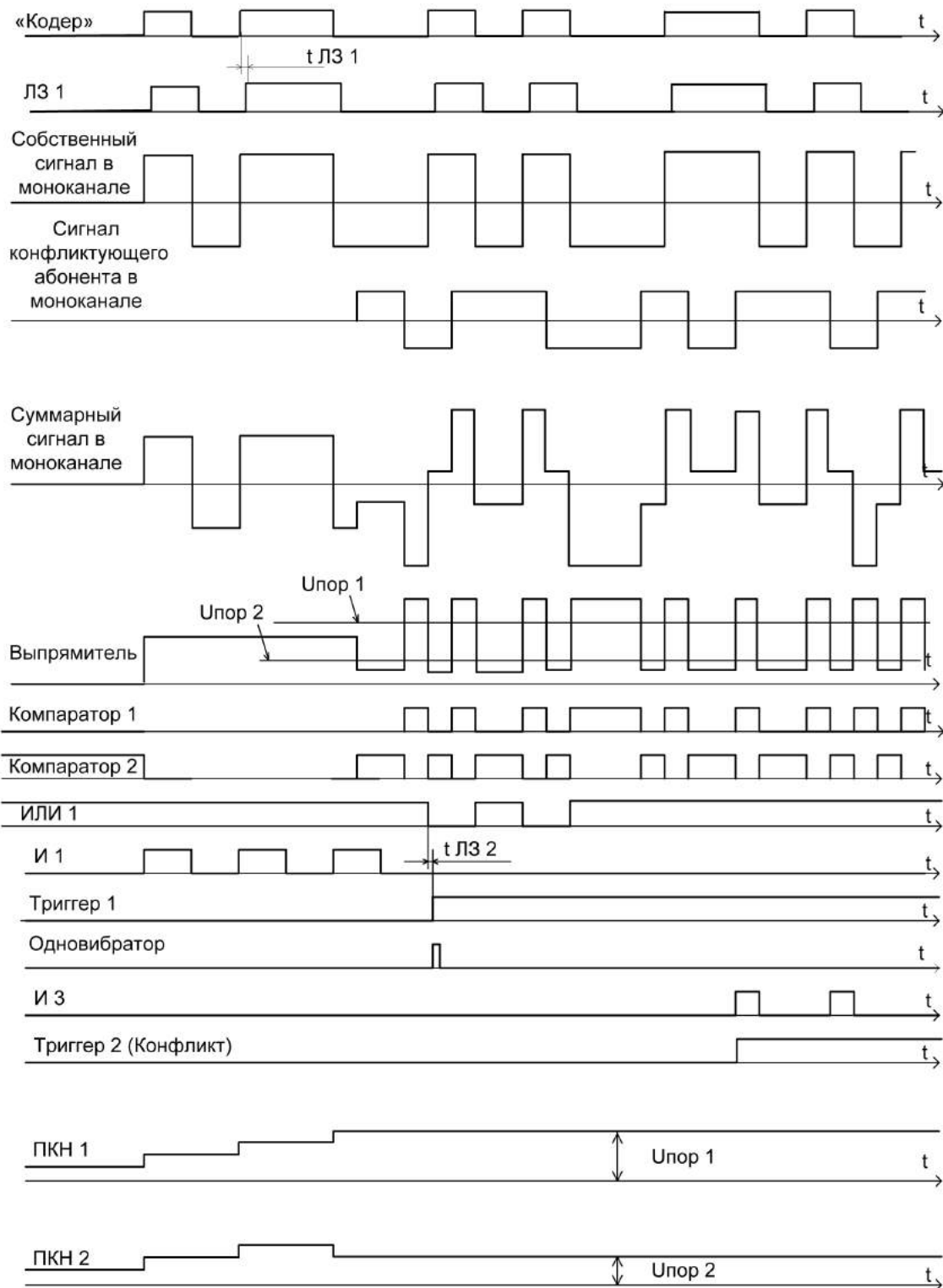


Рисунок 6. Временная диаграмма работы устройства обнаружения конфликтов в ЛВС по третьему методу

Выводы

1. Все предложенные методы обнаружения конфликтов в ЛВС просты по реализации.
2. Более надежным методом определения конфликтов в ЛВС является метод, использующий накопление нескольких диф-

ференцированных импульсов, превышающих пороговый уровень.

3. Наиболее надежным из предложенных методов определения конфликтов является метод обнаружения конфликтов, использующий при сложении сигналов в канале эффект как увеличения суммарного

сигнала, так и его уменьшения, в зависимости от фазы слагаемых сигналов.

4. Предложенные методы определения конфликтов в ЛВС рекомендуются к использо-

Список литературы

1. Блэк Ю. Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 506 с.
2. Мячев А.А., Степанов В.Н., Щербо В.К. Интерфейсы систем обработки данных: справочник / Под ред. А.А. Мячева. М.: Радио и связь, 1989. 416 с.
3. Патент 2029987 РФ, МПК G 06 F 13/00, 11/00. Устройство для обнаружения конфликтов в локальной вычислительной сети / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков (РФ). БИ № 6, 1995.
4. Патент 2020570 РФ, МПК G 06 F 13/00, 11/00. Устройство для обнаружения конфликтов в локальной вычислительной сети / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков (РФ). БИ № 18, 1994.
5. Патент 2028662 РФ, МПК. G 06 F 13/00, 11/00. Устройство для обнаружения конфликтов в локальной вычислительной сети / С.Л. Сироткин, А.Н. Коньков (РФ). БИ № 4, 1995.

ванию в сетях с небольшой скоростью и с небольшим числом абонентов при небольшой загруженности канала связи.

References

1. Black Y. Computer Networks: Protocols, Standards, Interfaces: Transl. from Engl. Moscow: Mir, 1990. 506 p.
2. Mjachev A.A., Stepanov V.N., Shherbo V.K. Interfaces of Data Processing Systems: a Directory / Ed. A.A. Mjachev. Moscow: Radio i svjaz', 1989. 416 p.
3. Patent 2029987 RF, IPC G 06 F 13/00, 11/00. Device for the Detection of Conflicts in the Local Area Network / S.L. Sirotkin, A.N. Konkov (RF). BI No. 6, 1995.
4. Patent 2020570 RF, IPC G 06 F 13/00, 11/00. Device for the Detection of Conflicts in the Local Area Network / S.L. Sirotkin, A.N. Konkov (RF). BI No. 18, 1994.
5. Patent 2028662 RF, IPC G 06 F 13/00, 11/00. Device for the Detection of Conflicts in the Local Area Network / S.L. Sirotkin, A.N. Konkov (RF). BI No. 4, 1995.



Алиев И. М.
Aliyev I. M.

соискатель кафедры «Управление и системная инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика



Алиев А. М.
Aliyev A. M.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системная инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

УДК 621.396

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Проанализированы методы и средства интеллектуализации измерительных преобразователей мощности переменного тока, являющиеся одними из основных параметров электрооборудования. Показано, что интеллектуализация измерительных устройств позволяет улучшить как их метрологические характеристики, так и их функциональные возможности. При этом выявлено, что алгоритмические и структурные методы являются наиболее распространенными. На основе анализа задач контроля и учета потребляемой энергии в смысле отдельной оценки активной, реактивной и полной мощности и параметров, влияющих на эффективность оборудования и составляющих мощности, определены пути уменьшения погрешности преобразования, приводящие к изменениям формы сигнала переменного тока, показаны недостатки применения преобразования Фурье при дискретной обработке сигнала. Рассмотрены вопросы построения измерительных преобразователей на основе дискретного преобразования Уолша с использованием системы функций Радемахера. Предложены метод и алгоритм интеллектуализации, основанные на процедуре изменения знаков дискретных значений сигнала, что значительно упрощает процесс обработки дискретных сигналов преобразования мощности. С целью компьютерного моделирования данного подхода разработана имитационная модель измерительного преобразователя на базе пакета прикладных программ Simulink, состоящая из генератора полигармонических сигналов, блока умножений, аналого-цифровых преобразователей, блока коррекции. Для проведения компьютерных экспериментов с предложенной моделью по каждому блоку определены экспериментальные значения амплитуды, частоты и фазовые сдвиги соответствующих гармоник. При анализе гармоник с целью устранения погрешности совпадения гармоник различного порядка предложено два пути. Сущность их заключается в том, что: 1) при оценке составляющих более низкого порядка для измерения сигнала, полученного умножением выходного сигнала генератора функций Уолша на значение гармоники низкого порядка, все дискретные значения сигнала кроме значений в заданном интервале отбрасываются, 2) после оценки следующей гармоники (более высокого порядка) результат отнимается от значения предыдущей гармоники.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, электрическая мощность, интеллектуализация, активная и реактивная мощность, дискретное преобразование Уолша.

INTELLIGENCE OF MEASURING TRANSDUCERS OF AC POWER

The methods and means of intellectualization of AC power measuring converters are analyzed, which are the main parameters of electrical equipment. It is shown that the intellectualization of measuring devices allows improving both their metrological characteristics and their functional capabilities. It was defined that algorithmic and structural methods are most common. On the basis of the analysis of the tasks of control and accounting of the consumed energy in terms of a separate evaluation of the active, reactive and full power and parameters affecting the efficiency of the equipment and components of the power, determined the ways of reducing error of the Fourier conversion resulting in changes in the shape of the AC signal on discrete signal processing. The problems of constructing measuring converters based on the discrete Walsh transform using the Rademacher function system are considered. The method and algorithm of intellectualization based on the procedure of changing the signs of discrete signal values is proposed, which greatly simplifies the process of processing discrete power conversion signals. For the purpose of computer simulation of given approach, a simulation model of a measuring converter based on the Simulink software package consisting of a polyharmonic signal generator, a multiplication unit, analog-to-digital converters, a correction unit has been developed. For carrying out computer experiments with the proposed model, experimental values of the amplitude, frequencies and phase shifts of the corresponding harmonics are determined for each block. In the analysis of harmonics with the aim of eliminating the error in the coincidence of harmonics of different orders, two ways are suggested. Their essence lies in the fact that: 1) when evaluating lower-order components for measuring the signal obtained by multiplying the output signal of the Walsh function generator by the value of a low order harmonic, all discrete values of the signal except the values in a given interval are discarded, 2) after estimating the next harmonic (higher order), the result is subtracted from the value of the previous harmonic.

Key words: measuring transducer, electrical power, intellectualization, active and reactive power, discrete Walsh transform.

Интеллектуализация измерительных приборов, устройств и систем является одним из путей повышения эффективности их функционирования. При этом могут быть улучшены как метрологические характеристики устройств (погрешность, производительность), так и другие функциональные возможности (автоматизация измерения, переключения диапазонов и т.д.) [1–4]. В настоящее время имеется ряд подходов к интеллектуализации измерительных приборов, охватывающих алгоритмические и структурные методы [5]. Ниже рассматривается алгоритмический метод интеллектуализации измерительных преобразователей мощности переменного тока на основе дискретного преобразования Уолша.

Одним из параметров, определяющих эффективность работы электрического оборудования, питающегося от сети переменного тока, является мощность. Для оценки расхода электрической энергии используются результаты измерения активной мощности, что определяется коэффициентом мощности оборудования. Данный параметр

изменяется в зависимости от эффективности использования оборудования, и при искажении формы сигнала переменного тока уменьшается. При этом реактивная составляющая мощности и, естественно, непроизводительные потери увеличиваются. Достоверная оценка реактивной мощности и мощности искажений позволяет оперативно скорректировать параметры и оптимизировать режимы работы оборудования и повысить эффективность их функционирования и значительно снизить потери мощности.

Традиционные методы преобразования, предполагающие сглаживание или подавление остальных составляющих мощности с целью выделения необходимого для оценки компонента, приводят к повышению погрешности измерения данного составляющего мощности. Современное состояние развития информационных технологий позволяет широко использовать цифровую обработку сигналов, в том числе разработать алгоритмы на базе преобразования Фурье. Однако применение преобразования Фурье

предполагает умножение анализируемого сигнала на комплексные экспоненциальные функции, а при дискретной обработке сигнала — каждого значения дискретного сигнала на дискретные экспоненциальные функции. Это требует дополнительных аппаратных и программных ресурсов для реализации данных алгоритмов, снижает эффективность процесса оценки гармонического состава рассматриваемого сигнала.

Исходя из этого проанализированы источники и факторы, приводящие к изменениям формы сигнала переменного тока, вопросы контроля и учета потребляемой энергии в смысле отдельной оценки активной, реактивной и полной мощности, предложена имитационная модель измерительного преобразователя, основанная на дискретном преобразовании Уолша.

Как известно, усредненное значение гармонического составляющего n -ого порядка на интервале наблюдения T можно определить следующим образом:

$$C(n) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} S(k) \cdot Z(k, n),$$

где $S(k)$ — k -ое дискретное значение исследуемого сигнала; $Z(k, n)$ — система ортогональных функций n -ого порядка; N — количество дискретных значений на интервале наблюдения, $N = \frac{T}{\Delta t}$, Δt — шаг дискретизации, $K = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

$Z(k, n)$ условно называется функцией знака. Основу данной функции составляет система функций Радемахера, которые принимают зна-

чения $+1$ или -1 . Используя правило упорядочения Уолша, данную функцию математически можно написать следующим образом:

$$Z(k, n) = (-1)^{\sum_{i=1}^d (l_{d-i+1} + l_{d-i}) \beta_i},$$

где d — определяется как $d = \log_2 N$, $t = 1, 2, 3, \dots, d-1, d$, l_{d-t+1} — значение $(d-t+1)$ -ого разряда аргумента n функции знака $Z(k, n)$ и может принимать значения 0 или 1 ; β_i — коэффициент, определяющий функцию Радемахера t -ого порядка; n — определяет порядок функции знака.

Предлагаемый метод основан на умножении сигнала на единицу со знаком, зависящим от изменения знака исследуемого сигнала на интервале наблюдения. Таким образом, вместо операции умножения сигнала на определенную систему ортогональных функций выполняется только операция изменения знаков его дискретных значений.

Для проверки достоверности полученных результатов разработана имитационная модель анализатора полигармонического сигнала, блок-схема которого показана на рисунке 1. Исследуемый сигнал с выхода генератора полигармонических сигналов (ГПС) поступает на вход блока умножения, а выходной сигнал БУ — на входы блока аналого-цифровых преобразователей (БАЦП). БК выполняет функцию коррекции.

ГПС состоит из семи генераторов синусоидальных сигналов и сумматора. Выходной сигнал генератора основной гармоники определяется как

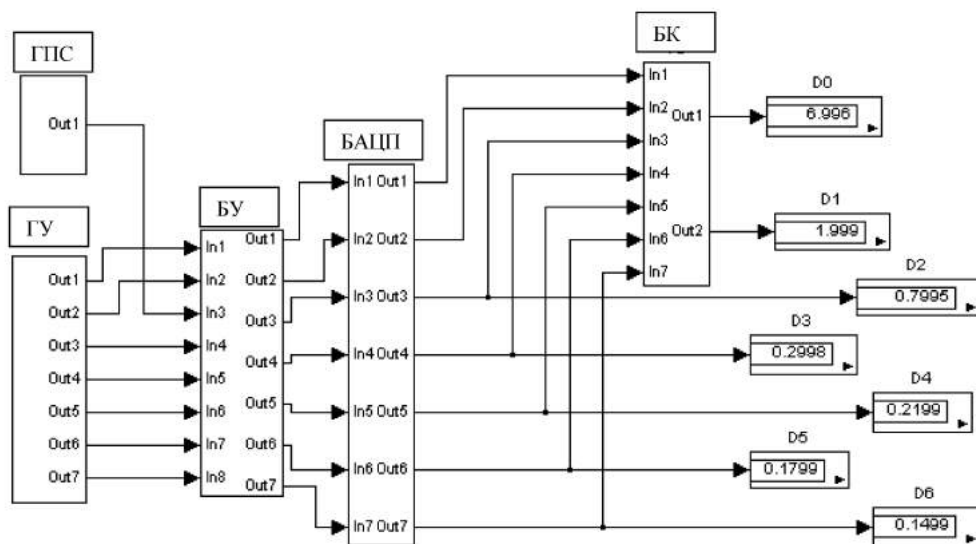


Рисунок 1. Имитационная модель анализатора полигармонического сигнала

$$U(t) = U_m \sin(\omega t)$$

Параметры указанного сигнала следующие: $U_m = 7V$, $\omega = 2\pi f$, $f = 50$ Hz.

Выходной сигнал ГПС умножается в БУ на соответствующую функцию знака, генерируемую блоком генераторов Уолша.

В общем виде входной сигнал выражается как:

$$S(t) = U_m \sin(\omega t) + \sum_{i=1}^{11} U_i(t) = U_m \sin(\omega t) + \sum_{i=3}^{13} U_{mi} \sin(\omega t - \varphi_i),$$

$$S(k) = U_m \sin\left(\frac{2\pi}{N}k\right) + \sum_{i=1}^{13} U_{mi} \left(\frac{2\pi}{N}ki - \varphi_i\right).$$

Таблица 1. Параметры составляющих полигармонического сигнала

Параметр	Гармонический ряд						
	1	3	5	7	9	11	13
U_m (V)	U_m	$U_m/3$	$U_m/5$	$U_m/7$	$U_m/9$	U_m	$U_m/13$
f (Hz)	50	150	250	350	450	550	650
φ (°)	0	6	9	13	15	18	20

Вывод

При анализе гармоник с целью устранения погрешности совпадения гармоник различного порядка предложено два пути. Их сущность заключается в том, что: 1) при оценке составляющих более низкого порядка для измерения сигнала, полученного умножением выходного сигнала генератора функций Уолша на значение гармоники низкого порядка, все дискретные значения сигнала

В таблице 1 приведены значения фазового сдвига φ_i для соответствующих гармоник.

Количество функций знака $S(k)$ на выходе ВАЦП может быть взято произвольно. В данном случае для генерации знаковых функций используется генератор Уолша (ГУ) с семью выходами, так как кроме основной гармоники предусмотрено 6 дополнительных гармоник.

кроме значений в интервалах $[\pi/3, \pi/2]$ и $[4\pi/3, 2\pi]$ отбрасываются; 2) после оценки следующей гармоники (более высокого порядка) результат отнимается от значения предыдущей гармоники.

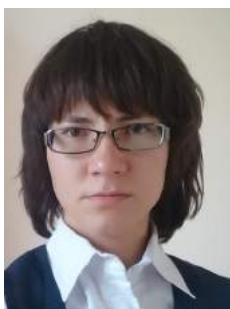
Компьютерные эксперименты полностью подтверждают работоспособность предложенного алгоритма измерения мощности сигнала и соответствующей имитационной модели.

Список литературы

1. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / Под ред. проф. В.П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2009. 248 с.
2. Гумбатов Р.Т., Абиев А.Н., Азери С.Ф. Интеллектуальные датчики и преобразователи информации для электроэнергетических объектов. Баку: Элм. 2004. 168 с.
3. Луценко Б.Н. Оценка мощности в трехфазных силовых сетях. Приборы и системы // Управление, контроль, диагностика. 2002. № 7.
4. Мелентьев В.С. Анализ погрешности из-за нестабильности частоты при измерении интегральных характеристик сигналов в электрических сетях // Известия вузов. Электромеханика. 2004. № 6.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2006. 751 с.

References

1. Afonskij A.A., D'jakonov V.P. Digital Analyzers of Spectrum, Signals and Logic / Ed. by prof. V.P. D'jakonov. Moscow: SOLON-Press Publ., 2009. 248 p.
2. Gumbatov R.T., Abiev A.N., Azeri S.F. Intelligent Sensors and Information Converters for Power Objects. Baku: Jelm Publ., 2004. 168 p.
3. Lucenko B.N. Evaluation of Power in Three-Phase Power Networks. Devices and Systems // Management, Control, Diagnostics. 2002. No. 7.
4. Melent'ev V.S. Analysis of the Error due to Frequency Instability when Measuring the Integral Characteristics of Signals in Electrical Networks // Izvestiya Vuzov. Electromechanics. 2004. No. 6.
5. Sergienko A.B. Digital Signal Processing. 2nd ed. Saint-Petersburg: Piter Publ., 2006. 751 p.



Харисова З. И.

Kharisova Z. I.

*аспирант кафедры информационно-измерительной техники,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 535.241.6

КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОЧНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Определена оптимальная форма проточной измерительной камеры в составе системы гранулометрического анализа жидких дисперсных сред для обеспечения ликвидации застойных зон, выявлена предпочтительная форма патрубков, при использовании которой наблюдаются наименьшие потери напора.

Одним из важнейших элементов в составе поточных систем гранулометрического анализа жидких дисперсных сред является проточная измерительная камера, от конструктивного исполнения которой зависят точность, длительность и достоверность проводимых измерений.

Предложена система гранулометрического анализа, в которой реализован нефелометрический принцип измерения на основе проточной измерительной камеры с прозрачной стенкой и видеокamеры, установленной перед ней. В статье рассмотрен наиболее простой вариант исполнения измерительной камеры для системы гранулометрического анализа жидких дисперсных сред прямоугольной формы, в которой при движении среды происходят дестабилизация потока, образование области основного транзитного потока и водоворотных областей застойных зон в связи с резким изменением конфигурации канала. Предлагаемое конструктивное исполнение измерительной камеры значительно снижает неравномерность скоростей, возникающую на участках изменения конфигурации канала, тем самым обеспечивая ликвидацию застойных зон.

В работе представлена трехмерная модель измерительной камеры, описано и показано расположение световой ловушки, необходимой для предотвращения отражения лазерного луча обратно в камеру от ее стенки. Проходящий сквозь исследуемую среду лазерный луч, попадая в окно световой ловушки, по размеру превосходящее диаметр луча, отражается от зеркальной наклонной поверхности в ее полости, расположенной под небольшим углом ко дну измерительной камеры. Дальнейшие многократные переотражения от стенок световой ловушки препятствуют выходу луча в измерительную камеру.

В работе были рассчитаны коэффициенты истечения для различных конфигураций патрубков, позволяющих регулировать скорость истечения жидкой дисперсной среды и время опорожнения измерительной камеры, на основании чего была выявлена их предпочтительная форма, при использовании которой наблюдаются наименьшие потери напора.

Ключевые слова: определение размеров частиц, гранулометрия, дисперсность, жидкие дисперсные среды, интеллектуальное средство измерений, нейросетевые технологии, поточные измерения, проточная измерительная камера, нефелометрия, видеотехнические средства.

THE FLOW MEASURING CHAMBER CONSTRUCTION OF THE PARTICLE SIZE ANALYSIS SYSTEM FOR LIQUID DISPERSE MEDIA

The optimal construction of the flow measuring chamber of the particle size analysis system for liquid disperse media and stagnant zones liquidation is proposed. The configuration of the nozzles for least head loss is identified.

One of the most important elements in the particle size analysis system for liquid disperse media is a flow measuring chamber. Construction of the chamber depends on the accuracy, duration and reliability of the measurements.

It is proposed a particle size analysis system which based on the nephelometric measurement principle and flow measuring chamber with a transparent wall and a video camera. The simplest rectangular variant of the measuring chamber for a particle size analysis system for liquid disperse media is considered. When the medium moves in chamber the flow is destabilized, the main transit flow region and the vortex areas of stagnant zones are formed due to a sharp change in the percolating channel configuration. The design of the proposed measuring chamber significantly reduces the unevenness of the velocities arising at the areas of the channel configuration change, thereby ensuring the of stagnant zones liquidation.

A three-dimensional model of the measuring chamber is presented, the location of the light trap, which is necessary to prevent reflection of the laser beam back into the chamber from its wall is describes. The laser beam passing through the analyzed medium, falling into the window of a light trap larger than the diameter of the beam, is reflected from the mirror inclined surface in its cavity located at a small angle to the bottom of the measuring chamber. Further multiple reflections from the walls of the light trap prevent the beam from reaching the measuring chamber.

The flow coefficients for different configurations of nozzles has been calculated, which allow to regulate the flow rate of the liquid disperse medium and the emptying time of the measuring chamber, on the basis of which their preferred configuration for the least head loss was revealed.

Key words: particle size analysis, granulometry, dispersion, liquid disperse media, intelligent measuring instrument, neural network technologies, flow measuring, flow measuring chamber, nephelometry, video equipment.

Проведение гранулометрического анализа (ГА) жидких дисперсных сред (ЖДС) является неотъемлемой частью технологического контроля во многих областях промышленности, например в химической, пищевой, нефтяной, лакокрасочной, фармацевтической и пр., поскольку свойства производимых материалов во многом зависят от размера частиц дисперсной фазы. Под гранулометрическим составом подразумевают процентное (долевое) распределение массы или числа частиц по их размерам (диапазонам размеров) [1].

Одним из важнейших элементов в составе поточных систем ГА ЖДС является проточная измерительная камера, от конструктивного исполнения которой зависят точность, длительность и достоверность проводимых

измерений. Предложена система гранулометрического анализа [1], в которой реализован нефелометрический принцип измерения на основе проточной измерительной камеры с прозрачной стенкой и видеокамеры, установленной перед ней. В центр измерительной камеры подведен жесткий световод, вводящий в среду зондирующее лазерное излучение. Картина рассеянного излучения периодически регистрируется видеокамерой и преобразуется в числовые результаты, характеризующие распределение частиц по размерам.

Рассмотрим наиболее простой вариант исполнения измерительной камеры для системы ГА ЖДС (рисунок 1) прямоугольной формы.

В связи с резким изменением конфигурации канала (переход от диаметра $d_{э1}$ к $d_{э2}$) в области перехода входного патрубка в измерительную камеру происходит дестабилизация потока, образуется область основного транзитного потока и водоворотные области застойных зон А. Аналогично для перехода из измерительной камеры в выходной патрубок (от диаметра $d_{э2}$ к $d_{э3} = d_{э1}$).

Повышение давления вызывает вращательное циркуляционное движение частиц дисперсной фазы в углах измерительной камеры, поскольку эти частицы не обладают необходимой кинетической энергией для перемещения совместно с транзитным потоком. Постепенно увлекая частицы вихревой зоны, основной поток будет вновь расширяться и заполнять сечение канала.

Стабилизация потока происходит на некоторой длине застоя $l_з$, приблизительно равной десяти диаметрам входного патрубка (рисунок 2) [2]. Значительно снизить нерав-

номерность скоростей, возникающую на участках изменения конфигурации канала, тем самым обеспечив безотрывное протекание ЖДС от стенок и, соответственно, ликвидацию застойных зон в измерительной камере, можно изменив ее конструктивное исполнение, заменив резкое расширение и сужение канала на плавное, с углом расширения канала α не более 50° (диффузоры).

При угле расширения канала α более 50° происходит заметный отрыв основного потока от стенок аналогично резкому расширению при $\alpha = 90^\circ$ [3] (рисунок 2).

Тогда, для исключения образования застойных зон, при $l_з = 10 \cdot d_{э1}$ целесообразно принять за границы измерительной камеры вписанную в диффузоры окружность диаметром $D_k = 2 \cdot l_з$.

Для предотвращения отражения лазерного луча обратно в камеру от ее стенки оппозитно диоду устанавливается световая ловушка (рисунок 2). Проходящий сквозь исследуемую среду лазерный луч попадает в

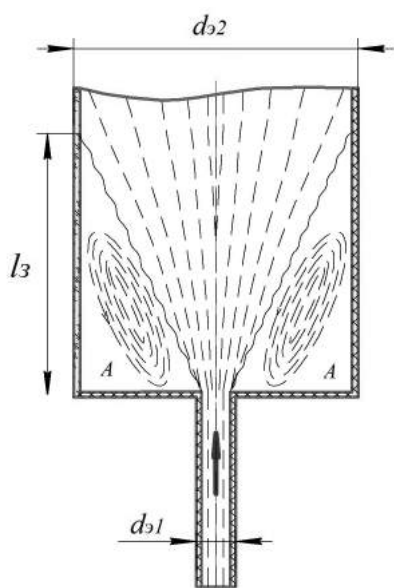


Рисунок 1. Образование застойных зон при внезапном расширении канала в камере для системы ГА ЖДС прямоугольной формы

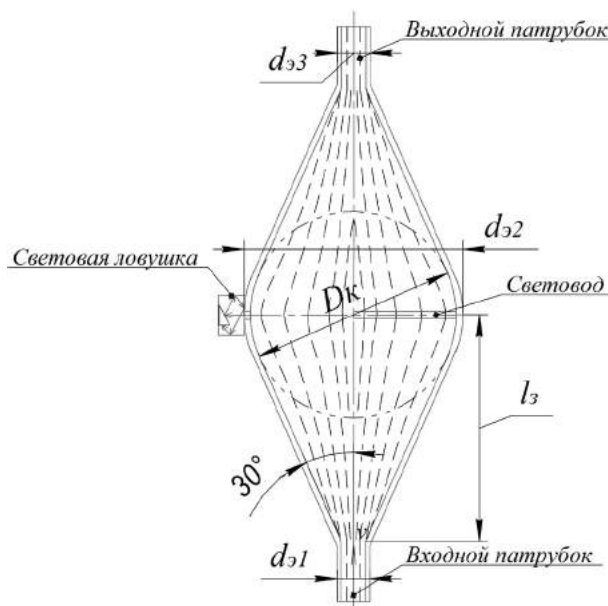


Рисунок 2. Форма измерительной камеры с ликвидацией застойных зон

Таблица 1. Коэффициенты истечения для различных конфигураций патрубков

Конфигурация патрубка	$K_{сж}$	$K_{расх}$	$K_{скор}$	$K_{сопр}$	Доля потерь от напора, %
Цилиндрический внешний	1,00	0,82	0,82	0,50	32,8
Цилиндрический внутренний	1,00	0,71	0,71	1,00	49,6
Конический сходящийся (12°)	0,98	0,94	0,96	0,09	7,8
Конический расходящийся (7°)	1,00	0,47	0,47	3,53	77,9
Коноидальный	1,00	0,97	0,97	0,06	5,9

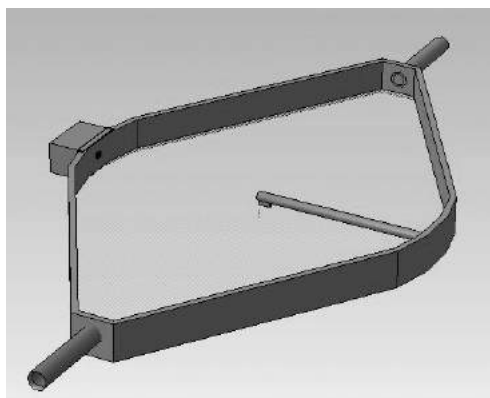


Рисунок 3. Трехмерная модель проточной измерительной камеры

окно световой ловушки, которое по размеру чуть превосходит диаметр луча. Затем луч отражается от зеркальной наклонной поверхности в полости ловушки, расположенной под небольшим углом ко дну измерительной камеры ($10\text{--}12^\circ$). Дальнейшие многократные переотражения от стенок световой ловушки препятствуют выходу луча в измерительную камеру.

Трехмерная модель проточной измерительной камеры представлена на рисунке 3.

Использование насадков (входного и выходного патрубков) в измерительной камере по сравнению с обычными отверстиями позволяет изменить скорость истечения ЖДС, потери напора, пропускную способ-

Список литературы

1. Харисова З.И., Фетисов В.С. Система для экспрессного определения гранулометрического состава суспензий на основе видеотехнических средств и искусственной нейросети, дообучаемой в процессе работы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 57–64.
2. Руднев С.С. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередат: учеб. пособие для студ. вузов / Под ред. С.С. Руднева, Л.Г. Подвидза. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. 416 с.
3. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.
4. Рабинович Е.З. Гидравлика: учеб. пособие для нефтяных спец. вузов. М.: Недра, 1980. 278 с.

ность канала, оказывая влияние на время опорожнения камеры. Длина патрубков обычно принимается не менее 2–3 размеров диаметра отверстия. Различают цилиндрические, конические и коноидальные патрубки [4]. Различные конфигурации патрубков позволяют регулировать скорость истечения ЖДС, время опорожнения сосуда. Так, например, цилиндрические и конические патрубки позволяют снизить скорость истечения ЖДС, одновременно увеличивая расход благодаря явлениям сжатия и последующего расширения струи.

Наиболее распространенным и простым в изготовлении видом патрубков является цилиндрический внешний, по этой причине предлагается использовать данный тип для проточных измерительных камер.

Вывод

Таким образом, была определена оптимальная форма проточной измерительной камеры в составе системы гранулометрического анализа жидких дисперсных сред, в которой обеспечена ликвидация застойных зон, описан принцип предотвращения отражения лазерного луча в измерительную камеру и выявлена предпочтительная форма патрубков, при использовании которой наблюдаются наименьшие потери напора.

References

1. Kharisova Z.I., Fetisov V.S. The system for the express size determination of suspension particles based on the video facilities and an artificial neural network with additional learning // Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics. 2017. No. 2. P. 57–64.
2. Rudnev S.S. Laboratory Course of Hydraulics, Pumps and Hydraulic Transmission: Textbook for Students of Technical Colleges / Ed. by S.S. Rudnev, L.G. Podvidz. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. 416 p.
3. Chugaev R.R. Hydraulics (Technical Fluid Mechanics): Textbook for High Schools. 4-e izd., pererab. i dop. Leningrad: Energoizdat Publ., 1982. 672 p.
4. Rabinovich E.Z. Hydraulics: Textbook for Oil Specialties of Universities. Moscow: Nedra Publ., 1980. 278 p.



Денисова О. А.
Denisova O. A.

*доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры «Физика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*



Абрамишвили Р. Л.
Abramishvili R. L.

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

УДК 621.38:669

МЕТОД ИНДИКАЦИИ ВИБРАЦИИ МЕХАНИЗМОВ, ОСНОВАННЫЙ НА АКУСТООПТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

В статье предлагается новый метод контроля вибраций узлов механизмов и агрегатов. Уникальность метода заключается в применении акустооптического эффекта в жидких кристаллах (ЖК). ЖК-ячейка служит индикатором, светопропускание которого зависит от амплитуды колебаний. Суть его заключается в том, что монохроматический пучок света, пройдя поляризатор, падает на ячейку, заправленную жидким кристаллом. Ячейка сконструирована таким образом, что жидкий кристалл находится между двумя массивными прозрачными пластинами, разделенными прокладками. Использовался жидкий кристалл нематического типа *n*-метоксибензилиден-*n*-бутиланилин (МББА). Между пластинами помещена еще одна тонкая пластина, которая может совершать сдвиговые колебания в плоскости ячейки. Эта пластина соединена волноводом с механизмом, вибрацию на котором необходимо контролировать. Во время его работы колебания передаются по волноводу подвижной пластине. От нее сдвиговые возмущения распространяются в жидком кристалле. При достижении порогового значения амплитуды колебания изначально гомеотропно ориентированные молекулы жидкого кристалла отклоняются от нормали к ячейке. Вследствие этого световой пучок, падающий на ячейку, проходит и фиксируется фотоприемником. Далее обработанный сигнал выводится на монитор оператора в удобной для анализа форме.

Необходимо отметить, что возникновение данного акустооптического эффекта носит пороговый характер. Пороговое значение амплитуды воздействия не зависит от частоты, температуры, толщины ЖК-слоя. Зависимость угла отклонения директора от амплитуды вибрации имеет линейную зависимость, что упрощает калибровку датчика. Использование в качестве индикатора ячейки на жидких кристаллах позволит повысить точность и чувствительность метода мониторинга вибраций, так как жидкие кристаллы – системы более чувствительные по сравнению с твердыми кристаллами. Время релаксации ориентационных эффектов в жидких кристаллах $\sim 10^{-6}$ с.

С точки зрения практического значения данный метод интересен для использования в нефтегазовой отрасли и авиационной промышленности.

Ключевые слова: ЖК-ячейка, акустооптический эффект, ЖК-датчик, датчик вибрации, метод контроля вибрации, индикация механических колебаний.

METHOD OF INDICATION OF VIBRATION OF MECHANISMS BASED ON ACOUSTO-OPTIC EFFECT IN NEMATIC LIQUID CRYSTALS

The article proposes a new method for controlling the vibrations of the nodes of mechanisms and aggregates. The uniqueness of the method lies in the application of the acousto-optic effect in liquid crystals (LC). The LCD cell serves as an indicator, the light transmission, which depends on the amplitude of the oscillations. Its essence lies in the fact that a monochromatic beam of light, passing through a polarizer, falls on a cell filled with a liquid crystal. The cell is designed in such a way that the liquid crystal is between two massive transparent plates separated by spacers. A liquid crystal of nematic type n-methoxybenzylidene-n-butylaniline (MBBA). In addition, there is one more thin plate between the plates that can make shear vibrations in the plane of the cell. This plate is connected by a waveguide to a mechanism, the vibration on which it is necessary to control. During its operation, oscillations are transmitted along the waveguide to a moving plate. From it, shear perturbations propagate in a liquid crystal. When the threshold value of the vibration amplitude is reached, initially homeotropically oriented liquid crystal molecules deviate from the normal to the cell. As a result, the light beam incident on the cell passes and is fixed by the photodetector. Further, the processed signal is output to the operator's monitor in a form convenient for analysis.

It should be noted that the occurrence of this acousto-optic effect is of a threshold nature. The threshold value of the amplitude of the action does not depend on the frequency, temperature, thickness of the LC layer. Dependence of the deviation angle of the director on the amplitude of vibration has a linear relationship, which simplifies the calibration of the sensor. The use of a cell on liquid crystals as an indicator will increase the accuracy and sensitivity of the vibration monitoring method. Since liquid crystals are systems more sensitive than solid crystals. The relaxation time of the orientational effects in liquid crystals is $\sim 10^{-6}$ s.

From the practical point of view, this method is of interest for use in the oil and gas industry and the pulp and aircraft industry.

Key words: LCD cell, acousto-optic effect, LCD sensor, vibration sensor, vibration control method, indication of mechanical vibrations.

Введение

Очевидно, что наличие вибраций характерно для механизмов, содержащих движущиеся элементы. Если превышаются допустимые показания, может произойти авария или отказ оборудования [1–3]. В последнее время активно внедряются методы неразрушающего контроля, которые обеспечивают своевременное выявление проблем в оборудовании. Вибрация — один из наиболее доступных и дающих необходимую информацию параметров как для комплексной оценки технического состояния оборудования, так и отдельных узлов и агрегатов [4–6]. Своевременное выявление технических проблем, в том числе параметров вибрации, позволяет снизить затраты на ремонт и обслуживание оборудования. Они дают возможность решать такие технико-экономические проблемы, как мониторинг за текущим состоянием узлов и агрегатов, предотвраще-

ние аварий и отказов, как следствие, превентивного ремонта при снижении показателей, вывод оборудования в ремонт согласно его техническому состоянию, что позволит увеличить межремонтный интервал.

Для решения подобных задач в некоторых отраслях науки и техники требуются повышенная чувствительность и быстродействие, а это требует новых научно-технических решений.

Сейчас существует большое количество приборов и систем определения параметров вибрации, которые основаны на различных физических эффектах и явлениях [7–11].

Авторами разработана высокоэффективная система определения параметров вибрации в узлах и механизмах, основанная на акустооптическом эффекте в жидких кристаллах нематического типа.

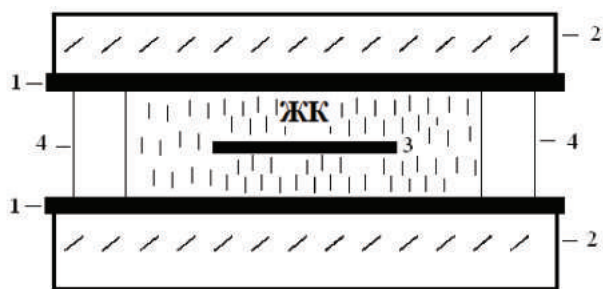
Разработка этой системы дала повышение чувствительности (до 0,1 мкм) и повышение

быстродействия благодаря сильно выраженному ориентационному эффекту в жидких кристаллах (время релаксации 10^{-6} с).

Описание метода

Мы предлагаем высокочувствительный метод измерения параметров вибрации, основанный на акустооптическом эффекте в нематиках. Акустооптический эффект наблюдается при воздействии оптических и звуковых волн в кристаллах.

Идея метода заключается в использовании ячейки, содержащей жидкий кристалл (ЖК). Ячейка является индикатором возникновения механических колебаний. ЖК-ячейка выполнена в виде многослойной конструкции (рисунок 1). Она состоит из двух массивных прозрачных пластин, изготовленных из предметных стекол. Между ними помещена тонкая стеклянная пластина, которая может совершать колебания в плоскости ячейки.



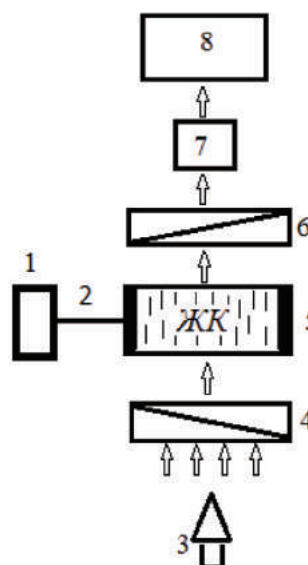
1 — проводящее покрытие из металлического хрома; 2 — подложки из предметного стекла; 3 — подвижная пластина; 4 — прокладки, задающие толщину ЖК-слоя

Рисунок 1. Акустооптическая ячейка (вид сбоку)

В качестве конденсированной среды использовался нематический жидкий кристалл *n*-метоксибензилиден-*n*-бутиланилин (МББА), который находится в мезофазе при температуре от 18 °С до 42 °С, что дает возможность его применения в широком температурном диапазоне. На подложки напылялся металлический хром для создания гомеотропной ориентации молекул ЖК, т.е. молекулы жидкого кристалла ориентированы перпендикулярно пластинам.

В предложенной структурной схеме (рисунок 2) средняя подвижная пластина ЖК-ячейки соединена с механическим узлом 1 с помощью волновода 2. Ячейка освещается источником монохроматического поля-

ризованного света (лазером) 3. Луч лазера, проходя через поляризатор 4 и ячейку 5, попадает на анализатор с фотоприемником 6. Оптический сигнал, преобразованный в электрический аналоговый, обрабатывается микроконтроллером 7, в состав которого входят усилитель с аналого-цифровым преобразователем, а также микропроцессор. После этого данные с микроконтроллера выводятся на монитор оператора 8 в виде графика, таблицы или в другом удобном виде.



1 — механический узел; 2 — волновод; 3 — источник света (лазер); 4 — поляризатор; 5 — ячейка с ЖК; 6 — анализатор с фотоприемником; 7 — микроконтроллер, в составе которого имеются усилитель, аналого-цифровой преобразователь и микропроцессор; 8 — монитор

Рисунок 2. Структурная схема измерительной системы, основанной на акустооптическом эффекте в ЖК

Принцип работы акустооптической системы состоит в следующем. До начала воздействия на ячейку датчик механических колебаний — директор жидкого кристалла — ориентирован перпендикулярно пластинам ячейки. В такой ситуации при скрещенных анализаторе и поляризаторе световой пучок не проходит. Когда механический узел начинает работать, вибрации от него через волновод передаются на среднюю пластину ЖК-ячейки. Когда амплитуда вибрации достигает значения 0,8 мкм, директор отклоняется от нормали к ячейке на некоторый угол θ_c , и ориентация директора жидкого кристалла начинает резко изменяться (дан-

ный акустооптический эффект имеет пороговый характер возникновения) [12]. Вследствие этого светопропускание ЖК-ячейки изменяется. Фотоприемник фиксирует поступивший на него сигнал, который отражается на мониторе. Необходимо отметить, что область применения описываемого метода мониторинга вибраций лежит в тех сферах, где вибрации при работе механизмов должны быть минимальными, то есть до 0,8 мкм.

Математическая модель. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Экспериментальная ячейка — датчик (рисунок 1), рассматриваемая в статье, представляет собой систему, состоящую из двух слоев ЖК толщиной h . Тогда воздействие звуковой волны вследствие акустооптического эффекта на такую систему приводит к появлению двойного лучепреломления. При этом анализатор и поляризатор составляют угол 45° с направлением механического сдвига. Согласно Фурье-анализу, в оптическом сигнале должны регистрироваться как постоянная составляющая интенсивности P_c , так и переменный во времени сигнал $P(t)$, содержащий спектр гармоник на частоте возбуждения ω [13–15].

Согласно закону Малюса для анизотропных сред, интенсивность оптического сигнала, прошедшего через жидкий кристалл:

$$P = P_o \left\{ \left[\sin^2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > + \frac{\pi h b}{\lambda} [2 < \sin \theta_c \theta_i > + < \theta_i^2 >] \sin 2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > + \left[\frac{\pi h b}{\lambda} \right]^2 [2 < \sin \theta_c \theta_i > + < \theta_i^2 >]^2 \cos^2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > \right\}, \quad (1)$$

где λ — длина падающей световой волны; постоянная $b = 0,23$; θ_c — постоянная компонента угла наклона молекул жидкого кристалла (директора); θ_i — переменная компонента угла наклона молекул ЖК.

Проведя Фурье-анализ, получим выражения для постоянной компоненты оптического сигнала P_c и переменных компонент оптического сигнала $P_{1\omega}$:

$$P_c = P_o \left\{ \sin^2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > + \frac{\pi h b}{\lambda} \frac{\theta_o^2}{2} \sin 2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > + 2 \left[\frac{\pi h b}{\lambda} \right]^2 \times \times < \sin \theta_c \theta_o >^2 \cos^2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > + \frac{3}{8} \left[\frac{\pi h b}{\lambda} \right]^2 (\theta_o^2)^2 \cos^2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > \right\}, \quad (2)$$

$$P_{1\omega} = P_o \left\{ 2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin \theta_c \theta_o > > \sin 2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > + 3 \left[\frac{\pi h b}{\lambda} \right]^2 < \sin \theta_c \theta_o > \times \times \theta_o^2 \cos^2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > \right\} \sin \omega t, \quad (3)$$

$$P_{2\omega} = P_o \left\{ - \frac{\pi h b}{\lambda} \frac{\theta_o^2}{2} \sin 2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > - 2 \left[\frac{\pi h b}{\lambda} \right]^2 < \sin \theta_c \theta_o >^2 \cos^2 \frac{\pi h b}{\lambda} \times \times < \sin^2 \theta_c > - \left[\frac{\pi h b}{\lambda} \frac{\theta_o^2}{2} \right]^2 \cos^2 \frac{\pi h b}{\lambda} < \sin^2 \theta_c > \right\} \cos 2\omega t. \quad (4)$$

Согласно оптике анизотропных сред и полученному выражению (3), сигнал, который регистрируется на частоте возбуждения ω , будет наблюдаться в том случае, когда директор отклонится на угол θ_c относительно нормали к ячейке. Возникновение акустооптического эффекта можно определить по появлению переменного сигнала $P_{1\omega}$ на частоте воздействия. Это также позволяет измерить величину пороговой амплитуды $a_{п}$ звуковой волны в НЖК.

Нами были экспериментально получены зависимости постоянной компоненты оптического сигнала $P_c(a)$ и его второй гармоники $P_{2\omega}(a)$ (рисунок 3). По этим значениям вычислялась зависимость среднего значения квадрата синуса постоянного угла наклона директора $< \sin^2 \theta_c >$ от амплитуды (рисунок 4). Из нее следует, что при значении амплитуды механического сдвига 0,8 мкм функция $< \sin^2 \theta_c >(a)$ имеет порог, далее она монотонно возрастает, и стремится к максимуму — 1.

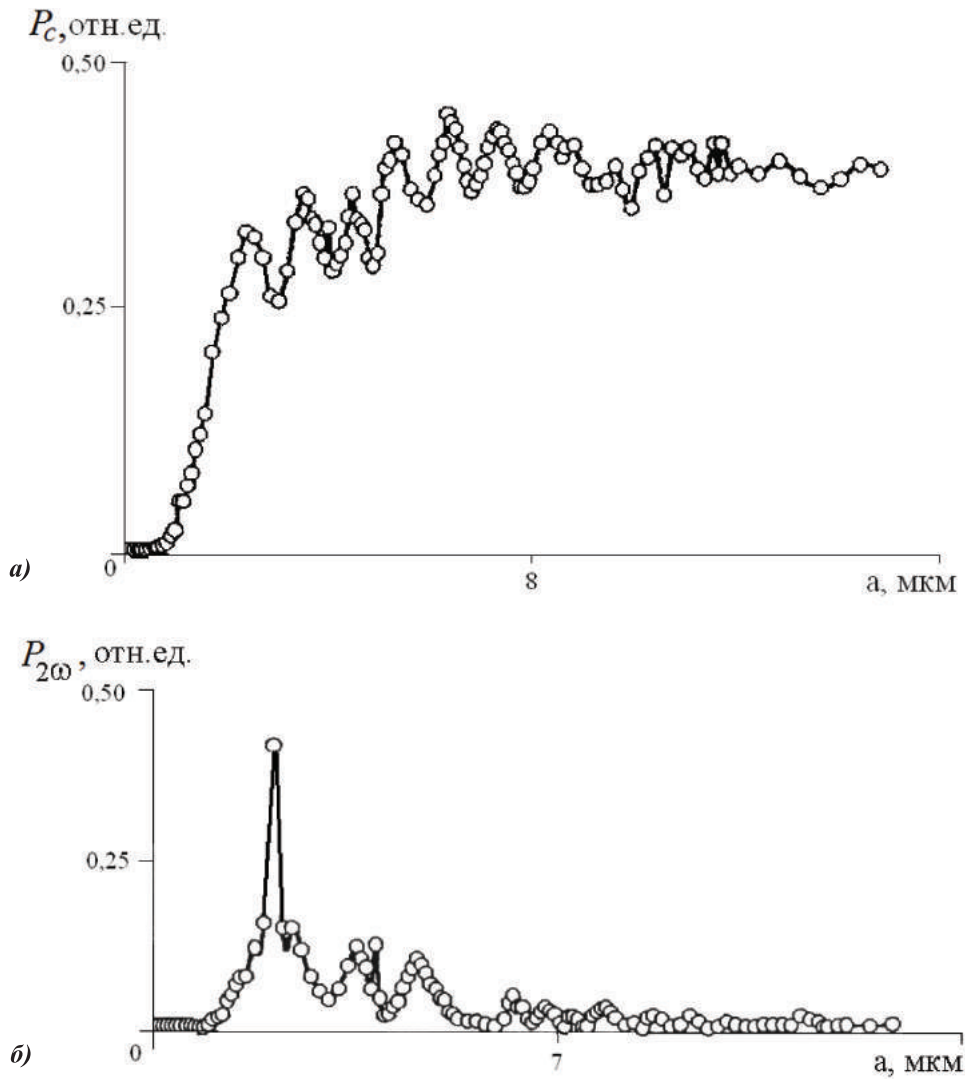


Рисунок 3. Зависимости постоянной составляющей оптического сигнала P_c (а) и второй гармоники оптического сигнала $P_{2\omega}$ от амплитуды колебаний (б)

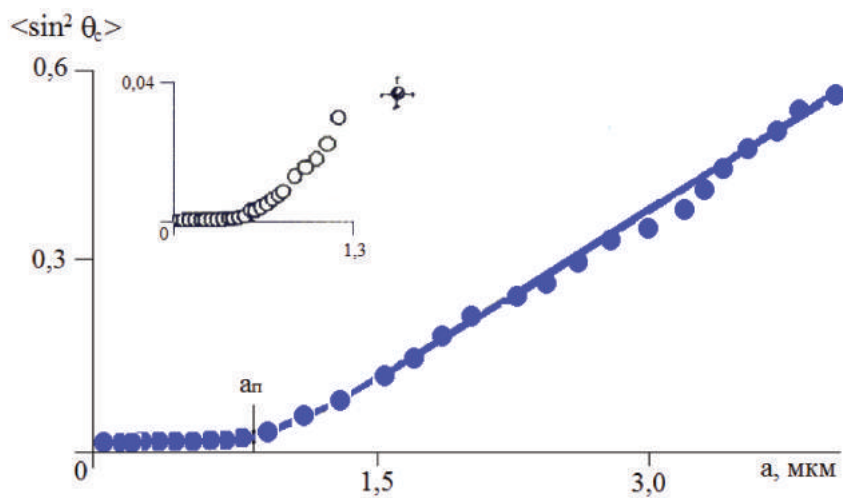


Рисунок 4. Зависимость значения среднего квадрата синуса угла наклона директора $\langle \sin^2 \theta_c \rangle$ от амплитуды вибрации

Кроме того, экспериментально обнаружено, что акустооптический эффект, предлагаемый для рассматриваемого метода определения вибраций, в области частот от 20 Гц до 20 кГц не зависит от частоты звуковой волны, в интервале от 18 °С до 45 °С — от температуры, а также в диапазоне от 20 до 125 мкм — от толщины ЖК-слоя [11, 12, 14]. Представленные результаты дают довольно широкие возможности использования нашего метода.

Вывод

Подводя итог, в заключение необходимо отметить следующее. В статье описан метод индикации вибрации, основанный на акустооптическом эффекте в нематиках. В данной

Список литературы

1. Вибрации в технике: справочник: В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1981. Т. 5. Измерения и испытания / Под ред. М.Д. Генкина. 1981. 496 с.
2. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. 320 с.
3. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 247 с.
4. Сиваков В.П., Микушина В.Н., Степанова Е.Н. Вибрационное диагностирование технического состояния подшипников сушильных цилиндров бумагоделательных машин // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6.
5. Моренко А.И., Тараканов Д.В. Исследование режимов вибрации агрегатов нефтеперекачивающих станций // *Датчики и системы*. 2001. № 3. С. 44–45.
6. Денисова О.А., Абрамишвили Р.Л. Жидкокристаллическая ячейка для индикации контроля и измерения уровня жидких сред // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2017. Т. 13. № 1. С. 98–111.
7. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Релаксация директора при азимутальной неустойчивости жидких кристаллов // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2012. № 1. С. 52–58.
8. Денисова О.А. Распространение ультразвуковых волн в твист — структурах жидких кристаллов // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2011. № 2. С. 62–65.
9. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Резонансное изменение скорости поперечных акустических волн в твист-структурах жидких кристаллов // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2011. № 3. С. 25–29.
10. Денисова О.А. Турбулентный режим течения жидких кристаллов при действии гармонического сдвига // *Научное обозрение*. 2013. № 1. С. 34–36.
11. Леонов В.В., Денисова О.А. Электродинамика сдвигового действия и реализация режима турбулентности в конденсированных средах // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2015. № 2. С. 90–97.
12. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Оптические датчики вибрации на основе жидких кристаллов с гомеотропной ориентацией молекул // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2011. № 5. С. 367–375. URL: http://ogbus.ru/authors/Denisova / Denisova_1.pdf.
13. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Структурные переходы в жидких кристаллах, влияние осциллирующих потоков и электрических полей. Германия, 2012.
14. Денисова О.А. Один из методов экспериментальных исследований жидких кри-

сталлов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 2. С. 107–113.

15. Денисова О.А., Чувывров А.Н. Акустический аналог перехода Фредерикса в быстро осциллирующих потоках жидких кристаллов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2013. № 2 (44). С. 37–41.

References

1. Vibrations in Techniques: Reference-Book: In 6 T. / Ed. by V.N. Chelomei (chairman). Moscow: Mechanical Engineering, 1981. T. 5. Measurements and Tests / Ed. M.D. Genkin. 1981. 496 p.

2. Jaschura A.I. System of Maintenance and Repair of General Industrial Equipment: Reference-Book. Moscow: Izd-vo NTs ENAS, 2006. 320 p.

3. Dimentberg F.M. Bending Vibrations of Rotating Shafts. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1959. 247 p.

4. Sivakov V.P., Mikushina V.N., Stepanova E.N. Vibration Diagnosis of Technical Condition of Bearings of Drying Cylinders of Paper Machines // Modern Problems of Science and Education. 2014. No. 6.

5. Morenko A.I., Tarakanov D.V. Research of Vibration Modes of Aggregates of Oil Pumping Stations // Sensors and Systems. 2001. No. 3. P. 44–45.

6. Denisova O.A., Abramishvili R.L. Liquid Crystal Cells to Indicate the Monitoring and Measuring the Level of Liquid Media // Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2017. T. 13. No. 1. P. 98–111.

7. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Relaxation of the Director under the Azimuthal

Instability of Liquid Crystals // Liquid Crystals and Their Practical Use. 2012. No. 1. P. 52–58.

8. Denisova O.A. Propagation of Ultrasonic Waves in Twist Structures of Liquid Crystals // Liquid Crystals and Their Practical Use. 2011. V. 2. P. 62–65.

9. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Resonant Change in the Velocity of Transverse Acoustic Waves in Twist Structures of Liquid Crystals // Liquid Crystals and Their Practical Use. 2011. No. 3. P. 25–29.

10. Denisova O.A. Turbulent Regime of the Flow of Liquid Crystals under the Action of a Harmonic Shift // Scientific Review. 2013. No. 1. P. 34–36.

11. Leonov V.V., Denisova O.A. Electrodynamics Shearing Action Mode of Turbulence and Sales in Condensed Matter // Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2015. No. 2. P. 90–97.

12. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Optical Vibration Sensors Based on Liquid Crystal with Homeotropic Orientation Of Molecules // Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business». 2011. No. 5. P.367-375. URL: http://ogbus.ru/authors/Denisova/Denisova_1.pdf.

13. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Structural Transitions in Liquid Crystals, the Influence of Oscillating Flows and Electric Fields. Germany, 2012.

14. Denisova O.A. One of the Methods of Experimental Research Liquid Crystals // Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2013. T. 9. No. 2. P. 107–113.

15. Denisova O.A., Chuvyrov A.N. Acoustic Analogue of the Fréedericksz Transition in Rapidly Oscillating Flows of Liquid Crystals // Liquid Crystals and Their Practical Use. 2013. No. 2 (44). P. 37–41.



Муллагалиев И. Н.
Mullagaliev I. N.
магистрант Физико-
технического института,
ФГБОУ ВО «Бакирский
государственный
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Сафаргалин И. Н.
Safargalin I. N.
аспирант Физико-
технического института,
ФГБОУ ВО «Бакирский
государственный
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация



Салихов Р. Б.
Salikhov R. B.
доктор физико-
математических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
инфокоммуникационных
технологий
и нанoeлектроники,
ФГБОУ ВО «Бакирский
государственный
университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация

УДК 6539.23

ХИМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

К настоящему времени создано большое количество самых разнообразных химических датчиков. Несмотря на это разработка и создание новых датчиков по измерению концентрации химических веществ в атмосфере остается актуальной задачей в связи с усилением загрязнения окружающей среды и возросшими экологическими проблемами. Важными параметрами датчиков считаются чувствительность, воспроизводимость, гистерезис, время реакции, точность, срок службы и стоимость. Перспективными материалами для создания датчиков с такими параметрами являются тонкие пленки органических веществ.

В проведенном исследовании рассматривается роль тонких пленок полиимида, фуллеренов, полианилинов и их производных в создании химических датчиков. Рассмотрены различные виды химических датчиков в виде таких тонкопленочных электронных устройств, как резистор, конденсатор, полевой транзистор. В качестве подложки использовалось стекло с проводящим покрытием из смеси оксидов индия-олова (ИТО). Создание тонких пленок производилось путем вакуумного термического распыления алюминия из вольфрамовой корзины и органических веществ из ячейки Кнудсена. Для получения полимерных пленок также применялось центрифугирование из растворов.

В работе исследованы зависимости тока, проходящего через резистивные структуры на основе тонких пленок фуллеренов и полианилинов, от относительной влажности воздуха, концентрации паров аммиака в воздухе, проведена оценка быстродействия этих структур. Изготовлены емкостные датчики влажности воздуха с полиимидной пленкой в роли диэлектрика. Измерены вольтамперные характеристики полевого транзистора с транспортным слоем из тонкой пленки полианилина при разных значениях влажности воздуха.

Результаты проведенных исследований показали перспективность использования тонких полимерных пленок для создания химических датчиков.

Ключевые слова: фуллерены, полианилины, полиимиды, датчики.

CHEMICAL SENSORS BASED ON THIN POLYMER FILMS

To date, a large number of a variety of chemical sensors have been created. Despite this, the development and creation of new sensors for measuring the concentration of chemicals in the atmosphere remains an urgent task in connection with increased environmental pollution and increased environmental problems. Sensitivity, reproducibility, hysteresis, reaction time, accuracy, lifetime and cost are considered important sensor parameters. Perspective materials for creating sensors with such parameters are thin films of organic substances.

In the study, thin films of polyimide, fullerenes, polyanilines and their derivatives are considered to create chemical sensors. Various types of chemical sensors in the form of such thin-film electronic devices as a resistor, a capacitor, and a field-effect transistor are considered. As a substrate, glass with a conductive coating of a mixture of indium-tin oxides (ITO) was used. The creation of thin films was carried out by vacuum thermal deposition of aluminum from a tungsten basket and organic matter from the Knudsen cell. To obtain polymer films, spin coating from solutions was also used.

The dependence of the current through resistive structures on the basis of thin films of fullerenes and polyanilines on the relative humidity of air, the concentration of ammonia vapor in air and reaction time of these structures are estimated. Capacitive air humidity sensors were made with a polyimide film as a dielectric and their main characteristics were measured. The current-voltage characteristics of a field-effect transistor with a transport layer of a thin film of polyaniline with different values of air humidity are measured.

The results of the studies showed the promise of using thin polymer films to create chemical sensors.

Key words: fullerenes, polyanilines, polyimides, sensors.

Введение

В большинстве современных химических сенсоров используются полупроводниковые и проводящие полимеры, поскольку они дешевле и имеют преимущества в гибкости, размерах и стоимости [1]. Они могут образовывать селективные слои, в которых взаимодействие между анализируемым веществом и полимером приводит к изменению такого физического параметра, как проводимость. Кроме того, они могут быть использованы в устройствах, которые образуют электронные элементы, такие как транзисторы [2]. Большое число статей, посвященных различным применениям таких полимеров, можно разделить на две группы: полимеры в электронных устройствах, с одной стороны [3], и полимеры в химических сенсорах на основе различных механизмов передачи сигнала отклика, с другой стороны [4]. Применение в сенсорах предполагает использование физических изменений, которые происходят в полимерах, подвергающихся воздействиям различных химических веществ на уровне молекулярной и макроскопической структуры полимеров [5–7].

Проводятся исследования новых функциональных наноматериалов и композитов на

основе полианилина. Материалы на основе полианилина, термочувствительных полимеров и полиэлектролитов могут быть чувствительными к изменению pH среды, свету, ионной силе, температуре, потенциалу. Тонкие полимерные пленки в последнее время находят активное применение в самых различных химических сенсорах [8–10].

Технология изготовления датчиков

В работе исследованы тонкие пленки органических материалов — фуллеренов (C₆₀), полианилинов (ПАНИ) и полиимида. На основе тонких пленок были получены многослойные структуры таких электронных устройств, как резистор, конденсатор, транзистор.

В резистивных датчиках в качестве подложки использовалось стекло. На стеклянную пластину сверху были нанесены алюминиевые электроды методом термического распыления в вакуумной камере на установке ВУП-5 толщиной около 400 нм, зазор создавался с помощью теневой маски. Для одних образцов в область зазора между электродами в 200 мкм наносилась пленка полианилина методом центрифугирования из раствора. Полученный слой подвергался термическому отжигу для удаления остатков

растворителя путем нагрева до 150 °С в течение 20–25 мин. Для других образцов в область зазора наносилась пленка фуллерена термическим испарением из ячейки Кнудсена в вакууме. Ячейка Кнудсена представляла собой кварцевую цилиндрическую трубку длиной 25 мм с внутренним диаметром 4 мм, рабочая температура варьировалась в диапазоне 130–380 °С.

В емкостном датчике в качестве подложки была использована стеклянная пластина с контактным слоем ИТО. На нее методом центрифугирования наносили пленку полиимида из раствора. Полученный слой подвергали полимеризации путем нагрева до 150 °С в течение 20–25 мин. Толщина полученной полимерной пленки достигала 3 мкм. Сверху на полимерный слой с помощью маски был нанесен алюминиевый электрод методом термического распыления в вакуумной камере.

Подложкой в транзисторном датчике служила стеклянная пластина с контактным слоем ИТО. На слой ИТО методом центрифугирования наносился слой полиимидной пленки, который использовался в качестве подзатворного диэлектрика. Сверху были нанесены алюминиевые электроды методом термического распыления в вакуумной камере на установке ВУП-5. В область зазора шириной в 100 мкм в одних образцах между электродами наносилась пленка растворимых форм производных ПАНИ методом центрифугирования из раствора, в других — пленки ПАНИ наносились методом термического распыления из ячейки Кнудсена.

В экспериментах для измерений использовались: блоки питания MASTECH, DC POWER SUPPLY HY3005D-2, вольтметр универсальный В7-21 в качестве амперметра, мультиметр APPA107N для измерения температуры и емкости, герметичный колпак, цифровой термометр гигрометр RST Q317, толщина тонких полимерных пленок контролировалась на основе анализа АСМ изображений, полученных с помощью «Наноскан 3D».

Резистивные датчики

На зазор алюминиевых контактов, находящихся на стекле методом центрифугирования

наносилась пленка полианилина. В других образцах осаждалась пленка фуллерена методом термического распыления из ячейки Кнудсена (рисунок 1). Толщина полученных полимерных пленок достигала 300 нм.

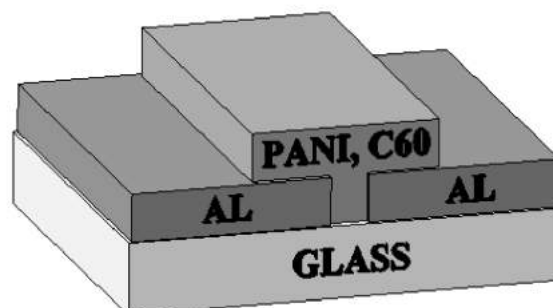


Рисунок 1. Структурная схема резистивного датчика

По результатам измерений были построены графики зависимости тока от влияния внешней среды. На рисунке 2 представлены зависимости тока от влажности и времени при резком уменьшении влажности воздуха для резистивных датчиков на основе тонких пленок полианилина и фуллерена С60. Полученные на основе С60 резистивные датчики при изменении влажности имеют большие значения тока по сравнению с датчиками на пленках ПАНИ (рисунок 2, а). Результаты по определению быстродействия датчиков относительной влажности воздуха приведены на рисунке 2, б. Время срабатывания датчиков составляет не более 2–3 с, что является хорошим показателем для электронных гигрометров.

Зависимости тока от времени пребывания образца датчика на основе тонкой пленки ПАНИ в среде с парами аммиака и времени при резком уменьшении концентрации паров NH₃ показаны на рисунке 3. Относительно медленное нарастание сигнала (рисунок 3, а) связано с установлением равновесной концентрации паров NH₃ в испытательной камере после внесения в нее небольшой капли аммиачного раствора. Быстродействие датчиков паров NH₃ характеризует кривая на рисунке 3, б, и оно составляет 2–3 с. Пары аммиака не оказали влияния на проводимость пленок С60.

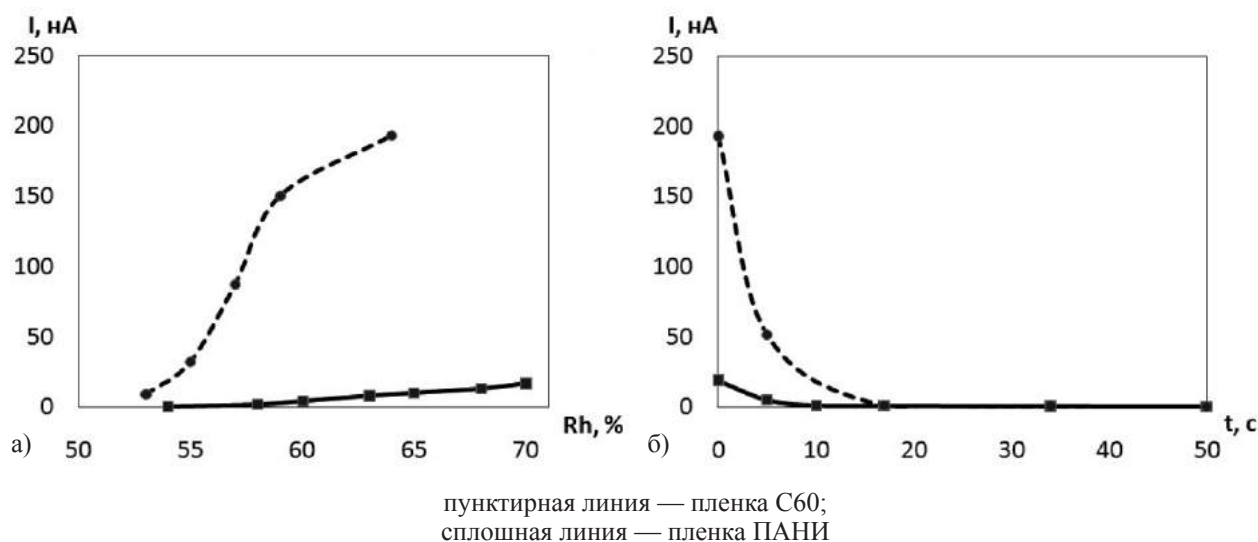


Рисунок 2. Характеристики резистивных датчиков: зависимости тока от влажности воздуха (а), зависимости тока от времени при резком уменьшении влажности воздуха (б)

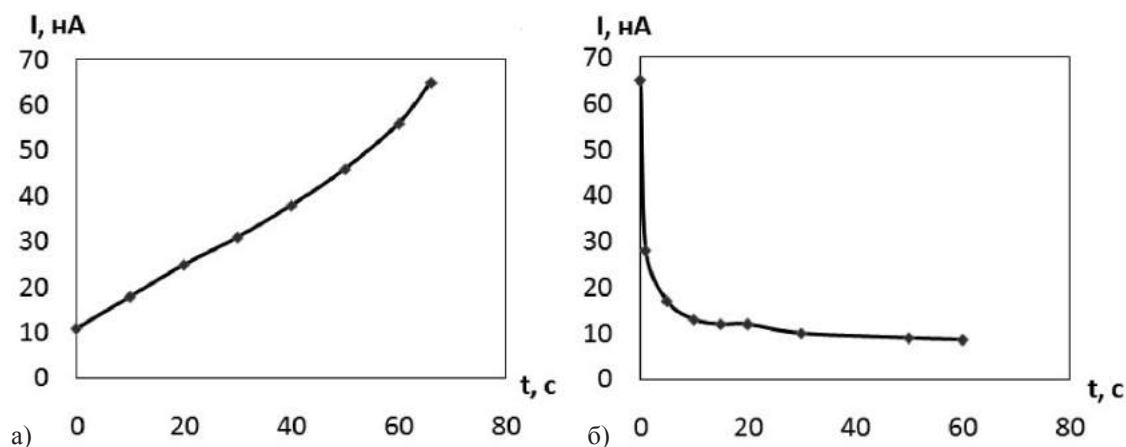


Рисунок 3. Характеристики резистивного датчика на основе пленки ПАНИ: зависимость тока от времени нахождения в среде с парами NH_3 (а), зависимость тока от времени при резком уменьшении концентрации паров NH_3 (б)

Емкостные датчики

На основе полиимида был создан тонкопленочный конденсатор. В качестве электродов были использованы слои алюминия и ИТО (рисунок 4, а). Увеличение емкости структуры объясняется диффузией молекул воды через тонкий слой металлического электрода в микропоры на поверхности полиимидной пленки. Полиимидная пленка обладает свойством обратимой сорбции молекул воды. При попадании паров воды в полиимидную пленку её диэлектрическая проницаемость возрастает, что приводит к увеличению емкости полученной конденсаторной структуры.

Была исследована зависимость емкости полученных структур от относительной влажности воздуха (рисунок 4, б). Крутизна

характеристик в полученных нами структурах изменялась в пределах 1,0–1,2 пФ/%. При уменьшении влажности практически отсутствовал гистерезис, величина которого не превышала значений 1–2 %.

Транзисторные датчики

Для изготовления транзисторов были использованы стеклянные пластины с омическим контактом в виде ИТО. В качестве подзатворного диэлектрика наносилась полиимидная пленка, для контактов: сток и исток осаждались пленки алюминия, активным транспортным слоем являлась пленка полианилина (рисунок 5).

Получены и проанализированы выходные и передаточные вольтамперные характеристики при 50 % и 65 % влажности (рисунок 6). Видно, что величина тока зависит от

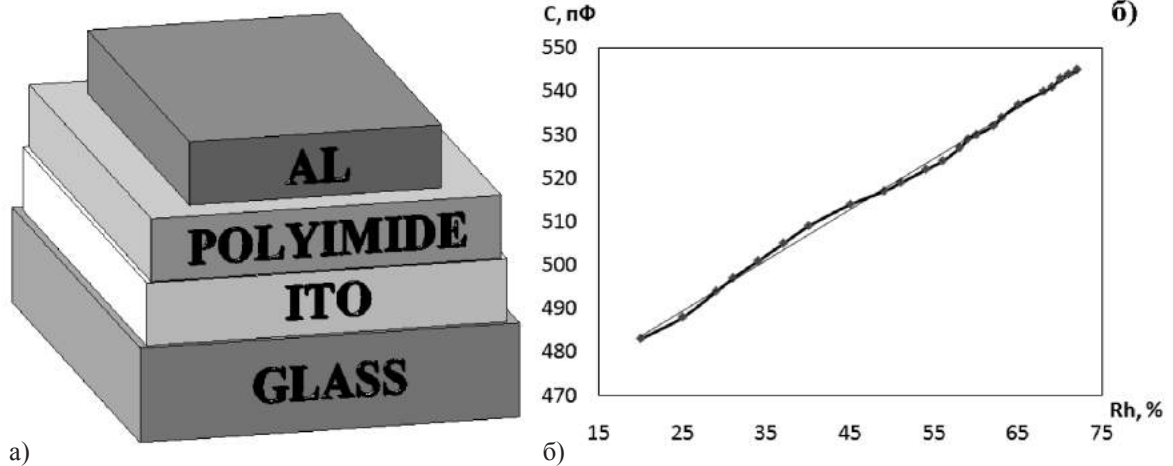


Рисунок 4. Тонкопленочный конденсатор: структурная схема датчика влажности (а), зависимость емкости от влажности (б)

относительной влажности воздуха. Зависимости имеют нелинейный характер во всем диапазоне приложенных к затвору напряжений. Электрические характеристики полученных структур были измерены при комнатной температуре по схеме с общим истоком. Для транзистора на основе пленок полианилина ток стока увеличивается при отрицательном потенциале на затворе. Следует отметить, что отсутствует типичный для большинства полевых транзисторов участок насыщения тока. Измеренные зависимости характерны для нормально открытого полевого транзистора, т.е. канал проводимости формируется изначально в процессе изготовления образца.

Полученные транзисторные структуры можно использовать в качестве датчиков

относительной влажности воздуха. В транзисторном сенсоре крутизна выходных характеристик меняется от влажности. Кроме того, регулируя напряжение на затворе, можно управлять чувствительностью датчика.

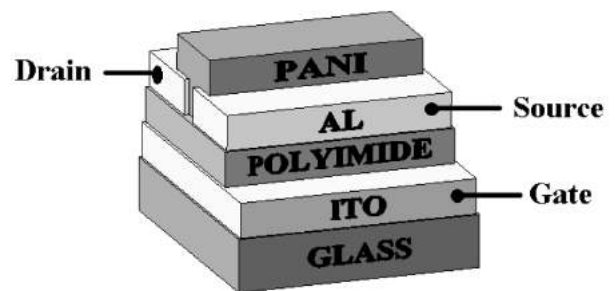
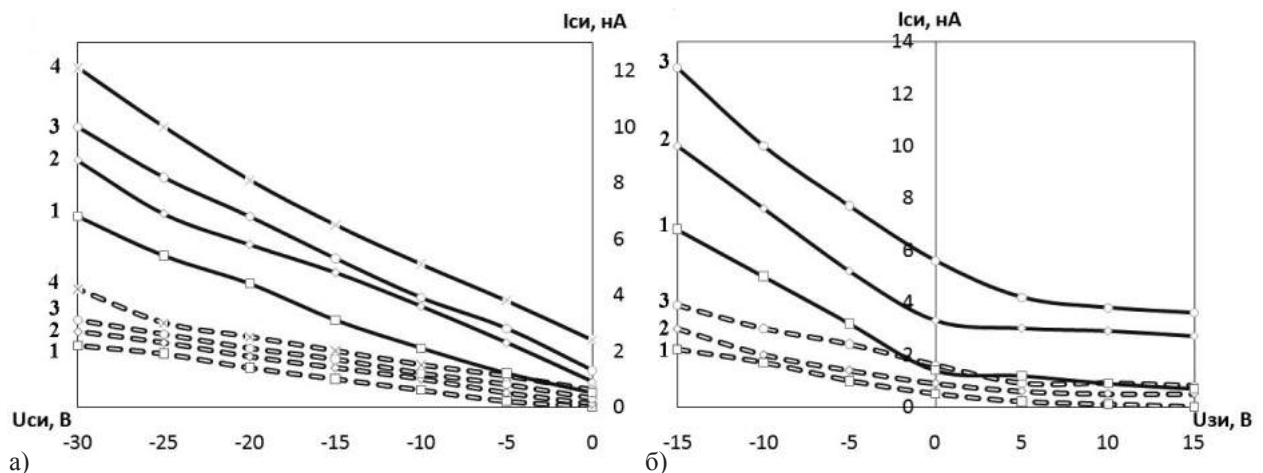


Рисунок 5. Структурная схема транзистора



пунктирные линии — влажность 50 %; сплошные линии — влажность 65 %
 а) выходные характеристики: 1 — $U_{зи} = 0В$, 2 — $U_{зи} = -5В$, 3 — $U_{зи} = -10В$, 4 — $U_{зи} = -15В$;
 б) передаточные характеристики: 1 — $U_{си} = 5В$, 2 — $U_{си} = 10В$, 3 — $U_{си} = 15В$

Рисунок 6. Транзистор с транспортным слоем ПАНИ

Выводы

Полученные на основе С60 резистивные датчики при изменении влажности имеют большее увеличение тока по сравнению с ПАНИ. Однако при этом пленки С60 не реагируют на присутствие в окружающей среде паров NH_3 . К достоинствам полученных абсорбционных датчиков NH_3 на основе пленок полианилина следует отнести малый гистерезис.

К положительным характеристикам полученных абсорбционных датчиков влажности

воздуха на основе полиимидных пленок следует отнести линейную зависимость емкости от относительной влажности, малый гистерезис (не более 1–2 %), высокую крутизну характеристик и небольшую постоянную времени.

Полианилиновый полевой транзистор, на характеристики которого влияет влажность, увеличивая величину выходного тока, протекающего через транспортный канал, можно использовать в качестве датчика относительной влажности воздуха.

Список литературы / References

1. Hangarter C.M., Bangar M., Mulchandani A., Myung N.V. Conducting Polymer Nanowires for Chemiresistive and FET-Based Bio/Chemical Sensors // *J. Mater. Chem.* 2010. V. 20. No. 16. P. 3131–3140.
2. Dimitrakopoulos C.D., Malenfant P.R.L. Organic Thin Film Transistors for Large Area Electronics // *Adv. Mater.* 2002. V. 14. No. 2. P. 99–117.
3. Angelopoulos M. Conducting Polymers in Microelectronics // *IBM J. Res. Dev.* 2001. V. 45. No. 1. P. 57–75.
4. Bailey R.A., Persaud K.C. Sensing Volatile Chemicals using Conducting Polymer Arrays // *Polymer Sensors and Actuators* / Y. Osada, D.E. De Rossi (Eds). Berlin, Springer. 2000. P. 149–181.
5. Lachinov A.N., Salikhov R.B., Bunakov A.A., Tameev A.R. Charge Carriers Generation in Thin Polymer Films by Weak External Influences // *Nonlinear Optics Quantum Optics.* 2005. V. 32. No. 1–3. P. 13–20.
6. Gadiev R.M., Lachinov A.N., Rakhmееv R.G., Kornilov V.M., Salikhov R.B.,

Yusupov A.R. The Conducting Polymer/Polymer Interface // *Applied Physics Letters.* 2011. V. 98. No. 17. P. 173305.

7. Tameev A.R., Vannikov A.V., Rakhmееv R.G., Lachinov A.N., Nikitenko V.R., Salikhov R.B., Bunakov A.A. Effect of Excessive Pressure on the Drift Mobility of Charge Carriers in Poly(Diphenylene Phthalide) Films // *Physics of the Solid State.* 2011. V. 53. No. 1. P. 195–200.

8. Salikhov R.B., Yusupov A.R., Lachinov A.N., Rakhmееv R.G., Gadiev R.M., Salazkin S.N. Chemical Sensors Based on Nano-Polymer Films // *Measurement Techniques.* 2009. V. 52. No. 4. P. 427–431.

9. Gadiev R.M., Lachinov A.N., Salikhov R.B., Zhdanov E.R. Smart Polymers as Basic for Bio-, Chemical and Physical Sensors // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security* / Edited by J. Bonca, S. Kruchinin. 2014. P. 243–256.

10. Salikhov R.B., Lachinov A.N. Polymer Thin Film Chemical Sensors // *Advances in Chemical Sensors* / Ed. by Wen Wang. Rijeka. 2012. P. 215–234.

ОБ АВТОРАХ

Абрамишвили Роман Лаврентьевич

аспирант кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: abramishvili.rl@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Алиев Ариф Мухтар оглы

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системная инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, e-mail: arifma_az@yahoo.com, г. Баку, Азербайджанская Республика

Алиев Ибрагим Мусеиб оглы

соискатель кафедры «Управление и системная инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, e-mail: arifma_az@yahoo.com, г. Баку, Азербайджанская Республика

Андрианов Артур Валерьевич

инженер-конструктор III категории, Акционерное общество «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», e-mail: otдел24d@nkbmius.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Бородин Олег Александрович

аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Тольятти, Российская Федерация

Быстров Александр Ильич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела фундаментальных исследований, ГУП «Институт нефтехимпереработки Республики Башкортостан», e-mail: zhuravliova80@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Денисов Владимир Андреевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, г. Тольятти, Российская Федерация

Денисова Ольга Аркадьевна

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: denisovaolga@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Доломатов Михаил Юрьевич

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Технология нефти и газа», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры «Физическая электроника и нанофизика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: dolomatov@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Ерохин Вячеслав Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационное и радиоэлектронное оборудование», Иркутский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», e-mail: uop-ugaes@mail.ru, г. Иркутск, Российская Федерация

Журавлева Надежда Александровна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Экономическая информатика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zhuravliova80@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Зикий Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» Института компьютерных технологий и информационной безопасности, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: zikiy50@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Зламан Павел Николаевич

ведущий инженер-конструктор Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: otel24d@nkbmius.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Иванов Владислав Викторович

аспирант кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Калий Валерий Алексеевич

кандидат технических наук, главный конструктор ОКБ АО «Уфимское агрегатное производственное объединение», e-mail: avv_775@list.ru, г. Москва, Российская Федерация

Караваев Артем Александрович

инженер-технолог АО «Уфимское агрегатное производственное объединение», e-mail: avv_775@list.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Коньков Александр Николаевич

начальник сектора Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Кузьмин Игорь Леонидович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: samattukaev@mail.ru, г. Казань, Российская Федерация

Кутуева Алина Варисовна

аспирант кафедры «Технология нефти и газа», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», старший преподаватель кафедры «Пожарная безопасность», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zhuravliova80@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Макаров Сергей Владиславович

кандидат технических наук, технический директор ООО «СТРОКАТ», г. Тольятти, Российская Федерация

Мешков Иван Константинович

кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Мешкова Алина Газимьяновна

аспирант, инженер кафедры телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Муллагалиев Ильнур Наилевич

магистрант Физико-технического института, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: salikhovrb@ya.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Новиков Сергей Иванович

ведущий специалист службы электрических режимов, филиал Акционерного общества «Системный оператор Единой энергетической системы», Региональное диспетчерское управление Татарстана, e-mail: samattukaev@mail.ru, г. Казань, Российская Федерация

Полихач Евгений Александрович

кандидат технических наук, инженер-конструктор АО «Уфимское агрегатное производственное объединение», e-mail: avv_775@list.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Салихов Ренат Байзитович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий и наноэлектроники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: salikhovrb@ya.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Сафаргалин Идрис Нарисович

аспирант Физико-технического института, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: salikhovrb@ya.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Сироткин Сергей Леонидович

кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Скварский Павел Анатольевич

ведущий конструктор ОКБ АО «Уфимское агрегатное производственное объединение», e-mail: avv_775@list.ru, г. Москва, Российская Федерация

Султанов Альберт Ханович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mik.ivan@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Третьякова Марина Николаевна

кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», e-mail: M.Tretyakova@tltsu.ru, г. Тольятти, Российская Федерация

Тукаев Самат Маратович

студент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: samattukaev@mail.ru, г. Казань, Российская Федерация

Харисова Зарина Ирековна

аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zarinaid@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Хузяшев Рустэм Газизович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», e-mail: samattukaev@mail.ru, г. Казань, Российская Федерация

Чатурова Дарья Ивановна

магистрант кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: chaturovadi@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Яхиббаева Лариса Мухамедовна

кандидат филологических наук, доцент кафедры «Иностранные языки», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: chaturovadi@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Abramishvili Roman L.

Post-Graduate Student of Management and Service in the Technical Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: abramishvili.rl@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Aliyev Arif M.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Control and System Engineering Department, Azerbaijan State Oil and Industry University, e-mail: arifma_az@yahoo.com, Baku, Azerbaijan Republic

Aliyev Ibrahim M.

Applicant of Control and System Engineering Department, Azerbaijan State Oil and Industry University, e-mail: arifma_az@yahoo.com, Baku, Azerbaijan Republic

Andrianov Artur V.

Design Engineer of III Category, Joint Stock Company «Taganrog Scientific-Research Institute of Communication», e-mail: otde124d@nkbmius.ru, Taganrog, Russian Federation

Borodin Oleg A.

Post-graduate Student Department of «Power Supply and Electrical Engineering», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Togliatti State University», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Togliatti, Russian Federation

Bystrov Aleksandr I.

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher of Basic Research Department, State Unitary Enterprise «Institute of Petrochemical Processing of the Republic of Bashkortostan», e-mail: zhuravliova80@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Chaturova Dar'ja I.

Undergraduate Student of Electrical Engineering and Equipment of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: chaturovadi@mail.ru, Ufa, Russia Federation

Denisov Vladimir A.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Department «Power Supply and Electrical Engineering», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Togliatti State University», e-mail: ale.bochkaryov@gmail.com, Togliatti, Russian Federation

Denisova Olga A.

Dr. Sci. Phys.-Math., Associate Professor, Professor of Physics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Dolomatov Michail Yu.

Dr. Sci. Chem., Professor, Professor of Oil and Gas Technology Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Professor of Physical Electronics and Nanophysics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: dolomatov@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Erokhin Vyacheslav V.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Aviation and Radio Electronic Equipment Department, Irkutsk Branch of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Moscow State Technical University of Civil Aviation», e-mail: uop-ugaes@mail.ru, Irkutsk, Russian Federation

Ivanov Vladislav V.

Post-Graduate Student of Telecommunication Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Kaliy Valeriy A.

Cand. Sci. Tech., Chief Designer of OKB JSC «Ufa Aggregate Production Association»,
e-mail: avv_775@list.ru, Moscow, Russian Federation

Karavayev Artem A.

Engineer-Technologist of JSC «Ufa Aggregate Production Association», e-mail: avv_775@list.ru,
Ufa, Russian Federation

Kharisova Zarina I.

Post-Graduate Student of Information and Measuring Techniques Department, Federal State
Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University»,
e-mail: zarinaid@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Khuzyashev Rustem G.

Cand. Sci. Phys.-Math., Assistant Professor of Electric Power Systems and Networks Department,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power
Engineering University», e-mail: samattukaev@mail.ru, Kazan, Russian Federation

Konkov Aleksandr N.

Head of Sector «Scientific Design Bureau Modeling and Control Systems», Federal State
Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University»,
e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Taganrog, Russian Federation

Kutueva Alina V.

Post-Graduate Student of Oil and Gas Technology Department, Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Senior Lecturer
of Fire Safety Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Ufa State Aviation Technical University», e-mail: zhuravliova80@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Kuzmin Igor L.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Relay Protection and Automation of Electric Power Systems
Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State
Power Engineering University», e-mail: samattukaev@mail.ru, Kazan, Russian Federation

Makarov Sergey V.

Cand. Sci. Tech., Technical Director of STROKAT LLC., Togliatti, Russian Federation

Meshkov Ivan K.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Telecommunication Systems Department, Federal State
Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University»,
e-mail: mik.ivan@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Meshkova Alina G.

Post-Graduate Student, Engineer of Telecommunication Systems Department, Federal State
Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University»,
e-mail: mik.ivan@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Mullagaliev Inur N.

Graduate Student of Physical-Technical Institute, Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: salikhovrb@ya.ru, Ufa, Russian Federation

Novikov Sergey I.

Leading Specialist of the Service of Electric Regimes, Branch of the Joint-stock Company «System Operator
of the Unified Energy System», Regional Dispatching Office of Tatarstan, e-mail: samattukaev@mail.ru,
Kazan, Russian Federation

Polikhach Yevgeniy A.

Cand. Sci. Tech., Engineer-Designer of JSC «Ufa Aggregate Production Association»,
e-mail: avv_775@list.ru, Ufa, Russian Federation

Safargalin Idris N.

Post-Graduate Student of Physical-Technical Institute, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: salikhovrb@ya.ru, Ufa, Russian Federation

Salikhov Renat B.

Dr. Sci. Phys.-Math., Professor, Head of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: salikhovrb@ya.ru, Ufa, Russian Federation

Sirotkin Sergey L.

Cand. Sci. Tech., Leading Design Engineer of Scientific Design Bureau Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: ssirotkin1950@mail.ru, Taganrog, Russian Federation

Skvarskiy Pavel A.

Leading Designer of OKB JSC «Ufa Aggregate Production Association», e-mail: avv_775@list.ru, Moscow, Russian Federation

Sultanov Albert Kh.

Dr. Sci. Tech., Prof., Head of Telecommunication Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: mik.ivan@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Tretyakova Marina N.

Cand. Sci. Ped., Assistant Professor of «Power Supply and Electrical Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Togliatti State University», e-mail: M.Tretyakova@tltso.ru, Togliatti, Russian Federation

Tukaev Samat M.

Student of Electric Power Systems and Networks Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», e-mail: samattukaev@mail.ru, Kazan, Russian Federation

Yakhibbaeva Larisa M.

Cand. Sci. Philol., Assistant Professor of the Foreign Languages Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: chaturvadi@mail.ru, Ufa, Russia Federation

Zhuravleva Nadezhda A.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Economic Informatics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: zhuravliova80@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Zikiy Anatoliy N.

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher, Assistant Professor of Information Security of Telecommunication Systems Department, Institute of Computer Technologies and Information Security, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: zikiy50@mail.ru, Taganrog, Russian Federation

Zlaman Pavel N.

Leading Design Engineer of Scientific Design Bureau of Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, Taganrog, Russian Federation

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля — 2,5 см с каждой стороны; шрифт — Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал — полуторный; ссылки на литературу — в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «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 («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц. Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.

Requirements for the materials, provided for publication in the journal:

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields — 2.5 cm on each side; font — Times New Roman, font size — 14, line spacing — one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC — in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSEI HE «USUES» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings — at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

Memo to authors

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («» or «»).

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers. References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.