

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



УГНТУ

№ 3, т. 12, 2016

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)


Члены редакционной коллегии:


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


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


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


В.Г. Крымский — д-р техн. 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) 

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

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


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


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


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


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)


М.А. Ураксеев — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный 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) 


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


П.И. Чередниченко — д-р техн. наук, проф. Черниговского государственного технологического университета (г. Чернигов, Украина) 

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

Р.Б. Яруллин — 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) 

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

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: Н.Г. Трофимова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

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

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2016

Адрес редакции: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1
тел.: (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

Подписано в печать 23.09.2016 г. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,9. Тираж 1000 экз. Заказ № 215.

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

Материалы приводятся в авторской редакции.

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

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 3, v. 12, 2016

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)



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



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



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



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



P.I. Cherednichenko — Dr. Sci.Tech., Prof. of «Chernigov State Technological University» (Chernigov, Ukraine)



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 «Ufa State Petroleum Technological 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)



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



Assistant editor: A.A. Mukhamadiev
Technical editor: N.G. Trofimova

The journal is included in the Russian Index of Scientific Citig (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, 2016

Address of Editors office: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Str. 1.

Tel. (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Signed for printing 23.09.2016 г. Format 60×84 1/8 . Offset printing. 13,9 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order № 215.

The text of journal «Electrical and data processing facilities and systems» may be quoted with written permission of the publisher only. Content is published as provided by authors.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Электротехнические комплексы и системы

<i>Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Конев А.А.</i> Исследование режимов работы дросселя резонансной испытательной установки.....	5
<i>Пентегов И.В., Рымар С.В.</i> Практическое применение метода тепловых источников при анализе тепловых процессов в электротехнических системах.....	11
<i>Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Юсупов Р.З.</i> Пути повышения эффективности блокировки защиты минимального напряжения от токовой защиты ввода.....	18
<i>Диденко Е.Е., Мещеряков В.Н.</i> Управление электроприводом петледержателя при входе полосы в межклетевой промежуток чистой группы стана горячей прокатки.....	26
<i>Андреанов А.В., Зикий А.Н., Зламан П.Н.</i> Моделирование и экспериментальное исследование микрополоскового фильтра на полуволновых резонаторах.....	32
<i>Яруллин Р.Б., Мулюков А.Р.</i> Автоматический вибратор частотно-регулируемого асинхронного электропривода вибромашины с вертикальной осью вращения дебалансов.....	36

Информационные комплексы и системы

<i>Воронков Г.С., Кузнецов И.В.</i> Подход к концепции построения низкоскоростных OFDM-модемов для энергодефицитных систем связи.....	44
<i>Плёткин А.П.</i> Проблема защищенности процесса синхронизации от несанкционированного доступа в системе квантового распределения ключа.....	50
<i>Артюшенко В.М., Воловач В.И.</i> Определение вероятностей обнаружения движущихся объектов при постоянных и изменяющихся условиях обнаружения <i>Artyushenko V.M., Volovach V.I.</i> Determination of probabilities of detection of objects moving at constant and varying conditions of detection.....	57
<i>Зайнуллин А.Р.</i> Исследование статистики распределения перекрестных помех в многожильных волокнах.....	64

Метрология и информационно-измерительные устройства

<i>Сироткин С.Л., Коньков А.Н.</i> Повышение помехоустойчивости приема время-интервальных кодов.....	70
<i>Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г.</i> Сканирующий оптико-электронный преобразователь температуры.....	75
<i>Федосов А.В., Мизгирева В.В., Щербакова Э.Д., Янтирякова А.Р.</i> Особенности применения ультразвукового контроля для экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов.....	81
<i>Петрова И.Ю., Ураксеев М.А., Николаев А.В.</i> Информационно-измерительная и управляющая система контроля стойкости режущего инструмента для станков с ЧПУ.....	87
<i>Абдрахманов В.Х., Важаев К.В., Салихов Р.Б.</i> Информационно-измерительная система дистанционного контроля параметров микроклимата.....	91

Нанoeлектроника и квантовые информационные системы

<i>Долматов М.Ю., Паймурзина Н.Х., Ковалева Э.А.</i> Полуэмпирическая оценка потенциалов ионизации молекул полициклических органических полупроводников.....	100
--	-----

Об авторах

CONTENT

Electrical facilities and systems

<i>Konesev S.G., Muhametshin A.V., Konev A.A.</i> Modelling modes inductor resonance test set.....	5
<i>Pentegov I.V., Rymar S.V.</i> Practical application of the heat sources method to the analysis of thermal processes in electrotechnical systems.....	11
<i>Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Yusupov R.Z.</i> Improving the efficiency of lock protection minimum voltage by overcurrent relay protection.....	18
<i>Didenko E.E., Mecherykov V.N.</i> Control of the electric drive of looper at the strip entrance to the gap between two stand of finishing group of the hot rolling mill.....	26
<i>Andrianov A.V., Zikiy A.N., Zlaman P.N.</i> Modeling and experimental study of microstrip filter on half-wave resonators.....	32
<i>Yarullin R.B., Muljukov A.R.</i> Automatic vibrators for frequency-controlled asynchronous electric vibrators with vertical rotation axis of the unbalance.....	36

Data processing facilities and systems

<i>Voronkov G.S., Kuznetsov I.V.</i> Low-speed OFDM-modems for low power consuming telecommunication systems building concepts.....	44
<i>Pljonkin A.P.</i> Protection problem of synchronization from unauthorised access in quantum key distribution system.....	50
<i>Artyushenko V.M., Volovach V.I.</i> Determination of probabilities of detection of objects moving at constant and varying conditions of detection.....	57
<i>Zainullin A.R.</i> Distribution statistics studing of crosstalk in multicore fibers.....	64

Metrology and information-measuring devices

<i>Sirotkin S.L., Konkov A.N.</i> The increase of immunity of receiving time-interval codes.....	70
<i>Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G.</i> Scanning temperature optical-to-electrical converter.....	75
<i>Fedosov A.V., Mizgireva V.V., Shcherbakova E.D., Yantiryakova A.R.</i> Features of application of ultrasonic testing for examination of industrial safety of hazardous production facilities.....	81
<i>Petrova I.Yu., Urakseev M.A., Nikolaev A.V.</i> Information-measuring and operating system of control of stability of cutting tools for CNC machines.....	87
<i>Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B.</i> Information-measuring system of remote control of microclimate.....	91

Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Dolomatov M.Yu., Paymurzina N.Kh., Kovaleva E.A.</i> Semiempirical efficiency of polycyclic organic semiconductors molecules ionization potential.....	100
---	-----

About the authors



Конесев С. Г.
Konesev S. G.

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



Мухаметшин А. В.
Muhametshin A. V.

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



Конев А. А.
Konev A. A.

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

УДК 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДРОССЕЛЯ РЕЗОНАНСНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрены вопросы, связанные с оптимизацией массогабаритных показателей дросселя резонансной испытательной установки. В большей степени массу высоковольтной резонансной испытательной установки определяют электромагнитные компоненты, входящие в её состав: высокопотенциальный трансформатор и дроссель в первичной цепи. На основе расчета продолжительности проведения испытаний, проведенного на базе экспериментальных данных, показано, что резонансная испытательная установка при производстве испытаний изоляции электрооборудования функционирует в повторно-кратковременном режиме. Электромагнитные компоненты, рассчитанные для различных режимов работы испытательных установок (продолжительный, повторно-кратковременный), будут различаться по массогабаритным показателям. Произведен расчет дросселя для различных режимов работы, а также компьютерное моделирование в программном комплексе ELCUT 6.0. По результатам компьютерного моделирования получены данные о нагреве исследуемых дросселей (допустимая температура нагрева изоляции ограничена её нагревостойкостью), проведен анализ влияния температуры на омическое сопротивление обмотки дросселя, влияющее на добротность первичного контура резонансной испытательной установки. Адекватность разработанных моделей подтверждена сравнением данных, полученных в результате компьютерного моделирования, с данными, полученными в ходе проведения натурального испытания на лабораторном образце дросселя. Расхождение результатов не превышает 6 %, что позволяет сделать заключение о высокой степени адекватности разработанных моделей. Получены данные о массогабаритных показателях моделей дросселей, рассчитанных на различные режимы работы, проведено их сравнение. Сделан вывод, что дроссель, рассчитанный по результатам компьютерного моделирования, работающий в повторно-кратковременном режиме, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым нормативно-технической документацией, и имеет лучшие массогабаритные показатели, при этом влияние нагрева на добротность резонансного контура резонансной испытательной установки находится в приемлемых пределах.

Для решения задачи при компьютерном моделировании использован программный пакет ELCUT 6.0, для подтверждения результатов моделирования — термограммы лабораторных образцов в программе Smart View 3.1 тепловизора типа Fluke Ti32.

Ключевые слова: испытательная установка, емкость объекта, резонанс, высоковольтные испытания, моделирование, техника высоких напряжений, нагревостойкость, электрические аппараты высокого напряжения, изоляция, дроссель.

MODELLING MODES INDUCTOR RESONANCE TEST SET

The problems associated with the optimization of weight and size of the resonance test rig choke. The more high-mass resonance test rig determine the electromagnetic components included in its composition: high-potential transformer and inductor in the primary circuit. On the basis of the calculation of the duration of the tests conducted on the basis of experimental data shows that the resonance test rig in the production of electrical insulation testing operates in intermittent mode. Electromagnetic components designed for different test rigs operating modes (continuous, intermittent) will vary in weight and size parameters. The calculation of the throttle, for different modes of operation and computer modeling in software ELCUT 6.0 complex. According to the results of computer simulation to obtain data on the investigated heating inductors (permissible insulation, the heating temperature is limited to its heat resistance), and analyzed the effect of temperature on the ohmic resistance of the inductor coil, affecting the quality factor of the primary circuit of the resonant test set. The adequacy of the developed model is confirmed by comparing the data obtained as a result of computer modeling with data obtained in the course of carrying out full-scale tests on a laboratory sample throttle. The discrepancy between the results does not exceed 6 %, which allows to conclude that a high degree of adequacy of the developed models. Data on weight and size chokes models designed for different operating modes, their comparison. It was concluded that a throttle calculated on the results of computer simulation of working in intermittent mode, satisfies all the requirements of normative and technical documentation, and has the best weight and overall dimensions, with the effect of heating on the resonant circuit quality factor resonance test equipment is within acceptable limits.

To solve the problem with the computer simulation software package used ELCUT 6.0, to verify the simulation results — thermograms laboratory samples in the program Smart View 3.1 type imager Fluke Ti32.

Key words: test set, the capacity of an object, resonance, high voltage testing, modeling, high voltage technics, heat resistance, high voltage electronics, insulation, inductor.

Особенностью испытаний изоляции высоковольтных электродвигателей является необходимость применения испытательных установок мощностью порядка 3–5 кВ·А. Изоляция высоковольтных электродвигателей является объектом большой емкости (десятки — сотни нанофарад), и мощности стандартных промышленных испытательных установок недостаточно.

Необходимую мощность обеспечивают установки высокого переменного напряжения, работающие в резонансном режиме [1, 2, 3, 4]. В известных технических решениях высоковольтных испытательных установок емкость испытываемого объекта используется для создания резонансного контура. Однако эти установки ограничены в своем применении, поскольку не могут работать с объектами малой емкости и имеют сложную конструкцию испытательного трансформатора.

Авторами предложено техническое решение резонансной испытательной установки (РИУ) [5]. Резонанс в ней создается в первичной цепи высокопотенциального испытательного трансформатора при любой емкости нагрузки посредством использования дросселя с плавной регулировкой индуктивности, что позволяет производить испытание изоляции электрооборудования как большой, так и малой емкости.

Массогабаритные показатели испытательной установки являются параметром, к которому предъявляются высокие требования, и их оптимизация является важной задачей совершенствования оборудования. Одним из самых массивных компонентов РИУ является дроссель, следовательно, уменьшение его массы окажет значительное влияние на показатели всей установки. Выбрать дроссель, обладающий лучшими массогабаритными

показателями, можно опираясь на анализ различных режимов работы РИУ.

Рассмотрим процесс проведения высоковольтных испытаний с помощью РИУ. Общее время испытания изоляции повышенным напряжением переменного тока высоковольтных электродвигателей можно определить по формуле:

$$T_{\text{ИСПЫТАНИЯ}} \approx n \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) = 30 \text{ мин}, \quad (1)$$

где n — количество обмоток статора, $n = 3$;

T_1 — время входа в режим, $T_1 \approx 0,5$ мин;

T_2 — время испытания высоковольтной изоляции по ГОСТ Р 52776-2007 (п. 9.2.1),

$T_2 = 1$ мин;

T_3 — время снятия остаточного заряда,

$T_3 = 6$ мин;

T_4 — время подготовки к проведению высоковольтных испытаний, $T_4 = 3,5$ мин.

Время одного цикла

$$T_{\text{ИСПЫТАНИЯ}} \approx T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = 10 \text{ мин}. \quad (2)$$

После отключения высокого напряжения обмотку испытанной фазы для снятия остаточного заряда необходимо разрядить разрядной штангой через сопротивление не менее 10–50 Ом на киловольт испытательного напряжения [6] с выдержкой времени:

$$T_3 \approx C_{\text{ОБЪЕКТА}} \cdot R_{\text{РАЗРЯДНОЕ}}. \quad (3)$$

Измерения показали, что емкость изоляции высоковольтных электродвигателей, эксплуатируемых на объектах нефтегазовой отрасли, находится в диапазоне от 20 до 150 нФ. Расчетное время снятия остаточного заряда для данных электродвигателей находится в пределах от 0,021 до 0,09 с, поэтому после того, как испытуемый объект разряжен с помощью разрядного устройства, рекомендуется фазу закоротить на корпус электродвигателя на время не менее 3–10 мин [7].

Таким образом, процесс проведения высоковольтных испытаний производится в повторно-кратковременном режиме, и, следовательно, целесообразно рассчитать параметры дросселя для работы именно в этом режиме, так как дроссель, рассчитанный на этот режим, будет обладать лучшими массогабаритными показателями по сравнению с дросселем, рассчитанным на продолжительный режим работы из-за возможности использовать в обмотках дросселя провод меньшего сечения. Кроме того, следует учи-

тывать, что возможность использования дросселя РИУ в различных режимах работы ограничена нагревостойкостью изоляции, требования к которой определены нормативно-технической документацией [8, 9], а также изменением добротности колебательного контура РИУ из-за влияния нагрева на омическое сопротивление обмотки дросселя. Экспериментально установлено, что значение добротности резонансного контура в первичной цепи высокопотенциального испытательного трансформатора РИУ должно быть не меньше 6,9.

Для решения задачи оптимизации массогабаритных показателей дросселя был смоделирован в программе ELCUT 6.0 повторно-кратковременный режим работы дросселя S3 (продолжительность одного цикла принимают равной 10 мин с продолжительностью включения 15 %), также для сравнения показателей был использован лабораторный образец дросселя, работающий в продолжительном режиме работы, S1 (режим работы с постоянной нагрузкой и продолжительностью, достаточной для достижения теплового равновесия) [8].

Исследования содержали следующие этапы:

- исследование работы дросселя в режиме S3 в компьютерной модели;
- исследование работы дросселя в режиме S3 на лабораторном образце;
- сравнение результатов, полученных в ходе лабораторных испытаний и моделирования, подтверждение адекватности разработанной модели;
- расчёт дросселя с наилучшими массогабаритными показателями на основе разработанной модели;
- сравнение массогабаритных показателей дросселей, рассчитанных под различные режимы работы.

В таблицах 1, 2 и на рисунках 1, 2 представлены результаты исследования работы лабораторного образца и компьютерной модели дросселя в повторно-кратковременном режиме работы.

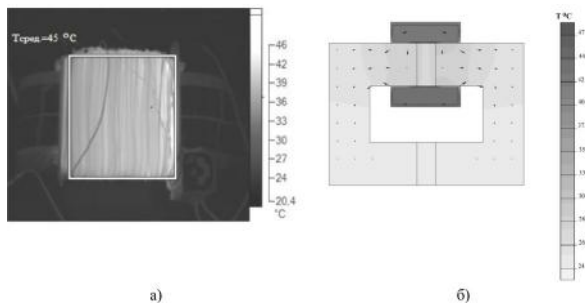
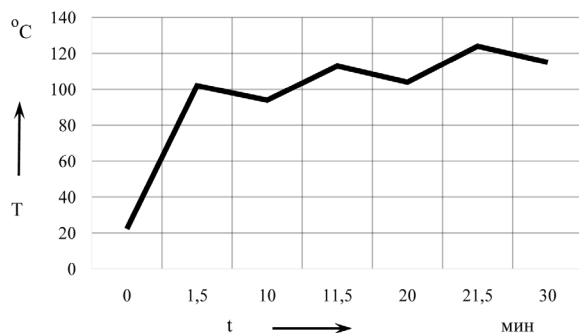
Регистрация температуры при тепловизионном контроле (рисунок 2) осуществлялась по истечении 21,5 мин работы. Значение измеренных температур выводилось на

Таблица 1. Результаты исследования работы дросселя в повторно-кратковременном режиме работы

Время, мин	0	1,5	10,0	11,5	20,0	21,5	30,0
Температура лабораторного образца, °С	22,30	34,00	30,80	40,30	38,40	45,00	41,20
Температура компьютерной модели, °С	22,30	31,00	29,64	39,90	37,80	46,20	41,90

Таблица 2. Результаты исследования влияния температуры на добротность контура в повторно-кратковременном режиме работы

Температура, °С	20,0	34,0	40,3	45,0
Добротность	9,70	9,22	8,98	8,84

**Рисунок 1.** Тепловая характеристика повторно-кратковременного режима работы**Рисунок 2.** Термограммы режима S3 при $t = 21,5$ мин: лабораторный образец (а), компьютерная модель (б)**Рисунок 3.** Тепловая характеристика компьютерной модели при повторно-кратковременном режиме работы

дисплей устройства контроля температуры тепловизора FlukeTi32. Регистрация температуры компьютерной модели также происходила по истечении 21,5 мин работы.

Таблица 3. Результаты исследования работы дросселя с наилучшими массогабаритными показателями в повторно-кратковременном режиме работы

Время, мин	0	1,5	10,0	11,5	20,0	21,5	30,0
Температура компьютерной модели, °С	22,3	102,0	94,0	113,0	104,0	124,0	115,0

Основываясь на данных, полученных в ходе лабораторного испытания, был проведён анализ влияния температуры на добротность резонансного контура. Для анализа были выбраны 4 точки: одна с начальной температурой, а остальные с наибольшими температурами, полученными в течение одного цикла, соответственно $T_1 = 20$ °С, $T_2 = 34$ °С, $T_3 = 40,3$ °С, $T_4 = 45$ °С.

Расхождение данных, полученных в ходе лабораторных испытаний, и данных, полученных в ходе компьютерного моделирования режима работы S3, находится в пределах 6 %, что подтверждает адекватность разработанной модели.

На основе данных, полученных в ходе тепловизионного контроля, можно сделать вывод, что наибольшая температура нагрева дросселя не превышает температуру нагревостойкости для данного класса изоляции (класс изоляции «В» — температура нагревостойкости 130 °С). Следовательно, возможно оптимизировать дроссель путем использования провода меньшего сечения и добиться улучшения его массогабаритных показателей, при этом не выходя за рамки предъявляемых требований.

В таблицах 3, 4 и на рисунках 3 и 4 представлены результаты исследования работы компьютерной модели дросселя с оптимизированными массогабаритными показателями в повторно-кратковременном режиме работы.

Регистрация температуры (рисунок 3) осуществлялась по истечении 21,5 мин работы. Значение измеренных температур выводилось на дисплей компьютера в программе Elcut 6.0.

Основываясь на данных, полученных в ходе моделирования, был проведён анализ влияния температуры на добротность резонансного контура. Для анализа были выбраны

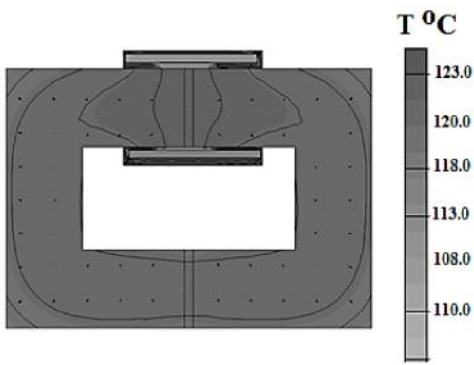


Рисунок 4. Термограмма компьютерной модели дросселя режима S3 при $t = 21,5$ мин

4 точки: одна с начальной температурой, а остальные с наибольшими температурами, полученными в течение одного цикла, соответственно $T_2 = 102$ °C, $T_3 = 113$ °C, $T_4 = 124$ °C.

В таблице 5 приведено сравнение массогабаритных показателей лабораторного образца дросселя, рассчитанного на продолжительный режим работы, с показателями модели дросселей, рассчитанными на повторно-кратковременный режим. Расчётная масса дросселя, работающего в режиме S3 и смоделированного при использовании провода меньшего сечения, меньше массы дросселя с проводом большего сечения на 2,9 %. По сравнению с лабораторным образцом дросселя, рассчитанного на продолжительный режим работы, масса была уменьшена на 11,2 %.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что дроссель, рассчитанный по результатам компьютерного моделирования, работающий в повторно-кратковременном режиме S3, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым нормативно-технической

Таблица 4. Результаты исследования влияния температуры на добротность контура в продолжительном режиме работы

Температура, °C	20	102	113	124
Добротность	9,70	7,37	7,15	6,97

Таблица 5. Сравнение массогабаритных показателей дросселей

Режим работы	Число витков первой катушки	Диаметр провода d , мм	Масса дросселя, кг
S1	300	2,24	23,29
S3	650	1,18	21,30
S3	1486	0,60	20,68

документацией, и имеет лучшие массогабаритные показатели, при этом влияние нагрева на добротность резонансного контура РИУ находится в приемлемых пределах.

Заключение

В процессе исследования создана компьютерная модель, позволяющая исследовать режимы работы дросселя. Данная модель дает возможность анализировать процесс нагрева элементов установки с высокой степенью точности (расхождение с данными практических исследований не превышает 6 %) без температурных испытаний оборудования, негативно сказывающихся на состоянии изоляции и требующих значительных временных затрат. Позволяет дополнить и ускорить процедуру проектирования и разработки элементов электротехнических установок, наглядно иллюстрирует протекающие в электротехнических установках физические процессы.

Список литературы

1. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В. Выбор схемы ВИУ для работы в резонансном режиме // Сб. науч. тр. I Междунар. (IV Всеросс.) науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2013. С. 209–215.
2. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В., Хазиева Р.Т., Стрижев Д.А. Новые схемотехнические решения резонансной высоковольтной испытательной установки // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электроо-

борудования: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2012. С. 178–183.

3. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Оценка влияния параметров изоляции высоковольтного оборудования на режимы работы испытательной установки [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. № 2. Режим доступа: URL: www.science-education.ru/122-20794-07.08.2015.

4. Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. Математическое моделирование резонансных режимов испытательной установки // Вести

высших учебных заведений Черноземья. 2015. № 3. С. 51–55.

5. Пат. 132213 Российская Федерация, МПК G 01 R. Компактная испытательная установка для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением / Конесев С.Г., Мухаметшин А.В. (РФ). 2013108529; заявл. 10.09.13, опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25.

6. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования / Под ред. Ф.Л. Коган. М.: ОРГРЭС, 1998. 493 с.

7. РД-75.200.00-КТН-079-12. Положение о диагностировании, порядке технического освидетельствования и продлении срока службы энергоустановок нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов.

8. ГОСТ Р 52776-2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и рабочие характеристики. М.: Изд-во стандартов, 2008. 7 с.

9. ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2008. — 9 с.

References

1. Konesev S.G., Muhametshin A.V., Kirillov R.V. Vybor skhemy VIU dlya raboty v rezonansnom rezhime // Sb. nauch. tr. I Mezhdunar. (IV Vseross.) nauch.-tekhn. konf. Ufa: UGNTU, 2013. P. 209–215.

2. Konesev S.G., Muhametshin A.V., Hazieva R.T., Strizhev D.A. Novye skhemotekhnicheskie resheniya rezonansnoj vysokovol'tnoj ispytatel'noj ustanovki // Innovacionnye napravleniya razvitiya ehlektroprivoda, ehlektrotekhnologij i ehlektrooborudovaniya: mezhvuz. sb. nauch. tr. Ufa: UGNTU, 2012. P. 178–183.

3. Konesev S.G., Muhametshin A.V. Ocenka vliyaniya parametrov izolyacii vysokovol'tnogo oborudovaniya na rezhimy raboty ispytatel'noj ustanovki [Elektronnyj resurs] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. Elektronnyj nauchnyj zhurnal. 2015. № 2. Rezhim dostupa: www.science-education.ru/122-20794. 07.08.2015.

4. Konesev S.G., Muhametshin A.V. Matematicheskoe modelirovanie rezonansnih rejimov ispytatel'noj ustanovki // Vesti visshih uchebnyh zavedenii Chernozemya. 2015. № 3. P. 51–55.

5. Pat. 132213 Rossijskaya Federaciya, МПК G 01 R. Kompaktnaya ispytatel'naya ustanovka dlya ispytaniya izolyacii ehlektrooborudovaniya povyshennym napryazheniem / Konesev S.G., Muhametshin A.V. (RF). 2013108529; yayavl. 10.09.13, opubl. 10.09.2013. Byul. № 25.

6. Sbornik metodicheskikh posobij po kontrolyu sostoyaniya ehlektrooborudovaniya / Pod red. F.L. Kogan. M.: ORGREHS, 1998. 493 p.

7. RD-75.200.00-КТН-079-12. Polozhenie o diagnostirovanii, poryadke tekhnicheskogo osvidetel'stvovaniya i prodlenii sroka sluzhby ehnergoustanovok nefteperekachivayushchih stancij magistral'nyh nefteprovodov.

8. GOST R 52776-2007. Mashiny ehlektricheskie vrashchayushchiesya. Nominal'nye dannye i rabochie harakteristiki. M.: Izd-vo standartov, 2008. 7 p.

9. GOST 6581-75. Materialy ehlektroizolyacionnye zhidkie. Metody ehlektricheskikh ispytaniy. M.: Izd-vo standartov, 2008. 9 p.



Пентегов И. В.
Pentegov I. V.

*доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник отдела электротермии,
Институт электросварки им. Е.О. Патона
Национальной академии наук Украины,
г. Киев, Украина*



Рымар С. В.
Rymar S. V.

*доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник отдела электротермии,
Институт электросварки им. Е.О. Патона
Национальной академии наук Украины,
г. Киев, Украина*

УДК 536.12:621.78.01

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Цель. Разработка алгоритмов интегрирования в модернизированном методе тепловых источников, обеспечивающих ускорение счета, а также сравнение времени, затрачиваемого на тепловые расчеты, в различных задачах.

Методология. Метод основывается на научных положениях теоретической теплофизики: теории распространения тепла в сплошных средах для определения распределения тепловых потоков в массивных телах, математических методах и способах интегрирования.

Результаты. Разработаны алгоритмы интегрирования в модернизированном методе тепловых источников, обеспечивающие ускорение счета. На примере пакета MathCAD показано, что скорость расчетов в предложенном методе, по сравнению с традиционными методами расчетов, увеличивается от нескольких десятков до нескольких тысяч раз в зависимости от сложности функции удельной мощности. Алгоритмы были проверены при решении ряда задач электротермии и показали высокую точность совпадения результатов расчета с опытными данными, а также с данными расчета прикладных компьютерных программ ведущих мировых фирм, использующих метод конечных элементов. Разработанные алгоритмы интегрирования в модернизированном методе тепловых источников позволяют решать задачи высокочастотного индукционного нагрева объемных тел и особенно эффективно тел с простыми геометрическими формами.

Оригинальность. Ускорение расчетов тепловых процессов с использованием разработанных алгоритмов интегрирования в модернизированном методе тепловых источников столь существенно, что позволяет рассчитывать распространение тепла в нагреваемом изделии в режиме реального времени.

Практическая ценность. Ускорение расчетов приводит к появлению нового качества метода — выбор режимов нагрева изделий может быть автоматизирован и встроен в технологическую линию по их производству.

Ключевые слова: тепловые расчеты, тепловая мощность, распространение тепла, модернизированный метод тепловых источников, алгоритмы интегрирования, повышение скорости расчетов, высокочастотный индукционный нагрев.

PRACTICAL APPLICATION OF THE HEAT SOURCES METHOD TO THE ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES IN ELECTROTECHNICAL SYSTEMS

Purpose. Development of integration algorithms, ensuring accelerated computations in the framework of the modernized method of heat sources, and comparison of times spent on thermal calculations in various problems.

Methodology. The method is based on scientific principles of theoretical thermal physics — theories of heat propagation in continuous medium, used for determination of distribution of thermal flows in massive bodies, and also on mathematical methods and integration procedures.

Results. Algorithms of integration providing acceleration of computations are developed for the modernized method of heat sources. By the example of calculations in the MathCAD software package it is shown that the speed of calculations with proposed method, in comparison with traditional methods of calculations, increases by a factor of several tens to several thousand, depending on the complexity of the power density function. The proposed algorithms have been verified in the solutions of some problems of electrothermics and have shown high accuracy of obtained results in comparison with empirical data, and also with the data calculated in specialized software packages, engineered by the leading global developers and utilizing the method of finite elements. The developed algorithms of integration in the modernized method of heat sources allow solving problems of high-frequency induction heating of volumetric bodies and are especially effective in the case of simple geometrical forms.

Originality. The speed-up of calculations of thermal processes with the use of the developed integration algorithms in the modernized method of heat sources is so significant, that it allows conducting a real-time computation of the heat propagation in heated body.

Practical value. The acceleration of calculations leads to a new quality of the method — the choice of the products heating regimes can be automated and built into their manufacturing line.

Key words: thermal calculations, heat rating, heat propagation, modernized method of thermal sources, integration algorithms, acceleration of computations, high-frequency induction heating.

При анализе распределения тепловых потоков в задачах высокочастотного индукционного нагрева в электротехнических системах часто используется аналитический метод расчета тепловых источников Фурье [1], развитый Н. Н. Рыкалиным [2, 3], оперирующий конечной величиной импульса энергии. В этом методе в точке возникновения импульса энергии возникает бесконечно высокая температура, что является существенным недостатком метода, вносящим погрешность при расчете температур, особенно вблизи источника нагрева.

В работе [4] предложен новый способ суммирования радиус-векторов в методе тепловых источников, что позволило избежать бесконечно высоких температур в точке возникновения импульса энергии и тем самым существенно повысить точность расчетов, сделав существенный шаг в развитии аналитических методов расчета тепловых процессов. Этот модернизированный метод базиру-

ется на интегральном подходе при решении задачи распространения тепла. Однако взятие интегралов в компьютерных математических программах довольно медленный процесс, значительно снижающий скорость вычислений.

Существует ряд задач, для которых сокращение времени счета очень актуально. Это задачи тепловых расчетов при закалке и отпуске разнотипных изделий, таких как трубы, рельсы, профили, фланцы, а также сварка и гибка изделий в процессе серийного производства конструкций, нагрев электродов при различных видах сварки, определяющий режим сварки, и другие технологические процессы. Все эти расчеты желательно проводить в реальном времени, так как переналадку режимов нагрева необходимо осуществлять быстро при каждой смене типа и номенклатуры обрабатываемого изделия. На примере пакета MathCAD [5] будет показано, что при использовании предложенного в

настоящей статье способа интегрирования в модернизированном методе в ряде случаев расчетное время уменьшается в тысячи раз. Это приводит к появлению нового качества модернизированного метода — выбор режимов нагрева изделий может быть автоматизирован и встроен в технологическую линию по их производству.

Целью и задачей статьи является разработка алгоритмов интегрирования в модернизированном методе тепловых источников [4], обеспечивающих ускорение компьютерных расчетов, а также сравнение времени, затрачиваемого на тепловые расчеты в различных задачах. Необходимо дать рекомендации по использованию встроенных функций «*erf*» в пакетах математических программ, позволяющие отказаться от использования явных функций интегрирования и резко сократить время счета.

Исследование времени счета при различных алгоритмах вычисления кратных интегралов

Распределение приращений температур в неограниченном трехмерном пространстве при источниках тепла, равномерно распределенных внутри прямоугольного параллелепипеда со сторонами X, Y, Z и началом координат в центре параллелепипеда, при новом методе суммирования радиус-векторов описывается уравнением (17) работы [4], справедливого для случая отсутствия теплоотвода вверх от полупространства:

$$\Theta_1(x, y, z, t) = \frac{p_V}{c\gamma(4\pi a)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \int_{-X/2}^{X/2} e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}} dx_0 \int_{-Y/2}^{Y/2} e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}} dy_0 \int_{-Z/2}^{Z/2} e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}} dz_0 d\tau^2 \quad (1)$$

где p_V — удельная мощность, выделяемая в элементе объема, Вт/м³. Сначала будем полагать $p_V = \text{const}$, так что эта величина может быть вынесена за знак интеграла; c — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); γ — плотность материала, кг/м³; $a = \lambda(c\gamma)$ — коэффициент температуропроводности, м²/с; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); t — текущее время, отсчитываемое от начала процесса нагрева; τ — момент времени, отсчитываемый от начала процесса нагрева, когда в

точке с координатами (x_0, y_0, z_0) выделяется энергия dQ (эта энергия равна $dQ = p_V \cdot d\tau \cdot dV$, где dV — элементарный объем $dV = dx_0 \cdot dy_0 \cdot dz_0$ в области распределенных источников тепла [4]); $(t - \tau)$ — время распространения тепла, связанного с выделившейся энергией dQ ; (x, y, z) — координаты точки тела. В расчете обычно принимают средние значения теплофизических параметров за время нагрева.

Истинная температура в точке (x, y, z) в момент времени t будет равна

$$T_1(x, y, z, t) = \Theta_1(x, y, z, t) + T_0 \quad (2)$$

Здесь T_0 — температура окружающей среды (начальные температуры всех точек нагреваемого изделия также равны T_0).

Здесь и далее номера цифровых индексов при параметрах температур Θ и T соответствуют номеру определяющей Θ формулы.

Если же в уравнении (1) не разделять внутренние интегралы, то для приращений температур получим классическую формулу четырехкратного интеграла:

$$\Theta_3(x, y, z, t) = \frac{p_V}{c\gamma(4\pi a)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t \int_{-Z/2}^{Z/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \int_{-X/2}^{X/2} e^{-\frac{(x_0-x)^2 + (y_0-y)^2 + (z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}} dx_0 dy_0 dz_0 d\tau, \quad (3)$$

где $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$ — квадрат расстояния от точечного источника тепла в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) до точки тела с координатами (x, y, z) , в которой определяется приращение температуры. Истинная температура в этой точке при использовании формулы (3) будет равна

$$T_3(x, y, z, t) = \Theta_3(x, y, z, t) + T_0 \quad (4)$$

Сравним время вычислений по формулам (1) и (3).

Для хронометрирования вычислений воспользуемся встроенной в MathCAD функцией текущего времени (в секундах) *time(φ)*, где ϕ — любой идентификатор [5]. Эта функция требует двукратного вычисления: до и после расчетного фрагмента.

Значения параметров, использованных при хронометрировании

Рассмотрим решение гипотетической задачи поверхностного нагрева нижнего неограниченного полупространства (немагнитная сталь) прямоугольным высокочастотным индуктором с площадью XZ и длиной Z , с цен-

тром в начале координат, расположенного над полупространством (см. рисунок 1), на котором $Y/2$ — глубина проникновения тока в массивное тело, при отсутствии потерь тепла с поверхности тела в верхнее полупространство на излучение и конвекцию. При этом верхняя половина параллелепипеда с размерами X , $Y/2$, Z должна рассматриваться как «зеркальное отражение», которое «запирает» для прохода тепловых потоков верхнюю границу нижнего полупространства и обеспечивает требуемые граничные условия [4]. Размеры высокочастотного индуктора примем равными: ширина настила тока $X = 0,1$ м, длина $Z = 0,5$ м. Частота тока индуктора $f = 1,6$ кГц, угловая частота $\omega = 2\pi f = 10^4$ рад/с. Средние значения теплофизических параметров стали $\lambda = 47,14$ Вт/(м·К), $c = \lambda/(ga) = 572,5$ Дж/(кг·К); $a = 1,05 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $g = 7860$ кг/м³. Среднее значение удельного электрического сопротивления стали $\rho = 6,45 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Глубина проникновения магнитного поля в сталь $\Delta = Y/2 = \sqrt{2\rho/(\omega\mu_0)} = 0,01$ м (здесь уже учтено зеркальное отражение Δ ($Y = 2\Delta$) вверх от плоскости $y_0 = 0$ для запираения этой границы для потока тепла вверх [4]); магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Удельная поверхностная мощность тепловложения постоянна и равна $p_s = 600$ кВт/м², эквивалентная, равномерно распределенная по глубине проникновения удельная мощность объемного тепловложения $p_v = 2 p_s / Y = 60$ МВт/м³.

Активная мощность индуктора $P = p_s XZ = p_v XYZ/2 = 30$ кВт.

Начальная температура $T_0 = 293$ К. Время нагрева $t_n = 90$ мин = 5400 с.

Хронометрирование

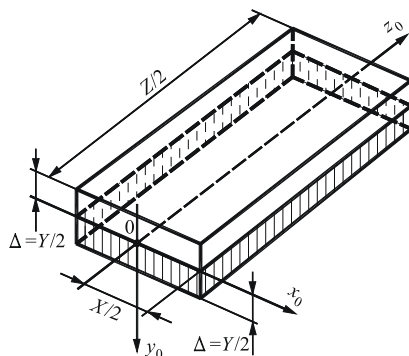


Рисунок 1. Геометрия области с источниками тепла под индуктором (сечение по $z_0 = 0$, индуктор не показан)

Для хронометрирования использовался персональный компьютер с процессором Intel Core i5-3450.

Расчетный фрагмент представляет собой температуры массива точек

$$x_i = x_{\min} + \frac{i}{N}(x_{\max} - x_{\min}); y_j = y_{\min} + \frac{j}{N}(y_{\max} - y_{\min}),$$

где $x_{\min} = -0,2$; $x_{\max} = 0,2$; $y_{\min} = -0,4$; $y_{\max} = 0$; $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, N$.

Вычисления проводились для сечения $z = 0$ при $N = 80$ по следующей схеме. Расчетный блок для интеграла (1) в пакете MathCAD имеет вид

$$\begin{cases} t_0 = \text{time}(0); \\ F1_{i,j} = \Theta_1(x_i, y_j, 0, t_n); \\ t_1 = \text{time}(1); \\ \Delta t_1 = t_1 - t_0. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь t_0 — время начала формирования матрицы температуры $F1_{i,j}$; t_1 — время конца формирования матрицы температуры; Δt_1 — время счета матрицы температуры по формуле (1).

Аналогично, расчетный блок для интеграла (3) будет иметь вид

$$\begin{cases} t_2 = \text{time}(2); \\ F3_{i,j} = \Theta_3(x_i, y_j, 0, t_n); \\ t_3 = \text{time}(3); \\ \Delta t_3 = t_3 - t_2. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь t_2 — время начала формирования матрицы температуры $F3_{i,j}$; t_3 — время конца формирования матрицы температуры; Δt_3 — время счета матрицы температуры $F3_{i,j}$. Величины Δt_1 и Δt_3 зависят от типа компьютера, но отношение этих величин меняется слабо и его можно использовать для сравнения скорости счета по формулам (1) и (3). Вычисления по формулам (5) и (6) показывают, что это отношение лежит в интервале

$$\Delta t_3 / \Delta t_1 = 50 - 60. \quad (7)$$

Таким образом, один только переход к новому методу суммирования радиус-векторов в методе тепловых источников позволяет сократить расчетное время в 50–60 раз по сравнению с классическим методом.

Достоинства нового метода этим не ограничиваются. При разделении внутреннего интеграла в уравнении (3) на произведение трех интегралов в уравнении (1) открывается возможность еще во много раз увеличить скорость вычислений.

Для случая, когда p_V зависит от времени и не является функцией координат, запишем уравнение (1) в виде

$$\Theta_1(x, y, z, t) = \frac{1}{8c\gamma} \int_0^t p_V(\tau) \int_{-X/2}^{X/2} \frac{e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dx_0 \int_{-Y/2}^{Y/2} \frac{e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dy_0 \int_{-Z/2}^{Z/2} \frac{e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dz_0 d\tau, \quad (8)$$

где $p_V(\tau)$ — любая функция времени.

Внутренние интегралы в уравнении (8) безразмерны и, как показано в работе [4], выражаются через встроенные в MathCAD интегралы вероятности:

$$\int_{-X/2}^{X/2} \frac{e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dx_0 = \operatorname{erf} \left[\frac{x + \frac{X}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{x - \frac{X}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] = \operatorname{Erf}(x, X, a, t, \tau); \quad (9)$$

$$\int_{-Y/2}^{Y/2} \frac{e^{-\frac{(y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dy_0 = \operatorname{erf} \left[\frac{y + \frac{Y}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y - \frac{Y}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] = \operatorname{Erf}(y, Y, a, t, \tau); \quad (10)$$

$$\int_{-Z/2}^{Z/2} \frac{e^{-\frac{(z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dz_0 = \operatorname{erf} \left[\frac{z + \frac{Z}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{z - \frac{Z}{2}}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] = \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau). \quad (11)$$

В дальнейшем будем применять краткие обозначения Erf вместо разностей интегралов вероятности, и везде, где это возможно, переходить от интегрирования к встроенным функциям erf. Произведя замены в уравнении (8), получим приращение температуры в точке (x, y, z) :

$$\Theta_{12}(x, y, z, t) = \frac{1}{8c\gamma} \int_0^t p_V(\tau) \cdot \operatorname{Erf}(x, X, a, t, \tau) \times \operatorname{Erf}(y, Y, a, t, \tau) \cdot \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (12)$$

Этот интеграл позволяет рассчитывать температуру в процессе нагрева массивного тела (неограниченного полупространства) сверху плоским высокочастотным индуктором, у которого Z — длина индуктора, X — ширина настила тока под индуктором, $Y/2$ — глубина проникновения тока в массивное

тело, при отсутствии отвода тепла вверх от полупространства (см. рисунок 1). Активная мощность, передаваемая от индуктора в нижнее полупространство в момент времени τ , при этом будет равна $p_V(\tau)XYZ/2$.

Вычисление этой функции не связано с взятием четырехкратного интеграла и время вычисления чрезвычайно мало.

Расчетный блок для интеграла (12) имеет вид

$$\begin{cases} t_4 = \operatorname{time}(4); \\ F12_{i,j} = \Theta_{12}(x_i, y_j, 0, t_n); \\ t_5 = \operatorname{time}(5); \\ \Delta t_{12} = t_5 - t_4. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь t_4 — время начала формирования матрицы температуры $F12_{i,j}$; t_5 — время конца формирования матрицы температуры; Δt_{12} — время счета матрицы температуры по формуле (12).

Вычисления показывают, что отношения времен счета интегралов (1) и (3) ко времени счета интеграла (12) лежат ориентировочно в интервалах:

$$\Delta t_1/\Delta t_{12} = 26-34; \Delta t_3/\Delta t_{12} = 1300-2040. \quad (14)$$

Таким образом, переход к встроенным функциям erf позволяет сократить расчетное время более чем на 3 порядка по сравнению с классическим методом, см. уравнение (3). Это качественный скачок.

Если удельная мощность p_V , выделяемая в элементе объема, зависит от одной из координат, например $p_V = p_V(x_0, \tau)$, то интеграл (12) может быть записан в виде

$$\Theta_{15}(x, y, z, t) = \frac{1}{8c\gamma} \int_0^t \int_{-X/2}^{X/2} \frac{p_V(x_0, \tau) e^{-\frac{(x_0-x)^2}{4a(t-\tau)}}}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} dx_0 \times \operatorname{Erf}(y, Y, a, t, \tau) \cdot \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (15)$$

Здесь внутренний интеграл в общем случае не может быть выражен через интегралы вероятности, и время счета Δt_{15} по сравнению с Δt_{12} возрастает в зависимости от сложности функции $p_V(x_0, \tau)$ приблизительно на порядок.

Если удельная мощность p_V , выделяемая в элементе объема, зависит от двух координат, например $p_V = p_V(x_0, y_0, \tau)$, то интеграл (15) может быть записан в виде

$$\Theta_{16}(x, y, z, t) = \frac{1}{8c\gamma} \int_0^t \int_{-Y/2}^{Y/2} \int_{-X/2}^{X/2} \frac{p_V(x_0, y_0, \tau) e^{-\frac{(x_0-x)^2 + (y_0-y)^2}{4a(t-\tau)}}}{\pi a(t-\tau)} dx_0 dy_0 \times$$

$$\times \operatorname{Erf}(z, Z, a, t, \tau) d\tau. \quad (16)$$

Здесь время счета Δt_{16} по сравнению с Δt_{15} возрастает в зависимости от сложности функции $p_V(x_0, y_0, \tau)$ приблизительно в два раза.

И, наконец, если удельная мощность p_V , выделяемая в элементе объёма, зависит от трёх координат, $p_V = p_V(x_0, y_0, z_0, \tau)$, то интеграл (16) преобразуется в

$$\Theta_{17}(x, y, z, t) = \frac{1}{c\gamma} \int_0^t \int_{-Z/2}^{Z/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} \int_{-X/2}^{X/2} \frac{p_V(x_0, y_0, z_0, \tau) e^{-\frac{(x_0-x)^2 + (y_0-y)^2 + (z_0-z)^2}{4a(t-\tau)}}}{(4\pi a)^{3/2} (t-\tau)^{3/2}} dx_0 dy_0 dz_0 d\tau. \quad (17)$$

Это аналог формулы (3) с тем лишь различием, что здесь время счета Δt_{17} по сравнению с Δt_3 возрастает в зависимости от сложности функции $p_V(x_0, y_0, z_0, \tau)$ приблизительно в 4-5 раз, и по сравнению с Δt_{12} получаем:

$$\Delta t_{17}/\Delta t_3 = 4-5; \quad \Delta t_{17}/\Delta t_{12} = 5000-10000. \quad (18)$$

Заметим, что при каждом вычислении Δt нужно делать полный пересчет программы.

Аналогичный результат наблюдается при пределах интегрирования, являющихся функциями других параметров, например, если $Z = f(X)$ и т.д.

Таким образом, разбиение многократного интеграла на независимые интегралы сокращает время счета в 50–60 раз.

При использовании в модернизированном методе с независимыми интегралами встроенной функции «erf» пакетов математических компьютерных программ время счета, по сравнению с многократным интегралом, сокращается в 1300–2000 раз.

Если удельная мощность, выделяемая в элементе объёма, зависит от трех координат, то перейти к встроенным функциям не удастся, и время счета по сравнению со временем счета с использованием встроенных функций «erf» возрастает в зависимости от сложности функции удельной мощности приблизительно в 10000 раз.

Наиболее существенное уменьшение времени счета происходит при разбиении области с источниками тепла на элементарные параллелепипеды с равномерным распределением источников тепла внутри каждого параллелепипеда, отдельного расчета тепловых процессов для каждого параллелепипеда и использования принципа наложения темпе-

ратурных полей, что допустимо при усредненных и постоянных значениях теплофизических параметров.

Во всех этих случаях для ускорения счета необходимо использовать метод суммирования (наложения) тепловых вкладов от элементарных параллелепипедов, на которые приближенно разбивается объем с источниками тепла. Этому методу будут посвящены дальнейшие исследования.

Авторы выражают благодарность кандидату физико-математических наук Всеволоду Игоревичу Пентегову за полезные замечания, сделанные им при просмотре статьи.

Выводы

1. Разработаны алгоритмы интегрирования в модернизированном методе тепловых источников, обеспечивающие уменьшение времени счета. На примере пакета MathCAD показано, что в ряде случаев расчетное время уменьшается в тысячи раз, по сравнению с традиционным интегрированием многократного интеграла.

2. Ускорение расчетов тепловых процессов с использованием предложенных алгоритмов интегрирования в модернизированном методе тепловых источников столь существенно, что позволяет рассчитывать распространение тепла в нагреваемом изделии в режиме реального времени. Это приводит к появлению нового качества метода — выбор режимов нагрева изделий может быть автоматизирован и встроен в технологическую линию по их производству.

3. Предложенные алгоритмы интегрирования в модернизированном методе тепловых источников позволяют решать задачи высокочастотного индукционного нагрева объемных тел, и особенно эффективно тел с простыми геометрическими формами.

4. Разработанные алгоритмы были проверены при решении ряда задач электротермии и показали высокую точность совпадения результатов расчета с опытными данными, а также с данными расчета прикладных компьютерных программ ведущих мировых фирм, использующих метод конечных элементов.

Список литературы

1. Fourier J.B. Théorie analytique de la chaleur. Paris: Chez Firmin Didot, père et fils, 1822. 639 p.
2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 297 с.
3. Фролов В.В., Винокуров В.А., Волченко В.Н. и др. Теоретические основы сварки / Под. ред. В.В. Фролова. М.: Высшая школа, 1970. 592 с.
4. Пентегов И.В. К теории метода тепловых источников, используемого при анализе тепловых процессов в электротехнических системах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 3. С. 5–5.
5. Кирьянов Д.В. MathCAD 14. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 704 с.

References

1. Fourier J.B. Théorie analytique de la chaleur. Paris: Chez Firmin Didot, père et fils, 1822. 639 p.
2. Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke. M.: Mashgiz, 1951. 297 s.
3. Frolov V.V., Vinokurov V.A., Volchenko V.N. i dr. Teoreticheskie osnovy svarki / Pod. red. V.V. Frolova. M.: Vysshaja shkola, 1970. 592 s.
4. Pentegov I.V. K teorii metoda teplovykh istochnikov, ispol'zuemogo pri analize teplovykh protsessov v elektrotekhnicheskikh sistemakh // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2014. T. 10. № 3. S. 5–15.
5. Kir'ianov D.V. MathCAD 14. SPb.: BKhV-Peterburg, 2007. 704 s.



Шабанов В. А.
Shabanov V. A.

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



Алексеев В. Ю.
Alekseev V. Yu.

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



Юсупов Р. З.
Yusupov R. Z.

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

УДК 621.316

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКИРОВКИ ЗАЩИТЫ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ВВОДА

Защиты минимального напряжения (ЗМН) широко применяются на нефтеперекачивающих станциях для выявления режимов нарушения электроснабжения и обеспечения бесперебойности технологического процесса перекачки нефти по магистральным нефтепроводам. Такая защита должна срабатывать только при коротких замыканиях (КЗ) в питающей электрической сети и не должна действовать при КЗ в распределительной сети предприятия. Функция блокировки ЗМН при КЗ в электрической сети нефтеперекачивающих станций возлагается на максимальную токовую защиту (МТЗ) ввода. Эффективность такой блокировки зависит от длины зон действия ЗМН и МТЗ. В статье исследуется влияние параметров электрической сети и высоковольтных электродвигателей на зоны действия ЗМН и МТЗ ввода при КЗ.

Показано, что зоны действия ЗМН и МТЗ зависят от режима питающей электрической сети, причем зона действия ЗМН линейно растет при увеличении сопротивления системы, а зона действия МТЗ линейно снижается. В зависимости от величины сопротивления питающей электрической сети длина зоны МТЗ может быть больше, равной или меньше, чем длина зоны ЗМН. В режимах работы питающей сети, когда длина зоны МТЗ может быть меньше, чем длина зоны ЗМН, блокировка ЗМН от МТЗ ввода при КЗ в сети предприятия становится не эффективной. При этом возможно ложное срабатывание ЗМН.

Для обеспечения блокировки ЗМН при КЗ в сети предприятия предложено использовать либо специальное блокирующее токовое реле, либо МТЗ ввода с пуском по напряжению. Обеспечение блокирующих функций токового реле и МТЗ ввода с пуском по напряжению достигается либо согласованием тока срабатывания МТЗ с длиной зоны действия ЗМН, либо выбором напряжения пуска МТЗ не ниже, чем напряжение срабатывания ЗМН.

Ключевые слова: защита минимального напряжения, максимальная токовая защита, длина защищаемой зоны, электрическая сеть, нефтеперекачивающая станция.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF LOCK PROTECTION MINIMUM VOLTAGE BY OVERCURRENT RELAY PROTECTION

Undervoltage protection is widely used in oil pumping stations, to identify regimes of power outages and ensure continuity of the technological process of pumping oil through main pipelines. Such protection should only be operated when short-circuits in power electric circuits and must not operate when short circuits in the distribution network of the enterprise. Lock of undervoltage protection at short circuit in electrical grids pumping stations run with help overcurrent protection on input electrical grid. The effectiveness of the lock depends on the zones length of undervoltage protection and overcurrent protection. The article studies the influence of parameters of electric grids and high voltage electric motors on the zones length of the undervoltage protection and overcurrent protection in case of short circuits.

It is shown that the coverage of the undervoltage protection and overcurrent protection depend on the mode of power supply, and the protected area of the undervoltage protection linearly increases with the resistance of the system, and the zone of protection overcurrent linearly decreases. Depending on the resistance value of the electric grids, the length of the zone of overcurrent protection may be greater than, equal to or less than the length of the zone of undervoltage protection. In the operating modes of the power supply when the length of the zone of overcurrent protection may be less than the length of the zone of undervoltage protection protection, blocking protection undervoltage protection overcurrent protection of local switch in case of short circuits in the network of the company becomes effective. It is possible false triggering of the protection of the undervoltage protection.

To ensure the locking of the protection of the undervoltage protection when a short circuit in the network of the enterprise is proposed to use any special blocking current relays, or overcurrent protection of local switch to perform the start-up voltage. Blocking functions current relay and a overcurrent protection with start-up voltage is achieved either by agreement of the current operation the overcurrent protection with range undervoltage protection, or by the voltage selection trigger the overcurrent protection is not lower than the voltage operation undervoltage protection.

Key words: undervoltage protection, overcurrent protection, length of the protected zone, electricity grids, oil-pumping station.

Защиты минимального напряжения (ЗМН) являются одним из видов защиты от потери питания электродвигателей и широко применяются на подстанциях промышленных предприятий [1, 2]. По принципу действия пуск ЗМН происходит при снижении напряжения в электрической сети по любой причине, в том числе и при коротких замыканиях (КЗ). Однако ЗМН должна срабатывать только при КЗ в питающей электрической сети и не должна действовать при КЗ на шинах 6, 10 кВ и в распределительной сети предприятия, а также в режимах пуска и самозапуска электродвигателей [3–5]. На насосных перекачивающих станциях (НПС) нефти и нефтепродуктов ЗМН используются для выявления режимов нарушения электропитания и обеспечения бесперебойности технологического процесса перекачки нефти

по магистральным нефтепроводам [6, 7]. Исследованию ЗМН на НПС и анализу их недостатков уделяется много внимания [8–11]. В случае неселективного срабатывания ЗМН при КЗ в сети предприятия происходит ложное отключение одной из секций шин распределительного устройства. При этом теряет питание часть магистральных насосных агрегатов, что может привести к полному расстройству процесса перекачки нефти или газа по трубопроводу [12–14]. Блокировка действия ЗМН при КЗ в электрической сети НПС выполняется по факту пуска максимальной токовой защиты (МТЗ) ввода 6(10) кВ [15]. Эффективность такой блокировки зависит от согласования зон действия ЗМН и МТЗ ввода [16]. В статье исследуются пути повышения эффективности такой блокировки при КЗ в электрической сети НПС.

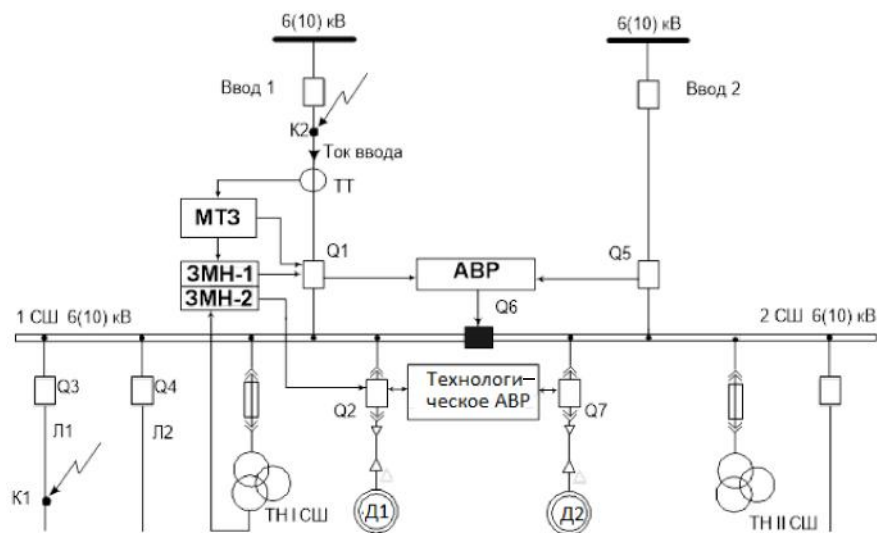


Рисунок 1. Схема электроснабжения НПС и подключения ЗМН и МТЗ ввода

Типовая схема электроснабжения НПС при двухсекционном ЗРУ-6(10) кВ с расположением ЗМН и МТЗ ввода приведена на рисунке 1.

Электродвигатели Д1 и Д2 магистральных насосных агрегатов, выполняющих перекачку нефти по магистральным нефтепроводам, получают питание от шин технологического закрытого распределительного устройства (ЗРУ). Защита минимального напряжения на НПС выполняется двухступенчатой. Первая ступень ЗМН-1 с выдержкой времени 0,5 с действует на отключение выключателя ввода (Q1) в режимах потери питания с глубоким снижением или исчезновением напряжения. По факту отключения выключателя ввода (от блок-контактов выключателя) происходит пуск схемы автоматического включения резерва (АВР), включается секционный выключатель Q6 и напряжение на терявшей питание секции шин восстанавливается. Вторая ступень ЗМН-2 с выдержкой времени 5–7 с действует на отключение электродвигателей, потерявших питание. Работает она при отказе ЗМН-1 или при отказе АВР. В этих случаях технологический процесс перекачки сохраняется за счет включения электродвигателя (Д2) резервного магистрального насосного агрегата [13, 14, 17]. КЗ в сети предприятия (в точке К1) должны отключаться быстродействующими защитами присоединений (линии Л1) [15]. Для блокировки ЗМН-1 при КЗ в сети предприятия используется дискретный сигнал от

токовых реле МТЗ ввода. Рассмотрим, при каких условиях блокировка ЗМН-1 от МТЗ ввода на НПС будет эффективной.

Уставки срабатывания ЗМН по напряжению и МТЗ по току

Напряжение срабатывания ЗМН-1 принимается из условия возврата реле напряжения при самозапуске электродвигателей после отключения внешнего КЗ или после включения секционного выключателя при срабатывании автоматического включения резерва по выражению [1, 6, 16]:

$$U_{\text{ЗМН}} = \frac{U_{\text{ост}}}{K_{\text{отс}} \cdot K_{\text{вн}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ЗМН}}$ — напряжение срабатывания ЗМН-1; $K_{\text{отс}}$ — коэффициент отстройки; $K_{\text{вн}}$ — коэффициент возврата реле минимального напряжения при восстановлении питания (после включения секционного выключателя $K_{\text{вн}} = 1$); $U_{\text{ост}}$ — наименьшее остаточное напряжение на шинах при самозапуске электродвигателей:

$$U_{\text{ост}} = \frac{U_{\text{с}} \cdot X_{\text{э}}}{X_{\text{с.нб}} + X_{\text{э}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{с}}$ — напряжение питающей сети; $X_{\text{с.нб}}$ — наибольшее эквивалентное реактивное сопротивление питающей сети (сопротивление сети в минимальном режиме); $X_{\text{э}}$ — эквивалентное сопротивление электродвигателей.

Ток срабатывания МТЗ ввода принимается из условия возврата реле тока при самозапуске после отключения КЗ по выражению [2, 16]:

$$I_{\text{МТЗ}} = \frac{K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{сзп}}}{K_{\text{в.т}}}, \quad (3)$$

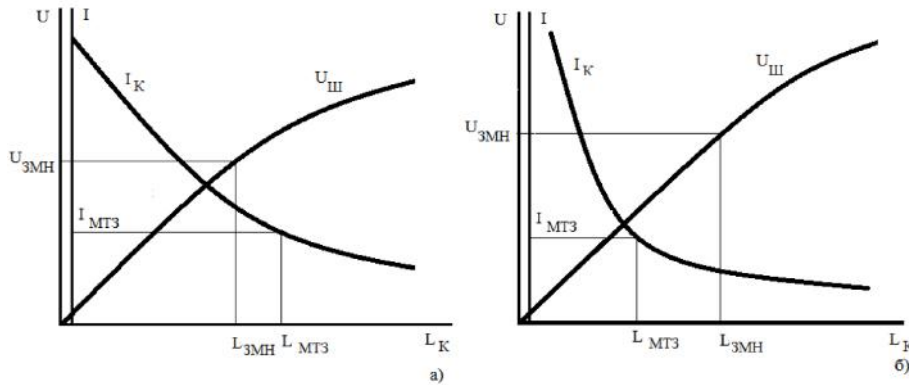


Рисунок 2. Графики зон действия МТЗ (а) и ЗМН (б) при изменении расстояния до КЗ на отходящей линии

где $K_{отс}$ — коэффициент отстройки; $K_{в.т}$ — коэффициент возврата реле тока; $I_{сзп}$ — ток самозапуска;

$$I_{сзп} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot (X_{с.нм} + X_э)}, \quad (4)$$

где $X_{с.нм}$ — наименьшее эквивалентное реактивное сопротивление питающей сети (сопротивление сети в максимальном режиме).

Токи и напряжения при КЗ

При КЗ в распределительной сети НПС ток КЗ I_K и напряжение на шинах U_{III} будут соответственно:

$$I_K = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot (X_c + X_K)}, \quad (5)$$

$$U_{III} = \frac{U_c \cdot X_K}{X_c + X_K}, \quad (6)$$

где X_c — эквивалентное реактивное сопротивление питающей сети.

Графики изменения тока КЗ и напряжения на шинах U_{III} в функции расстояния L_K до точки КЗ на отходящей линии (на линии Л1 на рисунке 1), построенные по выражениям (5) и (6), приведены на рисунке 2. По мере увеличения расстояния L_K до точки КЗ от шин ЗРУ-6(10) кВ ток КЗ I_K снижается, а остаточное напряжение на шинах ЗРУ U_{III} растет.

Анализ эффективности блокировки ЗМН от МТЗ

Защиты ЗМН и МТЗ срабатывают при выполнении, соответственно, условий:

$$U_{III} \leq U_{ЗМН} \text{ и } I_{МТЗ} \leq I_K. \quad (7)$$

Точки пересечения графиков тока и напряжения при КЗ с горизонтальными прямыми $I_{МТЗ}$ и $U_{ЗМН}$ на рисунке 2 определяют зоны действия защит $L_{МТЗ}$ и $L_{ЗМН}$. На рисунке 2, а зона действия МТЗ $L_{МТЗ}$ превышает зону действия

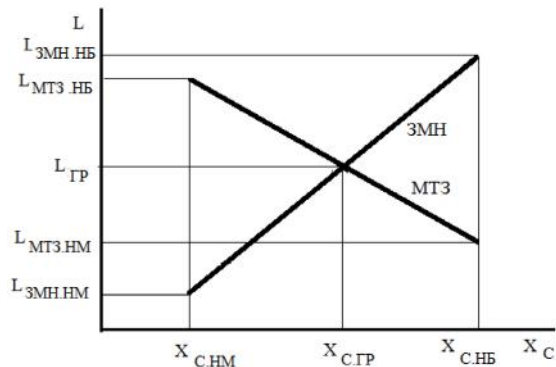


Рисунок 3. Зависимость зоны действия ЗМН и МТЗ от эквивалентного сопротивления питающей сети

ЗМН $L_{ЗМН}$. При этом МТЗ ввода будет блокировать ЗМН. Если же зона действия МТЗ $L_{МТЗ}$ меньше зоны действия ЗМН $L_{ЗМН}$, то при КЗ на расстоянии L_K в интервале $L_{МТЗ} < L_K < L_{ЗМН}$ МТЗ не работает (рисунок 2, б), а ЗМН может сработать. В результате блокировка от МТЗ не действует, и ЗМН может ложно отключить выключатель ввода.

Длина зоны действия ЗМН и МТЗ зависит от эквивалентного сопротивления питающей электрической сети и сопротивления электродвигателей [2, 16]. Подставим в (1) значение остаточного напряжения на шинах $U_{ост}$ из (2) и приравняем полученное значение $U_{ЗМН}$ и напряжение на шинах при КЗ по (6). При этом, подставляя $X_K = L_{ЗМН} \cdot X_0$, после преобразований получим для длины зоны действия ЗМН:

$$L_{ЗМН} = \frac{X_c \cdot X_э}{K_{отс} \cdot K_{в.т} \cdot (X_{с.нб} + X_э) - X_э} \cdot \frac{1}{X_0}, \quad (8)$$

где X_0 — удельное индуктивное сопротивление линии.

Аналогично, для длины зоны действия МТЗ ввода из выражений (3)–(5):

$$L_{МТЗ} = \frac{K_{в.т} \cdot (X_{с.нм} + X_э) - K_{отс} \cdot X_c}{K_{отс} \cdot X_0}. \quad (9)$$

Графики изменения зон действия ЗМН и МТЗ при увеличении сопротивления системы X_C , построенные по (8) и (9), приведены на рисунке 3. Графики построены при варьировании X_C от наименьшего значения $X_{C.НМ}$ до наибольшего $X_{C.НБ}$.

Наибольшая длина зоны ЗМН $L_{ЗМН.НБ}$ и наименьшая длина зоны МТЗ $L_{МТЗ.НМ}$ при постановке в (8) и (9) $X_C = X_{C.НБ}$. Наименьшая длина зоны ЗМН $L_{ЗМН.НМ}$ и наибольшая длина зоны МТЗ $L_{МТЗ.НБ}$ будут при подстановке в (8) и (9) $X_C = X_{C.НМ}$.

Средства повышения эффективности блокировки ЗМН

Найдем, при каких значениях сопротивления питающей сети возможен отказ МТЗ ввода. Граничным значением сопротивления питающей сети $X_{C.ГР}$ будет такое, при котором выполняется условие $L_{МТЗ} = L_{ЗМН}$. Для его определения приравняем правые части (8) и (9) и решим полученное уравнение относительно сопротивления питающей сети X_C . Получим для граничного значения сопротивления $X_{C.ГР}$, при котором равны зоны действия МТЗ и ЗМН:

$$X_{C.ГР} = \frac{[K_{в.т.} \cdot (X_{C.НМ} + X_3)] \cdot [K_{отс.} \cdot K_{в.н.} \cdot (X_{C.НБ} + X_3) - X_3]}{K_{отс.} \cdot X_3 + K_{отс.} \cdot [K_{отс.} \cdot K_{в.н.} \cdot (X_{C.НБ} + X_3) - X_3]} \quad (10)$$

При сопротивлении питающей сети больше граничного значения длина зоны действия МТЗ становится меньше длины зоны действия ЗМН, и МТЗ ввода перестает выполнять блокирующие функции. Для обеспечения блокировки МТЗ в таких режимах работы электрической сети необходимо либо повышение чувствительности МТЗ ввода, либо использование других блокирующих средств, например специальной блокирующей токовой защиты (токового реле).

Выбор параметров срабатывания блокирующих устройств

При установке блокирующего токового реле ток его срабатывания следует выбирать по согласованию с длиной зоны действия ЗМН. Условие согласования можно сформулировать следующим образом: если КЗ происходит в конце зоны действия ЗМН и напряжение на шинах равно напряжению срабатывания ЗМН, то ток КЗ должен быть больше тока срабатывания блокирующего реле I_B :

$$I_B \leq I_K$$

Так как в соответствии с (5) и (6) напряжение на шинах и ток КЗ связаны выражением

$$U_{ш} = \sqrt{3} X_K \cdot I_K$$

то принимая напряжение на шинах равным напряжению срабатывания ЗМН для условия согласования, получаем:

$$I_B < \frac{U_{ЗМН}}{\sqrt{3} \cdot X_0 \cdot L_{ЗМН}}$$

Это неравенство должно выполняться при любом значении сопротивления питающей сети, а, следовательно, и при любом значении зоны действия ЗМН, в том числе, и при наибольшем $L_{ЗМН.НБ}$. При этом ток срабатывания блокирующего реле следует определять по выражению:

$$I_B = \frac{K_{О.Б} \cdot U_{ЗМН}}{\sqrt{3} \cdot X_0 \cdot L_{ЗМН.НБ}} \quad (11)$$

где $K_{О.Б}$ — коэффициент отстройки блокирующего реле, принимаемый меньше единицы.

Наибольшая длина зоны действия ЗМН в выражении (11) определяется по (8) при подстановке наибольшего значения сопротивления питающей электрической сети:

$$L_{ЗМН.НБ} = \frac{X_{C.НБ} \cdot X_3}{K_{отс.} \cdot K_{в.н.} \cdot (X_{C.НБ} + X_3) - X_3} \cdot \frac{1}{X_{уд}} \quad (12)$$

При выборе тока срабатывания блокирующего реле по (11) зона его действия всегда будет больше зоны действия ЗМН. При этом, если при КЗ в сети предприятия сработают пусковые реле напряжения ЗМН, то сработает блокирующее токовое реле, и действие ЗМН на отключение выключателя ввода будет запрещено.

Другой способ повышения эффективности блокировки ЗМН — использование МТЗ ввода с повышенной чувствительностью. Причиной недостаточной чувствительности МТЗ ввода является необходимость отстраиваться от токов самозапуска. На НПС с высоковольтными синхронными двигателями для повышения чувствительности МТЗ ввода используется МТЗ с пуском по напряжению. Такую защиту можно использовать и для обеспечения блокировки ЗМН в тех случаях, когда простая МТЗ ввода не эффективна. Ток срабатывания МТЗ с пуском по напряжению отстраивается не от тока самозапуска по (3), а определяется исходя из обеспечения доста-

точной чувствительности при КЗ на шинах по выражению

$$I_{МТЗ} = \frac{I_{КЗ,МИН}}{K_{\chi}}, \quad (13)$$

где $I_{КЗ,МИН}$ — ток ввода при КЗ на шинах в минимальном режиме работы сети; K_{χ} — требуемое значение коэффициента чувствительности.

Для целей блокировки ЗМН ток срабатывания МТЗ ввода должен выбираться равным наименьшему из значений, найденных по (11) и (13).

Напряжение срабатывания пускового органа МТЗ ввода при использовании для целей блокировки должно быть согласовано с напряжением срабатывания ЗМН. Для этого достаточно принять напряжение пуска МТЗ равным напряжению срабатывания ЗМН по (1).

Выводы

1. Зоны действия ЗМН и МТЗ зависят от режима питающей электрической сети, причем зона действия ЗМН линейно растет

при увеличении сопротивления питающей сети, а зона действия МТЗ линейно снижается. В зависимости от величины сопротивления питающей электрической сети длина зоны МТЗ может быть как больше, так и меньше, чем длина зоны ЗМН.

2. В режимах работы питающей сети, когда длина зоны МТЗ меньше, чем длина зоны ЗМН, блокировка ЗМН от МТЗ ввода при КЗ в сети предприятия становится не эффективной. При этом возможно ложное срабатывание ЗМН.

3. Для обеспечения блокировки ЗМН при КЗ в сети предприятия следует использовать либо специальное блокирующее токовое реле, либо МТЗ ввода с пуском по напряжению. Обеспечение блокирующих функций токового реле и МТЗ ввода с пуском по напряжению достигается либо согласованием тока срабатывания МТЗ с длиной зоны действия ЗМН, либо выбором напряжения пуска МТЗ не ниже, чем напряжение срабатывания ЗМН.

Список литературы

1. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.

2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 2008. 639 с.

3. Ершов М.С., Егоров А.В., Федоров В.А. Некоторые вопросы повышения устойчивости электроприводов многомашинного комплекса с непрерывным технологическим процессом при возмущениях в системе электроснабжения // Промышленная энергетика. 1992. № 7. С. 23–26.

4. Ершов М.С., Рупчев И.О. Адаптация защит узлов электрических сетей к потере питания при несимметричных возмущениях // Промышленная энергетика. 2004. № 1. С. 28–30.

5. Ершов М.С., Егоров А.В., Новоселова Ю.В. О влиянии состава нагрузки на устойчивость промышленных электротехнических систем // Промышленная энергетика. 2004. № 10. С. 16–24.

6. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Выбор уставок защит минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Энергетик. 2008. № 7. С. 37–39.

7. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Валишин А.Р. Выполнение защит минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2010. С. 93–98.

8. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Плеханов М.К., Юсупов Р.З. Повышение надежности пусковых органов минимального напряжения АВР на НПС // Электронные устройства и системы: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 271–275.

9. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Повышение эффективности первой ступени защиты минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Электромеханика, электротехнические системы и комплексы: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 179–183.

10. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Валишин А.Р., Плеханов М.К. Недостатки

защит минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2010. № 2. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_1.pdf.

11. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Валишин А.Р., Плеханов М.К. Пути устранения недостатков защиты минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело». 2011. Т. 9. № 2. С. 91–94.

12. Беляев А.В. Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности. М.: НПФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2004. 80 с.

13. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Мустафин Т.С., Валишин А.Р. Сравнительный анализ роли самозапуска и технологического АВР в обеспечении устойчивой работы НПС с синхронными электродвигателями // Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело». 2008. Т. 6. № 1. С. 143–146.

14. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Ускорение включения технологического резерва на НПС при нарушениях в системе электроснабжения // Промышленная энергетика. 2010. № 6. С. 31–35.

15. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Клименко С.Е., Юсупов Р.З. Согласование выдержек времени релейной защиты НПС // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и энергоресурсов. 2007. Вып. 4 (70). С. 84–89.

16. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Токмаков Д.А., Шепелин А.В. Недостатки блокировки защиты минимального напряжения на нефтеперекачивающих станциях // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 6. С. 234–252. URL: http://ogbus.ru/issues/62015/ogbus62015_p234-252_ShabanovVA_ru.pdf.

17. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Павлова З.Х. Обеспечение бесперебойной работы частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов и технологического режима перекачки при кратковременных нарушениях электроснабжения. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2012. 171 с.

References

1. Korogodskij V.I., Kuzhekov S.L., Paperno L.B. Relejnaja zashhita jelektroprivodov naprjazheniem vyshe 1 kV. M.: Jenergoatomizdat, 1987. 264 s.

2. Andreev V.A. Relejnaja zashhita i avtomatika sistem jelektrosnabzhenija. M.: Vysshaja shkola, 2008. 639 s.

3. Ershov M.S., Egorov A.V., Fedorov V.A. Nekotorye voprosy povyshenija ustojchivosti jelektroprivodov mnogomashinnogo kompleksa s nepreryvnyim tehnologicheskim processom pri vozmushhenijah v sisteme jelektrosnabzhenija // Promyshlennaja jenergetika. 1992. № 7. S. 23–26.

4. Ershov M.S., Rupchev I.O. Adaptacija zashhit uzlov jelektricheskikh setej k potere pitaniya pri nesimmetrichnyh vozmushhenijah // Promyshlennaja jenergetika. 2004. № 1. S. 28–30.

5. Ershov M.S., Egorov A.V., Novoselova Ju.V. O vlijanii sostava nagruzki na ustojchivost' promyshlennykh jelektrotehnicheskikh sistem // Promyshlennaja jenergetika. 2004. № 10. S. 16–24.

6. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju. Vybore ustavok zashhit minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushchih stancijah // Jenergetik. 2008. № 7. S. 37–39.

7. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Valishin A.R. Vypolnenie zashhit minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushchih stancijah // Povysenie nadezhnosti i jenergojeffektivnosti jelektrotehnicheskikh sistem i kompleksov: mezhvuz. sb. nauch. tr. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2010. S. 93–98.

8. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Plehanov M.K., Jusupov R.Z. Povysenie nadezhnosti puskovykh organov minimal'nogo naprjazhenija AVR na NPS // Jelektronnye ustrojstva i sistemy: mezhvuz. nauch. sb. Ufa: UGATU, 2010. S. 271–275.

9. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju. Povysenie jeffektivnosti pervoj stupeni zashhity minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushchih stancijah // Jelektromehanika, jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы: mezhvuz. nauch. sb. Ufa: UGATU, 2010. S. 179–183.

10. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Valishin A.R., Plehanov M.K. Nedostatki zashhit minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijah // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo». 2010. № 2. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_1.pdf.
11. Shabanov B.A., Alekseev V.Ju., Valishin A.R., Plehanov M.K. Puti ustraneniya nedostatkov zashhity minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijah // Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Neftegazovoe delo». 2011. T. 9. № 2. S. 91–94.
12. Beljaev A.V. Protivoavarijnoe upravlenie v uzlah nagruzki s sinhronnymi jelektrodivigateljami bol'shoj moshhnosti. M.: NPF «Jenergoprogress», «Jenergetik», 2004. 80 s.
13. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Mustafin T.S., Valishin A.R. Sravnitel'nyj analiz roli samozapuska i tehnologicheskogo AVR v obespechenii ustojchivoj raboty NPS s sinhronnymi jelektrodivigateljami // Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Neftegazovoe delo». 2008. T. 6. № 1. S. 143–146.
14. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju. Uskorenie vkljuchenija tehnologicheskogo rezerva na NPS pri narushenijah v sisteme jelektrosnabzhenija // Promyshlennaja jenergetika. 2010. № 6. S. 31–35.
15. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Klimenko S.E., Jusupov R.Z. Soglasovanie vyderzhek vremeni relejnoj zashhity NPS // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i jenergoresursov. 2007. Vyp. 4 (70). S. 84–89.
16. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Tokmakov D.A., Shepelin A.V. Nedostatki blokirovki zashhity minimal'nogo naprjazhenija na nefteperekachivajushhih stancijah // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo». 2015. № 6. S. 234–252. URL: http://ogbus.ru/issues/62015/ogbus6_2015_p234-252_ShabanovVA_ru.pdf.
17. Shabanov V.A., Alekseev V.Ju., Pavlova Z.H. Obespechenie besperebojnoj raboty chastotno-reguliruemyh jelektroprivodov magistral'nyh nasosov i tehnologicheskogo rezhima perekachki pri kratkovremennyh narushenijah jelektrosnabzhenija. Ufa: Izd-vo «Neftegazovoe delo», 2012. 171 s.



Диденко Е. Е.
Didenko E. E.

*аспирант кафедры электропривода,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет»,
г. Липецк, Российская Федерация*



Мещеряков В. Н.
Mecherykov V. N.

*доктор технических наук,
профессор, заведующий
кафедрой электропривода, ФГБОУ ВО «Липецкий
государственный технический университет»,
г. Липецк, Российская Федерация*

УДК 621.313.333

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕТЛЕДЕРЖАТЕЛЯ ПРИ ВХОДЕ ПОЛОСЫ В МЕЖКЛЕТЕВОЙ ПРОМЕЖУТОК ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

В предлагаемой статье описывается способ управления электроприводом электромеханического петледержателя в момент входа металла в межклетевой промежуток непрерывного широкополосного стана горячей прокатки при заправке новой полосы. В статье уделено внимание общему описанию работы системы автоматического регулирования натяжения (САРН) для одного межклетевого промежутка, физике процесса поддержания заданного натяжения в промежутке, а также математическому описанию нагрузки, действующей на электропривод петледержателя в процессе прокатки. Приведены соответствующие обобщённые структурные и функциональные схемы. В статье приводятся обоснование использования и описание разработки управления с помощью математического моделирования дополнительной составляющей тока (форсировка момента) петледержателя для его ускоренного подъёма при заполнении металлом межклетевого промежутка. Метод позволяет обеспечить форсированный подъём, сокращающий время выхода петледержателя на заданный угол и переходного процесса установления фактического натяжения равным заданному, реализует подъём петледержателя без значительного петлеобразования, что позволяет обеспечить более устойчивое начало прокатки. Также в статье описаны результаты математического моделирования с помощью пакета MatLab Simulink работы электромеханической системы одного (первого) межклетевого промежутка стана горячей прокатки, содержащей электроприводы петледержателя и двух смежных прокатных клетей, связанных прокатываемой полосой в момент первоначального заполнения металлом межклетевого промежутка. Проведён анализ поведения электропривода петледержателя в момент заправки полосы по предлагаемому методу форсировки и без него. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов моделирования, а именно графиков переходных процессов электромеханической системы одного межклетевого промежутка. Для моделирования процесса использовались фактические характеристики и данные существующего оборудования, а также реальные технологические параметры непрерывного широкополосного стана горячей прокатки. Рассматриваемый способ касается работы системы автоматического регулирования натяжения полосы, построенной по косвенному принципу без применения специализированных датчиков измерения регулируемого параметра (натяжения).

Ключевые слова: вращающий момент, система автоматического регулирования натяжения, петледержатель, натяжение полосы, регулятор петли, регулятор позиции, форсирование крутящего момента электропривода.

CONTROL OF THE ELECTRIC DRIVE OF LOOPER AT THE STRIP ENTRANCE TO THE GAP BETWEEN TWO STAND OF FINISHING GROUP OF THE HOT ROLLING MILL

This article describes a method for controlling electric electromechanical looper at the time of entry the metal into the gap between of stands of continuous wide-strip hot rolling mill at entry a new strip. The article paid attention to the general description of the automatic tension control system (SARN) for an one gap between two stands, of physics of the process of maintaining a predetermined tension in the stands gap, as well as of the mathematical description of the load acting on the drive of looper during rolling. There are showed generalized structural and functional schemes. The article provides a description of the rationale for the use and development control by means of mathematical modeling of the additional component of the current (torque forcing) looper for its fast rise at filling metal the gap of stands. The method allows to provide for the forced rising of looper, reduces the time of reach of looper a predetermined angle and transition process of setting of tension equal to the target tension, implement rise of looper without significant looping, which allows for a more stable start rolling. The article describes the results of mathematical modeling (at using MatLab Simulink package) of work of electromechanical system of the (first) gap between two stands of rolling mill comprising the electric looper and two adjacent rolling stands of the rolled strip at the time of the initial filling of the metal the gap between rolling stands. There is described analysis of the behavior of the drive of looper at the time of filling by strip with the proposed method and without forcing. There is comparatived analysis of the simulation results, namely graphs transient electromechanical system of one gap between two stands. To simulate the process used the actual specifications of existing equipment, as well as real technological parameters of continuous hot-strip rolling mill. Viewed way to concerns the system of automatic control of the tension strip built on the indirect princip, without the use of specialized sensors measure the process variable (tension).

Key words: torque, system of automatic control of tension, looper, tension of strip, regulator of loop, regulator of position, forcing of torque of electric drive.

Поведение электропривода электромеханического петледержателя, являющегося составной частью системы автоматического регулирования натяжения (САРН), описывается известным уравнением движения [1, 2]:

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} = J_{\text{мех}} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где $M_{\text{дв}}$ — момент движения; $J_{\text{мех}}$ — суммарный момент инерции механизма петледержателя; $M_{\text{с}}$ — момент статической нагрузки; $M_{\text{с}} = M_{\text{нагр}}$ — момент нагрузки на валу петледержателя; ω — скорость.

Данное уравнение справедливо для всех режимов работы петледержателя: при его подъеме в момент заполнения полосой межклетевого промежутка, в процессе прокатки и регулирования натяжения САРН и при его опускании при выходе металла из чистовой группы.

В то же время момент нагрузки на вал петледержателя определяется выражением [1, 3]:

$$M_{\text{нагр}} = M_{\text{неур}} + M_{\text{вес}} + M_{\text{нат}} + M_{\text{изг}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{неур}}$ — момент от неуравновешанных частей при горизонтальном положении петледержателя; $M_{\text{вес}}$ — момент нагрузки на валу петледержателя от веса полосы; $M_{\text{нат}}$ — момент нагрузки на валу петледержателя от натяжения; $M_{\text{изг}}$ — момент нагрузки на валу петледержателя от изгиба.

Каждая из составляющих выражения (2) является функцией угла поворота рамы петледержателя, поэтому можно заключить, что и общий момент нагрузки петледержателя является функцией угла поворота его рамы т.е. $M_{\text{нагр}} = f(\alpha)$ [3, 4].

САРН чистовой группы непрерывного стана горячей прокатки (см. рисунок 1), построенная по принципу «косвенного» регулирования натяжения с применением электромеханических «безразличных» петледержателей, обеспечивает регулирование натяжения, исходя из требования равенства рассчитываемого момента двигателя петледержателя и момента нагрузки на его валу.

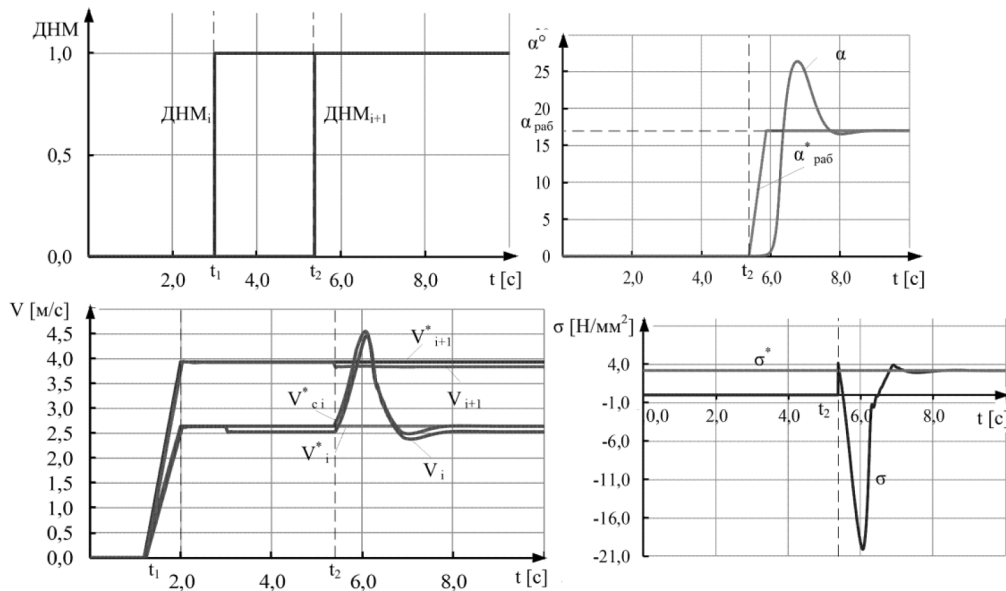


Рисунок 3. Графики ДНМ, σ , V_i , V_{i+1} , $\alpha_{раб}$, α без дополнительной составляющей задания на ток

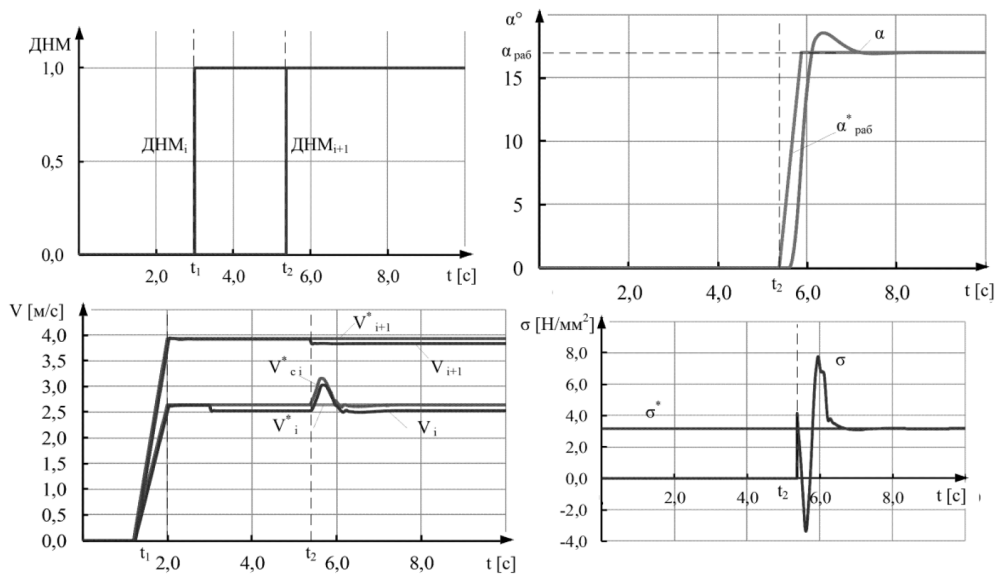


Рисунок 4. Графики ДНМ, σ , V_i , V_{i+1} , $\alpha_{раб}$, α с дополнительной составляющей задания на ток, равной 100 А

жуток, если расчётный момент петледержателя будет равен моменту нагрузки на его валу, то в соответствии с выражением (2) движения электропривода петледержателя не произойдёт. В то же время необходимо как можно быстрее вывести петледержатель на угол $\alpha_{раб}$.

Без дополнительных специальных воздействий со стороны САРН движение электропривода произойдёт только тогда, когда регулятор петли выдаст такую коррекцию задания на скорость (в данном случае) предыдущей по ходу прокатки клетки, при которой вращающий момент, развиваемый электроприводом петледержателя на валу, станет

больше реальной нагрузки, при этом натяжение, естественно, будет меньше заданного, а фактически будет образована «петля» металла в межклетевом промежутке. Такой тип прокатки недопустим, так как при потере натяжения в межклетевом промежутке полоса теряет устойчивость в валках, а это может привести к «забуриванию», простоя стана и браку продукции. Естественно, для быстрого подъёма петледержателя (не дожидаясь отработки рассогласования углов регулятором петли и выдачи положительного значения $k_{рпм}$ в задание на скорость клетки i , т.е. не дожидаясь ситуации, описанной выше) требуется определённый форсированный

момент, развиваемый электроприводом сразу же при входе полосы в клеть $i+1$. Самым простым способом форсировки момента электропривода петледержателя является добавление постоянной составляющей к заданию на ток — I_d^* (см. рисунок 2). Естественно, после достижения рамой петледержателя рабочего угла требуется отключить I_d^* , т.е. данная составляющая «работает» только при первоначальном подъёме петледержателя, в противном случае общий момент двигателя петледержателя $M_{ог}$ не будет соответствовать моменту нагрузки, коррекция задания на скорость предыдущей клетки $k_{пнт}$ будет рассчитана неверно, а это негативно скажется на натяжении металла в межклетевом промежутке, т.е. оно не будет соответствовать заданному. Вопрос о величине I_d^* является открытым, т.к. значение данной составляющей, с одной стороны, должно быть достаточным для скорейшего подъёма петледержателя, но, с другой стороны, не должно быть слишком велико, чтобы не получить «утяжек» полосы на голове из-за превышения натяжением полосы на участке предела текучести прокатываемого металла. Как правило, значение I_d^* подбирают опытным путём.

С помощью программного пакета MathLab 6.0 авторами было проведено математическое моделирование поведения электромеханической системы одного межклетевого промежутка с САРН косвенного типа, состоящей из электроприводов соседних прокатных клеток чистой группы многоклетевого стана горячей прокатки, петледержателя (с системами подчинённого регулирования), связанных прокатываемой полосой при заполнении ею межклетевого промежутка, т.е. последовательного входа полосы в клетки i и $i+1$.

Параметрами для моделирования были приняты следующие.

Основные параметры прокатываемой полосы: марка 08Ю, ширина $B=1600$ мм, толщина металла в межклетевом промежутке $h_i=24,57$ мм, заданное удельное натяжение $\sigma_{i,i+1} = 3,166$ МПа, температура прокатываемого металла $t = 850$ °С, заправочная линейная скорость рабочих валков клетки $V_i = 2,64$ м/с, линейная заправочная скорость рабочих валков клетки $i+1$ равна $V_{i+1} = 3,93$ м/с.

Основные параметры клеток и петледержателя: длина межклетевого промежутка $L_{i,i+1} = 6$ м; радиус рабочих валков $R = 0,4$ м; радиус опорных валков $R_{он} = 0,8$ м; длина рычага петледержателя $r = 0,6$ м. Заданный темп подъёма петледержателя при входе металла в клеть $i+1$ по задатчику интенсивности (рисунок 2) составляет 90 %.

В математической модели использовались следующие параметры электропривода петледержателя:

1. Электродвигатель МПС-75-25У4 (независимого возбуждения). $P_n = 75$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_{ян} = 475$ А, $n_n = 25$ об./мин; $(R_{я} + R_{он} + R_{ко}) = 0,0975$ Ом; $J\partial = 1100$ кг·м²;

2. Реверсивный преобразователь Simoreg DC Master 6RA70 ($U_d = 230$ В; $I_d = 800$ А).

Данные электроприводов клеток i и $i+1$:

Двухякорный электродвигатель постоянного тока типа 2МП-16000-65УЗ-М независимого возбуждения.

Паспортные данные электродвигателя:

$U_{н1} = U_{н2} = 930$ В; $I_{н1} = I_{н2} = 9100$ А;
 $(R_{я1} + R_{дп1} + R_{ко1})_{15^\circ} = 0,002755$ Ом;
 $(R_{я2} + R_{дп2} + R_{ко2})_{15^\circ} = 0,002655$ Ом; $n_n = 66$ об./мин;
 $n_{max} = 100$ об./мин; $I_{вн1} = I_{вн2} = 425$ А;
 $R_{об1(15^\circ)} = 0,249$ Ом; $R_{об2(15^\circ)} = 0,248$ Ом;
 $\Phi_{н1} = \Phi_{н2} = 0,868$ Вб.

Соединённые параллельно, работающие на один якорь (реверсивный и нереверсивный) преобразователи Simoreg DCC-S 930V/7100A с электроникой СМ (SW 2.26): реверсивный — группа вперёд/назад ($U_{дн} = 1050$ В; $I_{дн} = 7100/7100$ А) и нереверсивный преобразователь группа вперёд ($U_{дн} = 1050$ В; $I_{дн} = 7100$ А);

Тиристорный возбудитель Simoreg DCC-S 380V/500A с мастером DC (SW 2.25) ($U_c = 380$ В; $U_{дн} = 400$ В; $I_{дн} = 500$ А).

Результаты моделирования отображены на рисунках 3 и 4. В результате математического моделирования, исходя из принятых параметров прокатки и оборудования, выяснилось, что оптимальный переходный процесс при подъёме петледержателя обеспечивается при $I_d^* = 100$ А. Из графиков видно, что подъём петледержателя при $I_d^* = 0$ А, время переходного процесса составляет порядка 3 с, выход на рабочий угол петледержателя сопровождается большим перерегулированием (фактический угол достигает значения 27° при

заданном рабочем угле 16°), отклонение удельного натяжения $\sigma_{i,i+1}$ достигает -20 МПа (прокатка с петлёй) при заданном значении $\sigma_{i,i+1} = 3,166 \text{ МПа}$. Соответственно, характеристики переходного процесса при $I_d^* = 100 \text{ А}$

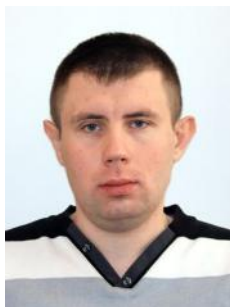
следующие: время процесса $\approx 2,3 \text{ с}$, (отклонение угла подъёма от заданного около 2°), отклонение удельного натяжения при переходном процессе от -4 МПа до 8 МПа .

Список литературы

1. Стефанович В.Л. Автоматизация непрерывных и полунепрерывных широкополосных станов горячей прокатки. М.: Metallurgija, 1975. 208 с.
2. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Математическое описание сил и моментов нагрузки петледержателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2010. № 4. С. 18–23.
3. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. М.: Metallurgija, 1975. 336 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1998. 704 с.
5. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Математическая модель системы управления электроприводом петледержателя // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2011. № 5. С. 73–82.

References

1. Stefanovich V.L. Avtomatizacija nepreryvnyh i poluneprreryvnyh shirokopolosnyh stanov gorjachej prokatki. M.: Metallurgija, 1975. 208 s.
2. Meshherjakov V.N., Didenko E.E. Matematicheskoe opisanie sil i momentov nagruzki petlederzhatelja // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2010. № 4. S. 18–23.
3. Druzhinin N.N. Nepreryvnye stany kak obyekt avtomatizacii. M.: Metallurgija, 1975. 336 s.
4. Kljuhev V.I. Teorija jelektroprivoda: uchebnik dlja vuzov. 2-e izd. pererab. i dop. M.: Jenergoatomizdat, 1998. 704 s.
5. Meshherjakov V.N., Didenko E.E. Matematicheskaja model' sistemy upravlenija jelektroprivodom petlederzhatelja // Zhurnal nauchnyh publikacij aspirantov i doktorantov. 2011. № 5. S. 73–82.



Андреанов А. В.
Andrianov A. V.
инженер-конструктор,
АО «Таганрогский научно-
исследовательский
институт связи»,
г. Таганрог,
Российская Федерация



Зикий А. Н.
Zikiy A. N.
кандидат технических
наук, старший научный
сотрудник, доцент кафедры
«Информационная безопасность
телекоммуникационных
систем», ФГАОУ ВО «Южный
федеральный университет»,
г. Таганрог,
Российская Федерация



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

УДК 621.372

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО ФИЛЬТРА НА ПОЛУВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРАХ

Полосовой фильтр на входе приемника является важной составной частью, так как обеспечивает избирательность приемника по зеркальному каналу, каналу прямого прохождения на промежуточную частоту и другим побочным каналам приема.

Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования макета фильтра с полосой пропускания от 591 до 625 МГц. Показано, что минимальные потери в полосе пропускания не превышают 3 дБ, максимальные потери в полосе пропускания составляют 5 дБ по уровню минус 2 дБ от максимума. Фильтр имеет ложную полосу пропускания на второй гармонике. Потери при отстройке на 70 МГц вниз от центральной частоты составляют 75–80 дБ. Потери при отстройке вверх на 70 МГц от центральной частоты составляют около 50 дБ.

Проведено моделирование фильтра в среде Microwave Office, получены амплитудно-частотные характеристики фильтра в ближней и дальней зонах.

Представлены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики фильтра в ближней и дальней зонах. Эксперимент проводился с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи «Обзор-103».

Амплитудно-частотная характеристика имеет значительную несимметричность, поэтому фильтр рекомендуется использовать в приемнике с нижней настройкой гетеродина. Фильтр можно применять также в тракте промежуточной частоты СВЧ приемника.

Конструктивно фильтр представляет собой подложку из поликора размерами 48 x 60 x 1 мм, на которой размещены пять полуволновых резонаторов, свернутых вдвое. Для подключения к измерительной аппаратуре фильтр имеет два коаксиально-полосковых перехода типа СРГ50-751ФВ. Выбор подложки из поликора и свернутые резонаторы обеспечили малые габариты и вес фильтра. Если разместить подложку в герметичном корпусе, то фильтр можно будет эксплуатировать в жестких условиях. Кроме того, фильтр допускает размещение в крупном узле без применения соединителей.

Ключевые слова: микрополосковый полосовой фильтр, моделирование, эксперимент, амплитудно-частотная характеристика, ложная полоса.

MODELING AND EXPERIMENTAL STUDY OF MICROSTRIP FILTER ON HALF-WAVE RESONATORS

Bandpass filter at the receiver input is an important part as it provides the selectivity on the mirror channel, the channel of direct transmission on the intermediate frequency and other side channels of reception.

The results of modeling and experimental studies of the prototype of the filter with a bandwidth from 591 to 625 MHz are presented. It is shown that the minimum loss in the bandpass do not exceed 3 dB, the maximum loss in the bandpass is 5 dB at level minus 2 dB of the maximum. The filter has false bandwidth on the second harmonic. Offset losses by 70 MHz down from the center frequency is 75–80 dB. Offset losses by 70 MHz up from the center frequency is about 50 dB.

The simulation of the filter did in the Microwave Office environment. The obtained amplitude-frequency characteristics of the filter in the near-field and far-field are presented in the article.

The amplitude-frequency characteristics of the filter in the near-field and far-field are presented. The experiment was conducted with the help of the meter of complex coefficients of the transfer «Obzor-103».

The amplitude-frequency characteristic has a significant asymmetry, so the filter is recommended for use in the receiver with the lower setting of the oscillator. A filter can be applied also to the tract intermediate frequency of the UHF receiver.

Structurally, the filter is an alumina substrate with size 48 x 60 x 1 mm, on which are placed five half-wave resonators folded in half. To connect to the measuring apparatus, the filter has two coaxial-strip junction SRG50-751FV. The choice of the alumina substrate and folded resonators provided small dimensions and weight of the filter. If you place a substrate in a hermetic enclosure, the filter can be used in harsh environments. In addition, the filter can be place in a large module without the use of connectors.

Key words: microstrip bandpass filter, modeling, experiment, amplitude-frequency characteristic, false band.

Целью настоящей работы является моделирование и экспериментальное исследование микрополоскового фильтра, к которому предъявляются следующие требования:

- центральная частота 608 МГц;
- ширина полосы пропускания не менее 20 МГц;
- потери в полосе пропускания не более 5 дБ;
- неравномерность потерь в полосе пропускания не более $\pm 1,5$ дБ;
- заграждение при отстройке от центральной частоты на ± 70 МГц не менее 50 дБ.

Расчет фильтра проводился по методике, изложенной в книге [1]. Результаты расчета приведены в таблице 1. Следующий шаг — моделирование — проводился в среде Microwave Office [2].

На рисунке 1 приведена модель фильтра. На рисунке 2 показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра. Она соответствует предъявленным требованиям.

Таблица 1. Геометрические размеры фильтра

Ширина полосков, мм	Ширина зазоров, мм
W1 = W6 = 0,961	S1 = S6 = 0,302
W2 = W5 = 1,195	S2 = S5 = 1,57
W3 = W4 = 1,207	S3 = S4 = 2,06

По данным таблицы 1 был изготовлен макет фильтра, фото которого представлено на рисунке 3.

Фильтр размещен на подложке из поликора размерами 48 x 60 x 1 мм, $\epsilon = 9,8$. Для испытаний фильтра напаяны три стенки из стеклотекстолита. На двух противоположных стенках установлены коаксиально-микрополосковые переходы типа СРГ50-751ФВ (ряд IX по ГОСТ13317-89) [3]. Напыление проводящего рисунка трехслойное: нихром, медь, олово-висмут [4].

Экспериментальное исследование фильтра проводилось на установке, содержащей измеритель комплексных коэффициентов передачи «Обзор-103» [5], ноутбук, комплект кабелей и переходов.

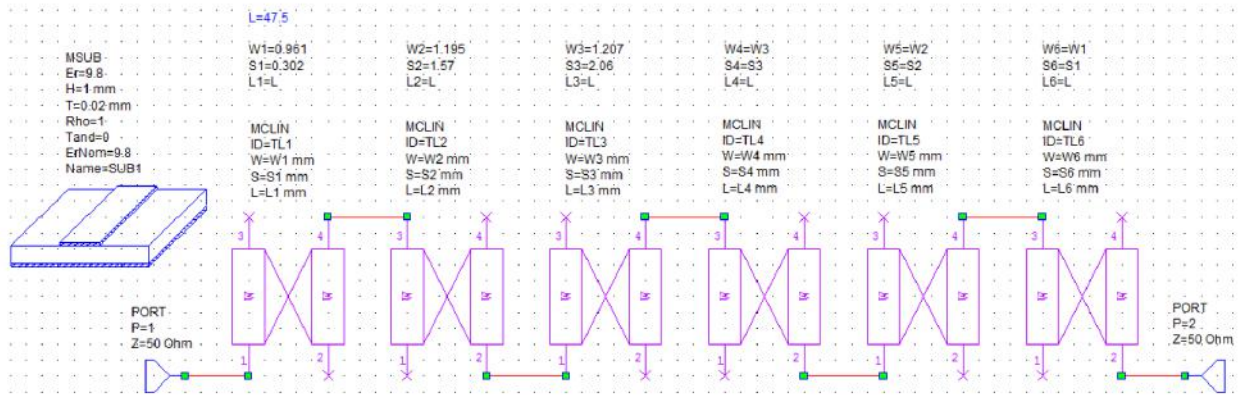


Рисунок 1. Модель микрополоскового фильтра

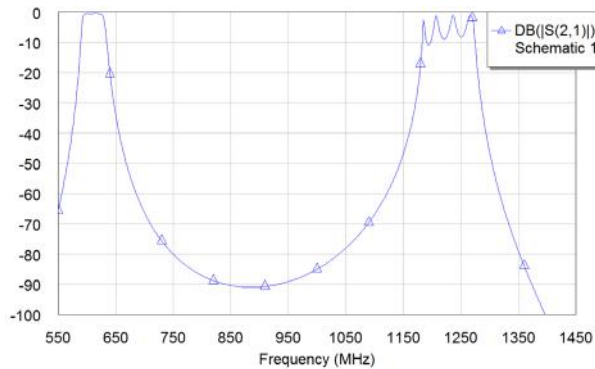


Рисунок 2. АЧХ микрополоскового фильтра



Рисунок 3. Фото макета фильтра

В первом эксперименте снята АЧХ фильтра в полосе частот от 550 до 700 МГц (рисунок 4). Из рисунка 4 видно, что минимальные потери в полосе пропускания около 3 дБ, нижняя граничная частота 591 МГц, верхняя граничная частота 625 МГц.

Во втором эксперименте фиксировалась АЧХ фильтра в полосе от 0,3 до 1300 МГц (полная полоса прибора «Обзор-103»). Результат показан на рисунке 5. Из рисунка 5 видно, что избирательность на нижнем скате АЧХ значительно выше, чем на верхнем скате, примерно на 25–30 дБ. Фильтр имеет ложную полосу пропускания на удвоенной частоте (около 1100–1200 МГц). Потери в

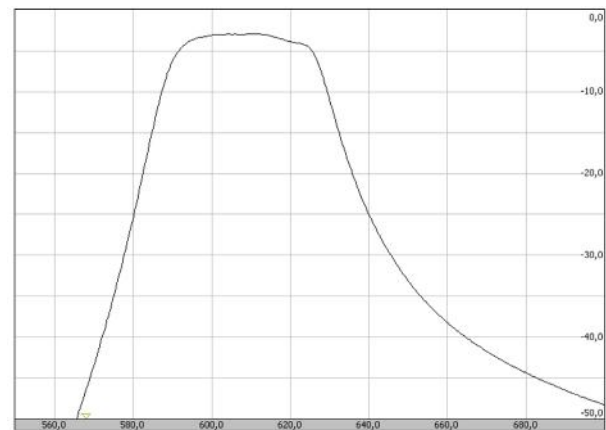


Рисунок 4. АЧХ фильтра в ближней зоне

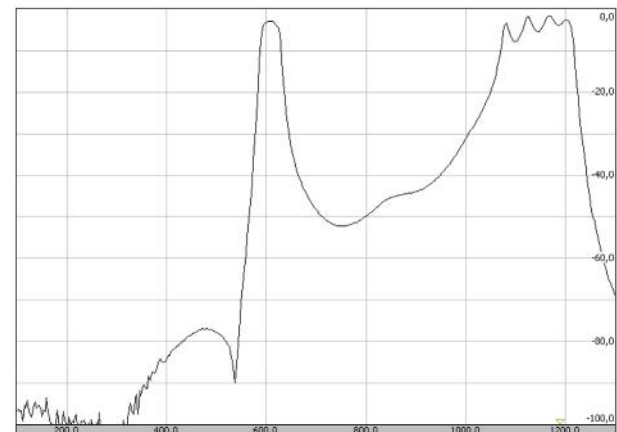


Рисунок 5. АЧХ фильтра в дальней зоне

ложной полосе сопоставимы с потерями в истинной полосе пропускания.

Заключение

1. АЧХ фильтра очень несимметрична. Нижний скат АЧХ крут, а верхний — полог. Потери при отстройке на 70 МГц вниз от центральной частоты составляют 75–80 дБ. Потери при отстройке на 70 МГц вверх от центральной частоты составляют около 50 дБ.
2. Фильтр имеет ложную полосу на второй гармонике. Потери в ложной полосе

имеют ту же величину, что и в полезной полосе пропускания.

3. Основные параметры фильтра:
- центральная частота 608 МГц;

- ширина полосы пропускания на уровне минус 2 дБ от максимума 34 МГц;
- число полуволновых резонаторов 5;
- потери в полосе пропускания не более 5 дБ.

Список литературы

1. Зелях Э.В., Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Брилон В.С. Миниатюрные устройства УВЧ и ОВЧ диапазонов на отрезках линий. М.: Радио и связь, 1988. 136 с.
2. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. М.: Солон-Пресс, 2003. 496 с.
3. Джурицкий К.В. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. М.: Техносфера, 2006. 216 с.
4. Климачев И.И., Иовдальский В.А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. М.: Техносфера, 2006. 352 с.
5. Обзор-103. Измеритель комплексных коэффициентов передачи. Руководство по эксплуатации РЭ 6687-028-21477812-2004. 95 с.

References

1. Zeljah Je.V., Fel'dshtejn A.L., Javich L.R., Brilon V.S. Miniaturjurnye ustrojstva UVCh i OVCh diapazonov na otrezkah linij. M.: Radio i svjaz', 1988. 136 s.
2. Razevig V.D., Potapov Ju.V., Kurushin A.A. Proektirovanie SVCh ustrojstv s pomoshh'ju Microwave Office. M.: Solon-Press, 2003. 496 s.
3. Dzhurinskij K.B. Miniaturjurnye koaksial'nye radiokomponenty dlja mikrojelektroniki SVCh. M.: Tehnosfera, 2006. 216 s.
4. Klimachev I.I., Iovdal'skij V.A. SVCh GIS. Osnovy tehnologii i konstruirovaniya. M.: Tehnosfera, 2006. 352 s.
5. Obzor-103. Izmeritel' kompleksnyh koeficientov peredachi. Rukovodstvo po jekspluatacii RJe 6687-028-21477812-2004. 95 s.



Яруллин Р. Б.
Yarullin R. B.

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



Мулюков А. Р.
Muļjukov A. R.

магистрант кафедры «Управление и сервис в технических системах» Института экономики и сервиса, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.313.33

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВИБРАТОР ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВИБРОМАШИНЫ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ ДЕБАЛАНСОВ

Вибрационные машины в силу своих достоинств нашли широкое применение во всех областях техники и продолжают бурно развиваться, осваивая все новые сферы (микробиология, космическая технология, создание новых материалов), и расцениваются сейчас как основа технологии будущего. По режиму работы вибромашины бывают дорезонансные, резонансные и зарезонансные. Предпочтение исследователями отдается зарезонансным вибромашинам, у которых амплитуда колебаний рабочего органа не зависит от технологической нагрузки обрабатываемого материала, среды. Многочисленные исследования на вибромашинах показывают, что основными кинематическими параметрами вибрации, определяющими эффективность воздействия на материалы и среду, считаются частота и амплитуда колебаний рабочего органа. Подчеркивается, что процесс протекает лучше при большой частоте, но с малой амплитудой. В то же самое время с изменением параметров материалов, среды (влажности, плотности, подачи, поступательной скорости, соотношения компонентов смеси материалов) для поддержания качества процесса требуется корректировка частоты колебаний, причем рациональные значения частоты и амплитуды колебаний рабочего органа взаимосвязаны по гиперболическим зависимостям и должны плавно регулироваться. Регулирование частоты колебаний рабочего органа целесообразно осуществлять электрическим способом приводным асинхронным двигателем за счет изменения частоты тока полупроводниковыми преобразователями. Одновременное регулирование амплитуды колебаний рабочего органа следует проводить автоматическим инерционным вибратором с выдвигающимися в зависимости от скорости подпружиненными противодебалансами. Установлено, что разработанный вибратор вибромашины с вертикальной осью вращения двух дебалансов ограничивает резонансные амплитуды в пределах эксплуатационных требований. Однако такая вибромашинка полностью не удовлетворяет требованиям регулирования скорости по гиперболической зависимости путем изменения расстояния по вертикали между дебалансами и угла взаимного их расположения, поэтому в настоящей работе предусматривается обеспечить необходимый закон автоматического регулирования амплитуды колебаний установкой подпружиненных противодебалансов. Для этой конструкции вибромашины получена система уравнений, позволяющая при известных конструктивно-кинематических параметрах вибромашины и технологических параметрах вибропроцесса рассчитать массу и радиус центра масс в состоянии покоя подвижных дебалансов, вибратора.

Ключевые слова: вибромашинка, амплитуда, частота, дебаланс, скоростной фактор, масса дебаланса, радиус массы.

AUTOMATIC VIBRATORS FOR FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC VIBRATORS WITH VERTICAL ROTATION AXIS OF THE UNBALANCE

Vibrating machines because of its advantages are widely used in all fields of technology and continue to develop rapidly, mastering new areas (microbiology, space technology, new materials), and is now regarded as the basis of future technologies. In operating mode vibrator are after resonance, resonance and before resonance. Preference is given to researchers after resonance vibrator in which the amplitude of the vibrations of the working body is independent of the process load of the processed material, environment. Numerous studies on the vibrator show that the main kinematic vibration parameters that determine the effectiveness of the impact of materials and environment, considered the frequency and amplitude of oscillations of the working body. It is emphasized that the process proceeds best at high frequency but low amplitude. At the same time with the change of parameters of materials, environments (humidity, density, flow, forward speed, the ratio of mixture components materials) to maintain required process quality adjustment of the oscillation frequency. And the rational values of frequency and amplitude of the vibrations of the working body are interconnected by a hyperbolic dependence and should be regulated smoothly. Frequency regulation of working body vibrations expedient to electrically driven induction motor by changing the frequency of the current semiconductor converters. The simultaneous control of the amplitude of the vibrations of the working body — to carry out automatic inertial vibrator with retractable depending on the speed, spring-loaded against unbalance. It was found that the developed vibrator with a vertical axis of rotation of the two eccentric weight limits the amplitude of the resonance within the operating requirements. However, such a vibrator does not fully satisfy the requirements of speed regulation by hyperbolic dependence by changing the vertical distance between the unbalance and angle of their mutual arrangement. Therefore, in the present work involves the installation of spring-loaded to provide the necessary legislation against unbalance automatic adjustment of the oscillation amplitude. For this design vibrator, a system of equations that allows, under certain structural-kinematic parameters of the vibrator and technological parameters vibratory process, calculate the mass and radius of the center of mass at rest moving unbalance vibrator.

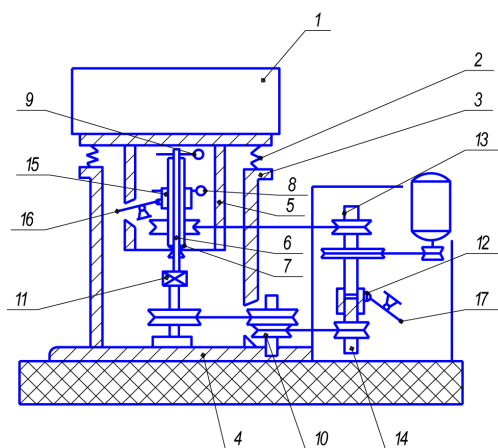
Key words: vibrator, amplitude, frequency, unbalance, speed factor, unbalance mass, mass range.

Вибрационная техника (ВТ) в силу универсальности и других неоспоримых преимуществ находит все большее применение в технологических процессах в самых различных областях деятельности человека [1–17], поэтому в настоящее время ВТ по праву считается техникой будущего. ВТ бывает дорезонансного, резонансного и зарезонансного режимов работы [1–5, 7–13]. Наибольшее распространение нашли зарезонансные и резонансные вибромашины (ВМ). Основными параметрами эффективной виброобработки материалов (сред) являются частота и амплитуда колебаний рабочих органов (РО), при этом малой частоте соответствует большая амплитуда, большой частоте — малая амплитуда колебаний РО [1–14, 16, 17]. Между рациональными значениями амплитуды и частоты колебаний существует гиперболическая вза-

имосвязь [10–12, 16–22], в то же время требуется одновременное плавное регулирование обоих параметров кинематического режима [10–12, 16, 17].

Установлено [10, 11, 19–22], что среди приводных двигателей ВМ преимущественное применение нашли асинхронные двигатели с механическим способом регулирования скорости изменения передаточного отношения промежуточной передачи. Регулирование амплитуды колебаний при этом осуществляется в основном вручную изменением массы дебалансов.

В более чем полутора сотнях известных исследованиях технологических процессов ВМ в АПК [10, 12, 16–18] установлено, что в качестве источника вибрации в основном (более 63 %) используются инерционные вибраторы, в 12,1 % — эксцентриковые, в 9,73 % — электромагнитные и т.д.



1 — вибростол с рабочим органом; 2 — пружины; 3 — станина; 4 — основание; 5 — вибратор; 6 — гибкий вал; 7 — полый вал; 8, 9 — дебалансы; 10 — вариатор; 11, 12 — муфты; 13 — вал привода верхнего дебаланса; 14 — вал привода нижнего дебаланса; 15 — каретка; 16, 17 — рычаги

Рисунок 1. Вибросепаратор

Такое положение объясняется тем, что инерционные вибраторы [1–18] считаются наиболее универсальными: они просты по конструкции, имеют низкую стоимость, на них просто задаются амплитуда, частота и различные законы колебаний, обладают широким диапазоном рабочих частот, развивают большие возмущающие силы при небольших габаритах и массе, удобны при регулировании частоты, создают относительно небольшой шум. Недостатками инерционных вибраторов являются: сравнительно небольшой ресурс, трудность независимого регулирования частоты и амплитуды вынуждающей силы, возникновение значительных динамических нагрузок при переходе через область резонанса и увеличенное время пуска и остановки. Указанные недостатки в основном устраняются применением автоматических вибраторов в сочетании с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом.

Амплитуда колебаний РО резонансных ВМ [8–11] не зависит от частоты колебаний и регулируется изменением как массы дебаланса m_0 , так и радиуса центра масс r вибратора и может изменяться с изменением колеблющейся массы m_* . Проведенные [23] опыты показали, что колеблющаяся масса m_* не оказывает заметного влияния на амплитуду колебаний РО ВМ и ей можно пренебречь.

По технологическим требованиям для резонансных ВМ более подходят вибраторы, обеспечивающие как устранение резонансных амплитуд, так и автоматическое уменьшение амплитуды колебаний по гиперболической зависимости по мере возрастания угловой скорости [10, 11, 18, 20, 22–24, 25]. Наиболее эффективно это достигается изменением радиуса центра массы подвижного противовеса, который поджат к оси вращения пружиной с нелинейной характеристикой жесткости.

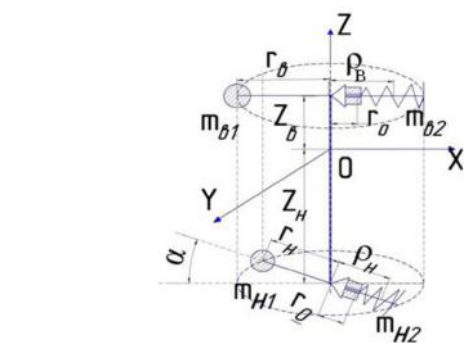


Рисунок 2. Вибратор с вертикальной осью вращения неподвижных и подвижных противовесов

Для решения указанных задач нами был разработан регулируемый вибратор ВМ с вертикальной осью вращения дебалансов [26–28].

Машина (рисунок 1) имеет станину 3, на опорной плите которой равномерно по окружности расположены пружины сжатия 2. На пружинах установлен вибростол 1 с РО и снизу прикреплен одновальный двухдебалансный вибратор 5 с вертикальной осью вращения дебалансов 8 и 9. Вибратор 5 содержит телескопический вал, состоящий из сплошной 6 и полый 7 частей, которые могут вращаться относительно друг друга. Наружная поверхность полого вала 7 имеет шлицы. На сплошном валу 6 около центра тяжести вибратора установлен верхний дебаланс 9. На шлицы полого вала 7 посажена каретка 15 с нижним дебалансом 8. Привод дебалансов 8 и 9 индивидуальный, осуществляется через клиноременные передачи, вариатор 10 и муфту 11. Приводы обоих дебалансов кинематически соединены между собой посредством жесткой муфты 12, которая сопряжена с валом 13 привода нижнего дебаланса 8 посредством шлицевого соединения, а с валом 14 привода верхнего дебаланса 9 — посредством несамотормозящейся винтовой передачи.

Муфта 12 и каретка 15 имеют возможность перемещения вдоль сопрягаемых с ними валов 13 и 7 с помощью рычагов 16 и 17 или иных

механизмов. В каждом из положений муфта 12 и каретка 15 фиксируются. Перед пуском муфта 12 с помощью рычага 17 перемещается по шлицевому соединению вала 13. При этом поступательное перемещение муфты 12 преобразуется посредством несамотормозящейся винтовой передачи в угловое перемещение 14, которое передается дебалансу 9. Перемещение муфты 12 осуществляют до установки дебаланса 9 в положение, диаметрально противоположное положению нижнего дебаланса 8. Дебаланс 8 с кареткой 15 посредством рычага 16 перемещается вверх до упора с дебалансом 9. Тем самым дебалансы вибратора взаимно уравнивают друг друга как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, максимально уменьшая при этом момент инерции вибратора. После прохождения резонанса при достижении рабочей частоты колебаний РО рычагами 16 и 17 дебалансы 8 и 9 устанавливаются в обратной последовательности относительно друг друга в положение, соответствующее требуемому закону и амплитуде колебаний РО.

Во время работы с изменением состояния сепарируемого материала происходит ухудшение качества сепарации. Для поддержания качества сепарации регулируют амплитуду вертикальных колебаний, при необходимости и траекторию движения частиц на РО путем перемещения рычагов 16 и 17 в соответствующие положения с последующей их фиксацией.

При остановке ВМ нижний дебаланс 8 перемещается до упора к верхнему дебалансу 9, и только после этого рычагом 17 производится их уравнивание установкой в диаметрально противоположные стороны до полного исчезновения вибрации РО, т.е. до максимального уменьшения момента инерции вибратора от дебалансов. Затем отключают двигатель ВМ.

Таким образом, регулируя угол взаимного расположения дебалансов и расстояние между ними в период пуска и остановки, ограничивают резонансные амплитуды колебаний, что повышает срок службы ВМ и снижает потери энергии в переходных процессах, а в процессе работы с изменением состояния сепарируемой сыпучей смеси

регулируют на ходу как закон, так и амплитуду колебаний РО, что позволяет поддерживать качественный режим сепарации.

Для этой ВМ рассмотрена возможность регулирования амплитуды колебаний РО в рабочем режиме с разработанным вибратором по гиперболическому закону [28] и оценена степень ограничения ее при прохождении резонансной зоны ВМ с поворотными дебалансами.

При этом установлено, что ВМ с предложенной конструкцией вибратора:

1. обеспечивает плавное прохождение резонанса, ограничивая амплитуду колебаний в пределах эксплуатационных требований (в 2, 3 раза при допустимых 2–4 раза), что, в свою очередь, исключает необходимость применения асинхронных двигателей с повышенным пусковым моментом и их торможения при остановке;

2. регулирование амплитуды колебаний по гиперболическому закону изменением угла взаимного расположения дебалансов не осуществимо; уменьшением расстояния между дебалансами — только до 82 % рабочего диапазона скоростей, снижая при этом угол направленности колебаний.

В связи с этим актуальна разработка автоматического вибратора для рассматриваемой ВМ с регулируемой амплитудой колебания по гиперболической зависимости для всего рабочего диапазона скоростей.

Для ВМ с вертикальной осью вращения двух дебалансов вибратора для центральной плоскости РО решением дифференциальных уравнений движения получен [8, 9] следующий закон движения.

Слагаемые вертикальной и горизонтальной амплитуды колебания РО при наличии только неподвижных дебалансов имеют вид (рисунок 2):

$$a_{\text{вер}} = J_y^{-1} x \sqrt{m_6^2 r_6^2 z_6^2 + m_n^2 r_n^2 z_n^2 + 2m_6 r_6 z_6 m_n r_n z_n \cos \alpha}; \quad (1)$$

$$a_{\text{гор}} = m_x^{-1} \sqrt{m_6^2 r_6^2 + m_n^2 r_n^2 + 2m_6 r_6 m_n r_n \cos \alpha}, \quad (2)$$

где J_y — момент инерции вибрирующей части относительно центральной горизонтальной оси y ;

x — расстояние по горизонтали от вертикальной оси;

α — угол взаимного расположения дебалансов вибратора;

m_B и r_B — соответственно масса и радиус центра массы верхнего дебаланса;

m_H и r_H — соответственно масса и радиус центра массы нижнего дебаланса;

z_B и z_H — соответственно расстояние от центральной плоскости вдоль вертикальной оси Z до плоскости вращения верхнего и нижнего дебалансов;

m_* — масса колеблющейся части.

Как было установлено [10, 11, 18, 22, 24, 25], уменьшения амплитуды колебаний РО с увеличением частоты колебаний по гиперболическому закону можно достигнуть подвижным дебалансом, установленным диаметрально противоположно неподвижному дебалансу (рисунок 2), поджатым пружиной с нелинейной характеристикой жесткости.

Тогда выражения вертикальных и горизонтальных слагаемых амплитуды колебаний для вибратора с неподвижным и выдвигающимся дебалансами имеют вид:

$$a_{\text{вер}} = J_y^{-1} x [(m_{\text{в}1} r_{\text{в}1} - m_{\text{в}2} \rho_{\text{в}})^2 z_{\text{в}}^2 + (m_{\text{н}1} r_{\text{н}1} - m_{\text{н}2} \rho_{\text{н}})^2 z_{\text{н}}^2 + 2(m_{\text{в}1} r_{\text{в}1} - m_{\text{в}2} \rho_{\text{в}})(m_{\text{н}1} r_{\text{н}1} - m_{\text{н}2} \rho_{\text{н}}) z_{\text{в}} z_{\text{н}} \cos \alpha]^{1/2} = A \sin \varepsilon; \quad (3)$$

$$a_{\text{гор}} = m_*^{-1} [(m_{\text{в}1} r_{\text{в}1} - m_{\text{в}2} \rho_{\text{в}})^2 + (m_{\text{н}1} r_{\text{н}1} - m_{\text{н}2} \rho_{\text{н}})^2 + 2(m_{\text{в}1} r_{\text{в}1} - m_{\text{в}2} \rho_{\text{в}})(m_{\text{н}1} r_{\text{н}1} - m_{\text{н}2} \rho_{\text{н}}) \cos \alpha]^{1/2} = A \cos \varepsilon, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{н}}$ соответственно радиусы центра масс верхнего и нижнего выдвигающихся дебалансов;

$\varepsilon = \arctg \frac{a_{\text{вер}}}{a_{\text{гор}}}$ — угол направленности колебаний;

A — полная амплитуда колебаний, равная

$$A = \sqrt{a_{\text{гор}}^2 + a_{\text{вер}}^2}.$$

В результате полная амплитуда колебаний РО равна:

$$A = \sqrt{a_{\text{вер}}^2 + a_{\text{гор}}^2} = \{ J_y^{-2} x^2 [(m_{\text{в}1} r_{\text{в}1} - m_{\text{в}2} \rho_{\text{в}})^2 z_{\text{в}}^2 + (m_{\text{н}1} r_{\text{н}1} - m_{\text{н}2} \rho_{\text{н}})^2 z_{\text{н}}^2 + 2(m_{\text{в}1} r_{\text{в}1} - m_{\text{в}2} \rho_{\text{в}})(m_{\text{н}1} r_{\text{н}1} - m_{\text{н}2} \rho_{\text{н}}) z_{\text{в}} z_{\text{н}} \cos \alpha] + m_*^{-2} [(m_{\text{в}1} r_{\text{в}1} - m_{\text{в}2} \rho_{\text{в}})^2 + (m_{\text{н}1} r_{\text{н}1} - m_{\text{н}2} \rho_{\text{н}})^2 + 2(m_{\text{в}1} r_{\text{в}1} - m_{\text{в}2} \rho_{\text{в}})(m_{\text{н}1} r_{\text{н}1} - m_{\text{н}2} \rho_{\text{н}}) \cos \alpha] \}^{1/2}. \quad (5)$$

Из технологических соображений расстояние x от центра РО по оси ОХ принимаем равным половине радиуса R РО, а также учитывая, что обычно [8, 9], $r_{\text{в}} = r_{\text{н}} = r$, $\rho_{\text{в}} = \rho_{\text{н}} = \rho$ и регулирование осуществляется по гипербо-

лическому закону $A = V/\omega$, где V — скоростной фактор для определенных групп ВМ [10, 12, 16, 17], получим

$$A^2 = J_y^{-2} \frac{R^2}{4} [(m_{\text{в}1} r - m_{\text{в}2} \rho)^2 z_{\text{в}}^2 + (m_{\text{н}1} r - m_{\text{н}2} \rho)^2 z_{\text{н}}^2 + 2(m_{\text{в}1} r - m_{\text{в}2} \rho)(m_{\text{н}1} r - m_{\text{н}2} \rho) z_{\text{в}} z_{\text{н}} \cos \alpha] + m_*^{-2} [(m_{\text{в}1} r - m_{\text{в}2} \rho)^2 + (m_{\text{н}1} r - m_{\text{н}2} \rho)^2 + 2(m_{\text{в}1} r - m_{\text{в}2} \rho)(m_{\text{н}1} r - m_{\text{н}2} \rho) \cos \alpha] = \frac{V^2}{\omega^2}. \quad (6)$$

Полученное выражение громоздкое и вызывает определенные трудности при решении. С целью упрощения решения заменим статические моменты неподвижного и подвижного дебалансов их эквивалентными значениями $m_{\text{в}1} r - m_{\text{в}2} \rho = (m r)_{\text{вЭК}}$ и $m_{\text{н}1} r - m_{\text{н}2} \rho = (m r)_{\text{нЭК}}$.

Исходя из соображения компактности конструкции вибратора, учитывая $a_{\text{гор}} = A \cos \varepsilon$, $a_{\text{вер}} = A \sin \varepsilon$, выразив статические моменты через их экстремальные значения для граничных зон регулирования имеем

$$(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{max}} = m_{\text{в}1} r - m_{\text{в}2} \rho_{\text{min}} = m_{\text{в}1} r - m_{\text{в}2} r_0; \quad (7)$$

$$(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{min}} = m_{\text{в}1} r - m_{\text{в}2} \rho_{\text{max}} = r(m_{\text{в}1} - m_{\text{в}2}); \quad (8)$$

$$(m r)_{\text{нЭК}}^{\text{max}} = m_{\text{н}1} r - m_{\text{н}2} \rho_{\text{min}} = m_{\text{н}1} r - m_{\text{н}2} r_0; \quad (9)$$

$$(m r)_{\text{нЭК}}^{\text{min}} = m_{\text{н}1} r - m_{\text{н}2} \rho_{\text{max}} = r(m_{\text{н}1} - m_{\text{н}2}), \quad (10)$$

где радиус центра масс подвижных дебалансов при $0 \leq \omega \leq \omega_{\text{раб}}^{\text{min}}$.

На основании вышеизложенного, учитывая, что для граничных зон ($\omega^{\text{min}} \leq \omega \leq \omega^{\text{max}}$) имеет место $A^{\text{max}} = \frac{V}{\omega_{\text{min}}}$ и $A^{\text{min}} = \frac{V}{\omega_{\text{max}}}$ [10, 12], имеем:

$$a_{\text{вер}}^{\text{max}} = \frac{V}{\omega_{\text{min}}} \sin \varepsilon = \frac{R}{2J_y} \{ [(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{max}}]^2 z_{\text{в}}^2 + [(m r)_{\text{нЭК}}^{\text{max}}]^2 z_{\text{н}}^2 + 2[(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{max}}][(m r)_{\text{нЭК}}^{\text{max}}] z_{\text{в}} z_{\text{н}} \cos \alpha \}^{1/2}; \quad (11)$$

$$a_{\text{вер}}^{\text{min}} = \frac{V}{\omega_{\text{max}}} \sin \varepsilon = \frac{R}{2J_y} \{ [(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{min}}]^2 z_{\text{в}}^2 + [(m r)_{\text{нЭК}}^{\text{min}}]^2 z_{\text{н}}^2 + 2[(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{min}}][(m r)_{\text{нЭК}}^{\text{min}}] z_{\text{в}} z_{\text{н}} \cos \alpha \}^{1/2}; \quad (12)$$

$$a_{\text{гор}}^{\text{max}} = \frac{V}{\omega_{\text{min}}} \cos \varepsilon = m_*^{-1} \{ [(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{max}}]^2 + [(m r)_{\text{нЭК}}^{\text{max}}]^2 + 2(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{max}} (m r)_{\text{нЭК}}^{\text{max}} \cos \alpha \}^{1/2}; \quad (13)$$

$$a_{\text{гор}}^{\text{min}} = \frac{V}{\omega_{\text{max}}} \cos \varepsilon = m_*^{-1} \{ [(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{min}}]^2 + [(m r)_{\text{нЭК}}^{\text{min}}]^2 + 2(m r)_{\text{вЭК}}^{\text{min}} (m r)_{\text{нЭК}}^{\text{min}} \cos \alpha \}^{1/2}. \quad (14)$$

Выразим экстремальные эквивалентные статические моменты через переменные в зависимости от угловой скорости

$$v = (m r)_{вэк}^{max}; \quad a = (m r)_{вэк}^{min}; \quad c = (m r)_{нэк}^{max}; \quad d = (m r)_{нэк}^{min}.$$

Тогда система из четырех уравнений имеет вид

$$z_B^2 v^2 + z_H^2 c^2 + 2z_B z_H v c \cos \alpha = 4V^2 J_y^2 \omega_{min}^{-2} R^{-2} \sin^2 \varepsilon, \quad (15)$$

$$z_B^2 a^2 + z_H^2 d^2 + 2z_B z_H a d \cos \alpha = 4V^2 J_y^2 \omega_{max}^{-2} R^{-2} \sin^2 \varepsilon, \quad (16)$$

$$v^2 + c^2 + 2v c \cos \alpha = V^2 m_*^2 \omega_{min}^{-2} \cos^2 \varepsilon, \quad (17)$$

$$a^2 + d^2 + 2a d \cos \alpha = V^2 m_*^2 \omega_{max}^{-2} \cos^2 \varepsilon. \quad (18)$$

На основании полученных зависимостей при известных конструктивно-кинематических параметрах вибромашины и технологических параметрах вибропроцесса можно определить искомые статические эквивалентные моменты дебалансов автоматического вибратора для граничных режимов работы

$$(m r)_{вэк}^{max}, (m r)_{вэк}^{min}; (m r)_{нэк}^{max}, (m r)_{нэк}^{min}.$$

Список литературы

1. Вибрации в технике: справочник / Под ред. В.Н. Геломей. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1–4.
2. Дубровский А.А. Вибрационная техника в сельском хозяйстве. М.: Машиностроение, 1968. 204 с.
3. Спиваковский А.О., Гончаревич И.Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. М.: Машиностроение, 1972. 328 с.
4. Быховский И.И. Прогресс вибрационной техники и задачи научных исследований // Вибрационная техника: матер. науч.-техн. конф. М., 1966. С. 5–11.
5. Повидайло В.А., Силян Р.И., Щигель В.А. Вибрационные устройства в машиностроении. М.-Киев: Машгиз, 1962. 112 с.
6. Гладков С.Н. Промышленные вибраторы // Применение вибротехники в горном деле: сб. ст. М.: Госгортехиздат, 1960. С. 296–302.
7. Гончаревич И.Ф., Земсков В.Д., Корешков В.И. Вибрационные грохоты и конвейеры. М.: Госгортехиздат, 1960. 216 с.
8. Заика П.М. Вибрационные зерноочистительные машины. Теория и расчет. М.: Машиностроение, 1967. 144 с.
9. Заика П.М. Динамика вибрационных зерноочистительных машин. М.: Машиностроение, 1974. 278 с.

По соотношениям (7–10) можно определить искомые массы подвижных дебалансов $m_{н2}$ и $m_{в2}$ при принятом по конструктивным соображениям радиусе центра масс r_0 подвижных дебалансов в состоянии покоя.

Выводы

С целью обеспечения необходимого закона автоматического регулирования амплитуды колебаний установкой подпружиненных противодебалансов разработана система уравнений, позволяющая при известных конструктивно-кинематических параметрах вибромашины и технологических параметрах вибропроцесса рассчитать массу и радиус центра масс в состоянии покоя подвижных дебалансов, вибратора.

10. Яруллин Р.Б. Повышение эффективности асинхронного электровибропривода с регулируемыми параметрами в технологических процессах АПК (на примере виброзерноочистительных машин): дисс. ... д-ра техн. наук — 05.20.02. Челябинск, 2011. 287 с.
11. Яруллин Р.Б. Динамика вибрационных зерноочистительных машин (Проблемы электропривода). Уфа: Уфимск. гос. академия экономики и сервиса, 2007. 189 с.
12. Возмилов А.Г., Яруллин Р.Б. Вибрационные технологии в процессах АПК // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 9. С. 5–6.
13. Блехман И.И. Вибрационные машины с механическими возбудителями колебаний // Применение вибротехники в горном деле: сб. ст. М.: Госгортехиздат, 1960. С. 222–234.
14. Мулюков А.Р., Яруллин Р.Б. Роль вибрации в интенсификации технологических процессов // Актуальные вопросы современной науки: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. заоч. конф. 15 апреля 2016 г. Ч. II. Уфа: Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2016.
15. Петрусов А.И. Зернообрабатывающие высокочастотные вибрационные машины. М.: Машиностроение, 1975. 39 с.
16. Яруллин Р.Б. Интенсификация технологических процессов АПК с использова-

нием вибрационных машин // Техника в сельском хозяйстве. 2007. № 6. С. 53–54.

17. Яруллин Р.Б. Амплитудно-частотные характеристики вибропроцессов в технологиях АПК // Научные исследования: информация, анализ, прогноз: 33-я книга коллективной монографии; гл. 17. Воронеж. гос. пед. ун-т. Воронеж, 2011. С. 267–288.

18. Яруллин Р.Б. К проблеме развития инерционных вибраторов резонансных виброзерноочистительных машин с регулируемыми параметрами // История науки и техники. Уфа, 2006. № 5. С. 117–121.

19. Мулюков А.Р., Яруллин Р.Б. К вопросу регулирования амплитуды колебаний рабочих органов вибромашин инерционными вибраторами // Актуальные вопросы современной науки: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. заоч. конф. 15 апреля 2016 г. Ч. II. Уфа: Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2016.

20. Яруллин Р.Б., Евстафьев А.Н. Проектирование асинхронного электропривода вибромашин с регулируемыми параметрами // Инновации и перспективы сервиса: сб. науч. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф. 9 декабря 2009 г. Уфа: Уфимск. гос. академия экономики и сервиса. 2009. С. 326–330.

21. Яруллин Р.Б. Асинхронный электропривод многорешетной виброзерноочистительной машины с регулируемыми параметрами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 1. С. 52–60.

22. Яруллин Р.Б., Сафин Р.Р. К вопросу проектирования саморегулируемого инерционного вибратора асинхронного электропривода вибромашин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 3. С. 30–37.

23. Яруллин Р.Б. Автоматический дебаланс вибросепаратора семян // Теория и практика разработки и внедрения средств автоматизации и роботизации технологических и производственных процессов: тез. докл. IV Республ. межотрасл. науч. техн. конф. УАИ. Уфа, 1987. С. 98.

24. А.с. 1498559 СССР, МПК В 06 В 1/16. Вибровозбудитель / И.Н. Латыпов, Р.Б. Яруллин (СССР). 4329013; заявл. 16.11.87; опубл. 07.08.89. Бюл. № 29.

25. Пат. на полезную модель 70167 Российская Федерация, МПК В 06 В 1/16. Универсальный адаптивный вибровозбудитель / Яруллин Р.Б. (РФ). 2007123624/22; заявл. 04.06.2007; опубл. 20.01.2008. Бюл. № 2.

26. А.с. 1542634 СССР, МКИ В 07 В 1/28. Вибросепаратор / Яруллин Р.Б., Габдуллин М.С. (СССР). 4347613; Заявл. 21.12.87; опубл. 15.02.90. Бюл. № 6.

27. Яруллин Р.Б. Зарезонансный вибросепаратор с вертикальной осью вращения дебалансов // Инновации и перспективы сервиса: сб. науч. ст. III Междунар. науч.-техн. конф. 20-21 декабря 2006 г. Уфа, 2006. С. 3–5.

28. Яруллин Р.Б. Виброзерноочистительная машина с вертикальной осью вращения дебалансов с регулируемыми конструктивными параметрами вибратора // Вестник БГАУ. 2015. 2 (34). С. 87–90.

References

1. Vibracii v tehnike: spravochnik / Pod red. V.N. Gelomej. M.: Mashinostroenie, 1978. Т. 1–4.

2. Dubrovskij A.A. Vibracionnaja tehnika v sel'skom hozjajstve. M.: Mashinostroenie, 1968. 204 s.

3. Spivakovskij A.O., Goncharevich I.F. Vibracionnye konvejery, pitateli i vspomogatel'nye ustrojstva. M.: Mashinostroenie, 1972. 328 s.

4. Byhovskij I.I. Progress vibracionnoj tehniki i zadachi nauchnyh issledovanij // Vibracionnaja tehnika: mater. nauch.-tehn. konf. M., 1966. S. 5-11.

5. Povidajlo V.A., Silin R.I., Shhigel' V.A. Vibracionnye ustrojstva v mashinostroenii. M.-Kiev: Mashgiz, 1962. 112 s.

6. Gladkov S.N. Promyshlennye vibratory // Primenenie vibrotehniki v gornom dele: sb. st. M.: Gosgortehizdat, 1960. S. 296–302.

7. Goncharevich I.F., Zemskov V.D., Koreshkov V.I. Vibracionnye grohoty i konvejery. M.: Gosgortehizdat, 1960. 216 s.

8. Zaika P.M. Vibracionnye zernoochistitel'nye mashiny. Teorija i raschet. M.: Mashinostroenie, 1967. 144 s.

9. Zaika P.M. Dinamika vibracionnyh zernoochistitel'nyh mashin. M.: Mashinostroenie, 1974. 278 s.

10. Jarullin R.B. Povyshenie jeffektivnosti asinhronnogo jelektrovibroprivoda s reguliruemymi parametrami v tehnologicheskikh processah APK (na primere vibrozernoochistitel'nyh mashin): diss. ... d-ra tehn. nauk — 05.20.02. Cheljabinsk, 2011. 287 s.
11. Jarullin R.B. Dinamika vibracionnyh zernoochistitel'nyh mashin (Problemy jelektrovibroprivoda). Ufa: Ufimsk. gos. akademija jekonomiki i servisa, 2007. 189 s.
12. Vozmilov A.G., Jarullin R.B. Vibracionnye tehnologii v processah APK // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. 2007. № 9. S. 5–6.
13. Blehman I.I. Vibracionnye mashiny s mehanicheskimi vzbuditeljami kolebanij // Primenenie vibrotehniki v gornom dele: sb. st. M.: Gosgortehizdat, 1960. S. 222–234.
14. Muljukov A.R., Jarullin R.B. Rol' vibracii v intensivacii tehnologicheskikh processov // Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. zaoch. konf. 15 aprelja 2016 g. Ch. II. Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj universitet jekonomiki i servisa, 2016.
15. Petrusov A.I. Zernoobrabatyvajushhie vysokochastotnye vibracionnye mashiny. M.: Mashinostroenie, 1975. 39 s.
16. Jarullin R.B. Intensifikacija tehnologicheskikh processov APK s ispol'zovaniem vibracionnyh mashin // Tehnika v sel'skom hozjajstve. 2007. № 6. S. 53–54.
17. Jarullin R.B. Amplitudno-chastotnye karakteristiki vibroprocessov v tehnologijah APK // Nauchnye issledovanija: informacija, analiz, prognoz: 33-ja kniga kollektivnyj monografii; gl. 17. Voronezh. gos. ped. un-t. Voronezh, 2011. S. 267–288.
18. Jarullin R.B. K probleme razvitija inercionnyh vibratorov zarezonansnyh vibrozernoochistitel'nyh mashin s reguliruemymi parametrami // Istorija nauki i tehniki. Ufa, 2006. № 5. S. 117–121.
19. Muljukov A.R., Jarullin R.B. K voprosu regulirovanija amplitudy kolebanij rabochih organov vibromashin inercionnymi vibratorami // Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki: sb. Nauch. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. zaoch. konf. 15 aprelja 2016 g. Ch. II. Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj universitet jekonomiki i servisa, 2016.
20. Jarullin R.B., Evstaf'ev A.N. Proektirovanie asinhronnogo jelektrovibroprivoda vibromashin s reguliruemymi parametrami // Innovacii i perspektivy servisa: sb. nauch. st. VI Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. 9 dekabrja 2009g. Ufa: Ufimsk. gos. akademija jekonomiki i servisa, 2009. S. 326–330.
21. Jarullin R.B. Asinhronnyj jelektrovibroprivod mnogoreshetnoj vibrozernoochistitel'noj mashiny s reguliruemymi parametrami // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2013. T. 9. № 1. S. 52–60.
22. Jarullin R.B., Safin R.R. K voprosu proektirovanija samoreguliruemogo inercionnogo vibratora asinhronnogo jelektrovibroprivoda vibromashin // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2014. T. 10. № 3. S. 30–37.
23. Jarullin R.B. Avtomaticheskij debalans vibroseparatora semjan // Teorija i praktika razrabotki i vnedrenija sredstv avtomatizacii i robotizacii tehnologicheskikh i proizvodstvennyh processov: tez. dokl. IV Respubl. mezhotrasl. nauch.-tehn. konf. UAI. Ufa, 1987. S. 98.
24. A.s. 1498559 SSSR, MPK V 06 V 1/16. Vibrovzbuditel' / Latypov I.N., Jarullin R.B. (SSSR). 4329013; Zajavl. 16.11.87; opubl. 07.08.89. Bjul. № 29.
25. Pat. na poleznuju model' 70167 Rossijskaja Federacija, MPK V 06 V 1/16. Universal'nyj adaptivnyj vibrovzbuditel' / Jarullin R.B. (RF). 2007123624/22; zajavl. 04.06.2007; opubl. 20.01.2008. Bjul. № 2.
26. A.s. 1542634 SSSR, MKI V07V 1/28 Vibroseparator / R.B. Jarullin, M.S. Gabdullin (SSSR). 4347613; zajavl. 21.12.87; opubl. 15.02.90. Bjul. № 6.
27. Jarullin R.B. Zarezonansnyj vibroseparator s vertikal'noj os'ju vrashhenija debalansov // Innovacii i perspektivy servisa: sb. nauch. st. III Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. 20-21 dekabrja 2006 g. Ufa, 2006. S. 3–5.
28. Jarullin R.B. Vibrozernoochistitel'naja mashina s vertikal'noj os'ju vrashhenija debalansov s reguliruemymi konstruktivnymi parametrami vibratora // Vestnik BGAU. 2015. 2 (34). S. 87–90.



Воронков Г. С.
Voronkov G. S.

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



Кузнецов И. В.
Kuznetsov I. V.

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

УДК 621.37

ПОДХОД К КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ OFDM-МОДЕМОВ ДЛЯ ЭНЕРГОДЕФИЦИТНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

В статье исследуется возможность уменьшения динамического диапазона комплексной огибающей сигналов OFDM при сохранении качества связи. Отличительной особенностью предложенной схемы формирования комплексной огибающей является наличие предсказателя в каждом из каналов (синфазном и квадратурном). Предсказатель проводит экстраполяцию характеристик комплексной огибающей, затем предсказанное значение вычитается из соответствующего ему значения комплексной огибающей, что приводит к уменьшению её динамического диапазона. Параметры предсказателя в то же время передаются на приёмную сторону с использованием канала вторичного уплотнения. Предлагаемое структурное решение позволяет повысить пропускную способность систем передачи OFDM, а также снизить энергопотребление системы передачи в целом. Можно говорить, что предлагаемое решение формирует память канала, а её использование позволяет снизить требуемое отношение сигнал/шум на входе приёмника. Потенциально введение блока предсказания позволит снизить требования к скремблерам в трактах формирования OFDM, либо отказаться от них вовсе.

В работе приведена структурная схема модифицированного модема OFDM при использовании ряда допущений: канал связи не вносит задержек и затухания, а помеха в канале представляет собой белый шум. Показано сохранение ортогональности разностных сигналов синфазного и квадратурного каналов, получаемых вычитанием предсказанного значения из соответствующего канального сигнала. Показана тождественность задачи уменьшения динамического диапазона комплексной огибающей задаче оптимальной фильтрации. Исходя из этого, на основании решения уравнения Виннера-Хопфа синтезирована передаточная функция предсказателя, приведен числовой пример синтеза указанной передаточной функции. Показано, что решение позволяет уменьшить динамический диапазон тем сильнее, чем выше отношение сигнал/шум в канале.

Ключевые слова: OFDM-модем, многоканальная система передачи, спектральная плотность мощности, память канала, канал вторичного уплотнения.

LOW-SPEED OFDM-MODEMS FOR LOW POWER CONSUMING TELECOMMUNICATION SYSTEMS BUILDING CONCEPTS

This article researches possibility of OFDM-signal complex envelope dynamic range decreasing with keeping connection quality. The main feature of signal generation circuit that suggested is prediction unit in each of it channels (in-phase and quadrature). This unit extrapolates complex

envelope, then the predicted value is subtracted from the corresponding value of the complex envelope, that cause its dynamic range decreasing. Prediction unit's parameters are at the same time transmitted to the receiver using secondary multiplex. Suggested structure allows increasing OFDM systems throughput and decreasing transmitting system power consumption. It can be said that such structure forms channel memory, which allows receiver SNR decreasing. Prediction unit can also simplify OFDM scramblers or even substitute them.

The structure of modified OFDM modem by using a number of assumptions: there is no channel latency and loss, interference in the channel is a white noise. I and Q channels difference signals (which are the subtract of predicted and real signal value) orthogonality is proved. The identity of reducing the dynamic range of the complex envelope problem and the problem of optimal filtering is proved. The prediction unit transfer function synthesized base on it, and numeric example is given and solved. Solution shows that dynamic range decreasing is more perceptible the higher SNR is.

Key words: OFDM-modem, multi-channel system, power spectral density, channel memory, secondary multiplex.

Введение

В настоящее время техника связи непрерывно развивается в сторону повышения скоростей передачи данных. Однако повышение скоростей передачи, как правило, ведёт к увеличению потребляемой мощности систем связи.

Особенно это актуально для систем с автономным энергоснабжением (примеры: спутники, БПЛА, мобильные аппараты). На передатчик приходится до 70 % потребляемой мощности [1]. Снижение потребления блока передачи, таким образом, позволит увеличить продолжительность автономной работы и ресурс эксплуатации. Снизить потребление можно различными способами, самый очевидный — уменьшение выходной мощности. Однако добиться поставленной задачи позволяет и уменьшение вычислительных затрат на обработку сигнала. Один из самых эффективных способов уплотнения в каналах связи — OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), который применяется, например, в системах подвижной радиосвязи (СПРС) 4 поколения и в системах перспек-

тивных спутниковых коммуникаций [2], которые могут быть отнесены к энергодефицитным системам связи.

На рисунке 1 приведены варианты построения существующих (традиционных) схем построения OFDM-уплотнения [3]. Схемы содержат блоки аналого-цифрового преобразования (АЦП), скремблеры, квадратурные модуляторы, блок обратного быстрого преобразования Фурье и блок преобразования частоты (квадратурный модулятор).

Недостатком приведённой схемы является требование дополнительной энергии на скремблирование и усиление радиосигнала. С целью снижения энергопотребления системы предлагается модифицировать традиционную схему OFDM-модуляторов. Достичь этого возможно, во-первых, снижением канальной скорости передачи данных при сохранении объема принимаемой информации в единицу времени, во-вторых, введением экстраполятора (предсказателя), позволяющего повысить помехоустойчивость системы. Предлагаемая схема приведена на рисунке 2.

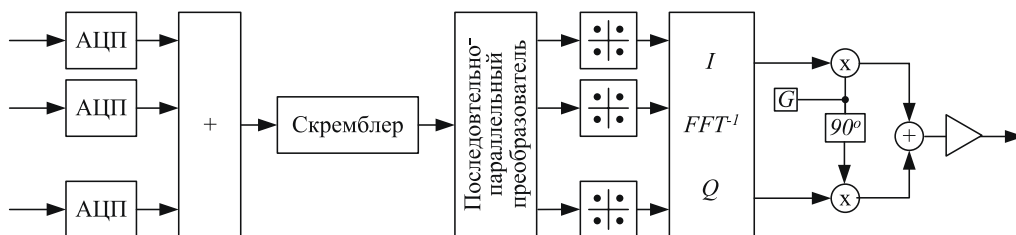


Рисунок 1. Традиционная схема формирования сигнала OFDM

Как видно из рисунка 2, идея заключается в использовании в качестве комплексной огибающей квадратурного модулятора не полученную классическим методом огибающую OFDM, а разность между полученной огибающей и её предсказанным значением.

Предлагаемая схема обладает несколькими преимуществами:

1. позволяет устранить из схемы блоки скремблирования;
2. использование в качестве модулирующего сигнала разности двух огибающих (предсказанной и истинной) потенциально позволит снизить динамический диапазон;
3. введение блока предсказания по сути означает формирование памяти канала, а её использование, в свою очередь, позволит сохранить отношение сигнал/шум на приёме при снижении требований к помехоустойчивому кодеру.

Модифицированный OFDM-модем

Блок предсказания может быть установлен как в области низкочастотного сигнала, так и после блока преобразования Фурье, в этом случае анализироваться на избыточность будет уже не каналный сигнал, а сформированная комплексная огибающая сигнала OFDM.

Оба способа имеют свои преимущества и недостатки. При установке в низкочастотной части упрощается схемотехника блока предсказания и снижаются требования к быстродействию его электроники, но влияние на итоговый выходной сигнал будет опосредованным. Такой вариант рассмотрен в [4]. Работа блока предсказания с комплексной огибающей сигнала, до переноса спектра в область высокой частоты, позволит оказывать непосредственное влияние на динамический диапазон выходного сигнала, что позволит снизить требования к скорости передачи. Однако работа в этой области потребует применения более быстродействующей схемотехники. Современная элементная база, тем не менее, предположительно обладает достаточной производительностью для решения указанной задачи.

Предлагаемая структура формирования сигнала OFDM приведена на рисунке 3. Тракт преобразования дополнен линейным предсказателем (экстраполятором) с передаточной функцией $H(s)$. При этом на каждом такте значение в I и Q каналах сравнивается с предсказанным на основе предыдущего

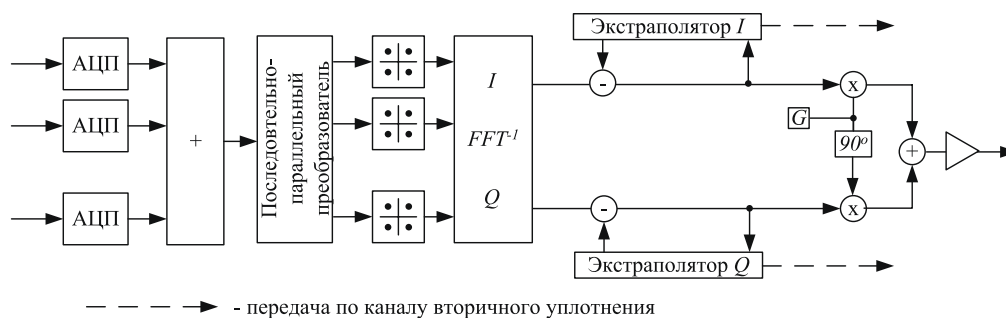


Рисунок 2. Предлагаемая схема формирования сигнала OFDM

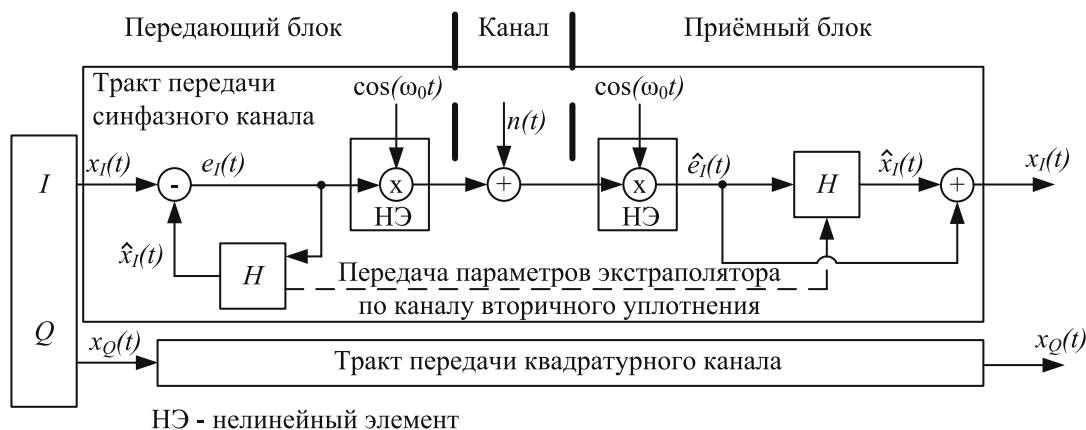


Рисунок 3. Формирование сигнала OFDM при использовании блока предсказания

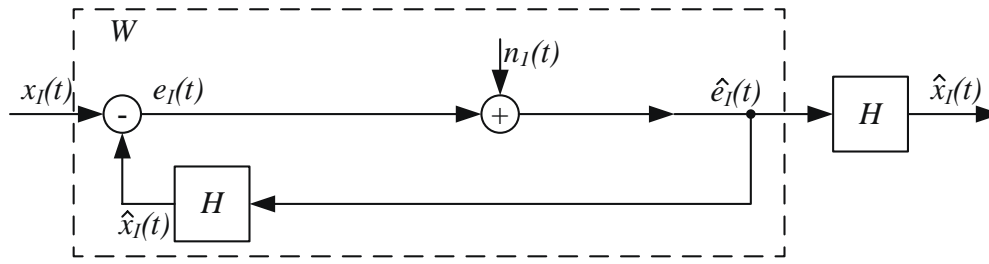


Рисунок 4. Упрощенный тракт передачи

(или нескольких предыдущих) значений, и в канал направляется не полное значение сигнала, а отклонение от предсказанного значения (e_I и e_Q). Для передачи коэффициентов экстраполятора на приёмную сторону для восстановления сигнала служит канал вторичного уплотнения.

Очевидно, что для работоспособности предложенной схемы необходимо сохранение ортогональности в каналах I и Q , то есть сигналы $e_I(t)$ и $e_Q(t)$ должны удовлетворять условию ортогональности [5]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} M(e_I(t) \cdot e_Q(t)) dt = 0.$$

Учтя, что:

$$e_I(t) = \hat{x}_I(t) - x_I(t),$$

$$e_Q(t) = \hat{x}_Q(t) - x_Q(t),$$

получим:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} M(e_I(t) \cdot e_Q(t)) dt = \\ & = \int_{-\infty}^{+\infty} M((\hat{x}_I(t) - x_I(t)) \cdot (\hat{x}_Q(t) - x_Q(t))) dt = \\ & = \int_{-\infty}^{+\infty} M(x_I(t) \cdot x_Q(t) + \hat{x}_I(t) \cdot \hat{x}_Q(t) - \hat{x}_I(t) \cdot x_Q(t) - x_I(t) \cdot \hat{x}_Q(t)) dt = \\ & = \int_{-\infty}^{+\infty} M(x_I(t) \cdot x_Q(t)) dt + \int_{-\infty}^{+\infty} M(\hat{x}_I(t) \cdot \hat{x}_Q(t)) dt - \\ & - \int_{-\infty}^{+\infty} M(\hat{x}_I(t) \cdot x_Q(t)) dt - \int_{-\infty}^{+\infty} M(x_I(t) \cdot \hat{x}_Q(t)) dt. \end{aligned}$$

Очевидно, что, поскольку изначально сигналы каналов I и Q ортогональны, то каждое из слагаемых равно нулю, то есть условие ортогональности для разностных сигналов выполняется, что удовлетворяет условию работоспособности системы.

Синтез передаточной функции экстраполятора

Тракт передачи синфазного сигнала, приведённый ранее на рисунке 3, можно упростить, сделав ряд допущений. Предположим, что канал связи не вносит задержек и затухания, а помеха в канале представляет собой белый шум. Предположим также, что воздействия нелинейных элементов в блоках передатчика и

приёмника взаимно компенсируют друг друга (передаточные функции взаимно обратны). Тогда тракт передачи синфазного и квадратурного каналов представляет собой звено, охваченное отрицательной обратной связью (на рисунке 4 приведена схема для синфазной составляющей; $n_I(t)$ — помеха, приведённая к выходу передатчика). Передаточная функция звена W в этом случае определяется как:

$$W = \frac{H}{1 + H}.$$

Тогда

$$H = \frac{W}{1 - W}.$$

Согласно поставленной задаче, необходимо уменьшать динамический диапазон сигнала $e(t)$ в квадратурном и синфазном каналах. В этом случае, с учётом приведённой выше схемы, задача тождественна задаче оптимальной фильтрации, и, согласно [6], передаточную функцию канала можно определить выражением:

$$W = \frac{1}{\Phi_{zz}^+} \left[\frac{\Phi_{zx}}{\Phi_{zz}^-} \right]_+,$$

где $x(t)$ — желаемый сигнал на выходе системы;

Φ — спектральная плотность мощности (СПМ) соответствующего сигнала;

$z(t)$ — сигнал, смешанный с помехой.

Для случая аддитивной помехи при условии отсутствия корреляции сигнала и помехи имеем:

$$z(t) = x(t) + n_I(t).$$

$$\begin{aligned} \Phi_{zz} &= \lim_{T \rightarrow \infty} M \left[\frac{Z(-s) \cdot Z(s)}{T} \right] = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} M \left[\frac{(X(-s) + N(-s)) \cdot (X(s) + N(s))}{T} \right] = \\ &= \Phi_{xx} + \Phi_{nn} + \Phi_{xn} + \Phi_{nx}. \\ \Phi_{zx} &= \lim_{T \rightarrow \infty} M \left[\frac{Z(-s) \cdot X(s)}{T} \right] = \end{aligned}$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} M \left[\frac{(X(-s) + N(-s)) \cdot X(s)}{T} \right] = \Phi_{xx} + \Phi_{nx}.$$

В случае, если сигнал и помеха не коррелированы, их взаимные спектральные плотности мощности равны 0. Тогда:

$$\begin{aligned} \Phi_{zz} &= \Phi_{xx} + \Phi_{nn}, \\ \Phi_{zx} &= \Phi_{xx}. \end{aligned}$$

Рассмотрим простой числовой пример [5]. Пусть

$$\Phi_{xx} = \frac{1}{a_1^2 (\alpha^2 - s^2)}, \quad \Phi_{nn} = \frac{1}{a_2^2},$$

где a_1, a_2, α — положительные коэффициенты.

Тогда передаточная функция канала будет иметь вид:

$$W = K_1 \cdot \frac{1}{1 + \tau s},$$

где
$$K_1 = \frac{a_2^2}{\sqrt{a_1^2 \alpha^2 + a_2^2} (a_1 \alpha + \sqrt{a_1^2 \alpha^2 + a_2^2})},$$

$$\tau = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 \alpha^2 + a_2^2}}.$$

Тогда для передаточной функции экстраполятора получим:

$$H = \frac{K_1}{1 - K_1 + \tau s}.$$

Таким образом, в установившемся режиме динамический диапазон сигнала $e(t)$ будет определяться коэффициентом K_1 , который, в свою очередь, можно варьировать, изменяя СПМ сигнала $x(t)$. Покажем, что динамический диапазон сигнала $e(t)$ будет меньше диапазона сигнала $x(t)$.

$$E(s) = X(s) - \hat{X}(s) = X(s) - E(s) \cdot H,$$

откуда

Список литературы

1. Филатов П.Е. Повышение эффективности энергодефицитных многоканальных систем связи на основе координированного преобразования сигналов // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы — 2016 (ПРЭФЖС-2016): матер. Междунар. науч.-техн. конф. Казань, 2016. С. 143-148.
2. Рекомендация МСЭ-RM.2047-0. Подробные спецификации спутниковых ради-

$$E(s) = \frac{X(s)}{H+1}.$$

Чтобы функция $E(s)$ была меньше $X(s)$, необходимо, чтобы функция H была неотрицательной. В установившемся режиме ($\tau \rightarrow 0$):

$$H = \frac{K_1}{1 - K_1} > 0,$$

откуда

$$0 < K_1 < 1.$$

Из формулы для нахождения K_1 очевидно, что этот коэффициент не может быть отрицательным. Заметим также, что знаменатель представляет собой произведение двух умножаемых, каждое из которых больше a_2^2 . Следовательно, K_1 меньше единицы при любых значениях коэффициентов a_1, a_2, α , следовательно, динамический диапазон сигнала $e(t)$ будет меньше диапазона сигнала $x(t)$. Таким образом, при использовании логарифмической формы записи, получим:

$$10 \lg \frac{e^2(t)}{x^2(t)} < 0.$$

Также видно, что чем больше a_2 и меньше a_1 (то есть чем выше отношение сигнал/шум), тем более эффективным становится предсказание.

Выводы

Показана принципиальная возможность уменьшения динамического диапазона комплексной огибающей OFDM-сигнала. Определена передаточная функция экстраполятора. Показана возможность управления динамическим диапазоном сигнала комплексной огибающей за счёт управления СПМ исходного сигнала. Предсказание тем эффективнее, чем выше отношение сигнал/шум.

оинтерфейсов перспективной Международной подвижной электросвязи (IMT-Advanced).

3. Harri H., Toskala A. LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA based radio access. John Wiley and Sons Ltd, 2009. 443 p.

4. Кузнецов И.В., Филатов П.Е., Гимаев А.Н. Разработка группового кодера с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией сигналов для многоканальных энергодефицитных систем передачи данных // Радиотехника. 2015. № 2. С. 87–91.

5. Кловский Д.Д. и др. Теория электрической связи: учебник для студентов вузов по специальностям «Сети связи и системы коммуникации», «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», а также для бакалавров по направлению «Телекоммуникации» / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1998. 432 с.

6. Цейтлин Я.М. Проектирование оптимальных линейных систем. Л.: Машиностроение, 1973. 240 с.

References

1. Filatov P.E. Povyshenie jeffektivnosti jenergodeficitnyh mnogokanal'nyh system svjazi na osnove koordinirovannogo preobrazovanija signalov // Prikladnaja jelektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy — 2016» (PRJeFZhS-2016): Mater. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Kazan', 2016. S. 143-148.

2. Rekomendacija MSJe-RM.2047-0. Podrobnye specifikacii sputnikovyh

radiointerfejsov perspektivnoj Mezhdunarodnoj podvizhnoj jelektrosvjazi (IMT-Advanced).

3. Holma H., Toskala A. LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA based radio access. John Wiley and Sons Ltd, 2009. 443 p.

4. Kuznecov I.V., Filatov P.E., Gimaev A.N. Razrabotka gruppovogo kodeka s differencial'noj impul'sno-kodovoj moduljaciej signalov dlja mnogokanal'nyh jenergodeficitnyh system peredachi dannyh // Radiotehnika. 2015. № 2. С. 87–91.

5. Klovsij D.D. i dr. Teorija jelektricheskoj svjazi: uchebnik dlja studentov vuzov po special'nostjam «Seti svjazi i sistemy kommunikacii», «Mnogokanal'nye telekommunikacionnye sistemy», «Radiosvjaz', radioveshhanie i te-levidenie», a takzhe dlja bakalavrov po napravleniju «Telekommunikacii» / Pod red. D.D. Klovsogo. M.: Radio i svjaz', 1998. 432 s.

6. Cejtlin Ja.M. Proektirovanie optimal'nyh linejnyh sistem. L.: Mashinostroenie, 1973. 240 s.



Плѣнкин А. П.

Pliankin A. P.

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

УДК 621.396.624

ПРОБЛЕМА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПРОЦЕССА СИНХРОНИЗАЦИИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА В СИСТЕМЕ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА

Работа посвящена анализу проблемы обеспечения защищенности от несанкционированного доступа процесса синхронизации автокомпенсационной системы квантового распределения ключа с фазовым кодированием состояний фотонов. Исследована коммерческая система квантового распределения ключа с автоматической компенсацией поляризационных искажений, функционирующая по принципу «plug&play». Проанализирован процесс синхронизации двух входящих в состав системы квантового распределения ключа станций. Приведена структурная схема распространения оптического излучения, функционирующая по одноволоконной автокомпенсационной схеме. Исследованы основные способы атак на квантовый канал связи в процессе синхронизации системы квантового распределения ключа. Приведено описание разработанного алгоритма синхронизации, отличающегося повышенной защищенностью от несанкционированного доступа и снижающего вероятность принятия ошибочного решения в процессе обнаружения фотонного импульса. Алгоритм предполагает поиск сигнального временного интервала, содержащего фотонный импульс. Отличительной особенностью алгоритма является то, что при распространении оптического сигнала в направлении от кодирующей станции к приемо-передающей осуществляется ослабление синхросигнала до фотонного уровня, причем среднее число фотонов в импульсе не превышает 0,1.

Ключевые слова: квантовая криптография, распределение ключа, синхронизация, защищенность, фотонный импульс, секретный ключ, алгоритм.

PROTECTION PROBLEM OF SYNCHRONIZATION FROM UNAUTHORISED ACCESS IN QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEM

The paper analyzes the problem of providing security against unauthorized access to synchronization process in autocompensation quantum key distribution system with phase coding states of photons. The commercial quantum key distribution system with automatic compensation of polarization distortions, which operates on the principle of «plug&play» are researched. The process of synchronizing the two stations of quantum key distribution system are analyzed. The block diagram of the propagation of optical radiation, which operates on single fiber autocompensation scheme are showed. The basic methods of attacks on the quantum communication channel during synchronization in quantum key distribution system are proposed. The description of the developed synchronization algorithm with improves protection from unauthorized access and reducing the probability of making a wrong decision in the process of detecting the photons are proposed. The algorithm involves finding a signal time window containing the photon momentum. A distinctive feature of the algorithm is that the propagation direction of the optical signal from the encoding station to the transceiver carried attenuation until photon level, the average number of photons per pulse is not more than 0.1.

Key words: quantum cryptography, key distribution, synchronization, protection, photon impulse, secret key, algorithm.

Введение. Защищенность классических криптографических систем ограничена вычислительными мощностями злоумышленника. Основной проблемой при передаче конфиденциальной информации является распределение секретного ключа между легитимными пользователями. В качестве секретного ключа выступает одинаковый у пользователей набор случайных битов. Для обеспечения абсолютной секретности криптографической схемы необходимо выполнение известных условий: абсолютная случайность криптографического ключа, его длина должна быть больше или равна длине кодируемого сообщения, ключ может быть использован только один раз. Защищенность при квантовом распределении ключа (КРК) базируется на принципах квантовой криптографии и предполагает кодирование квантового состояния фотона [1]. Принципы квантовой криптографии основаны на законах квантовой физики и принципиально исключают возможность перехвата передаваемых сообщений. В основе квантового распределения ключа лежат три утверждения: неизвестное квантовое состояние невозможно клонировать, невозможно извлечь информацию о неортогональных квантовых состояниях без возмущения, любое выполняемое измерение приведёт к изменению квантового состояния носителя информации [2].

Принципы квантовой криптографии реализованы в системах квантового распределения ключей (СКРК). Среди коммерческих СКРК выделяются своей отказоустойчивостью автокомпенсационные двухпроходные волоконно-оптические системы КРК с фазовым кодированием состояний фотонов, функционирующие по квантовому протоколу BB84 [3, 4]. Такие системы реализованы по технологии «plug&play», что сводит к минимуму конфигурирование и настройку СКРК. Важнейшей составляющей работы комплекса для передачи конфиденциальной информации с квантовым распределением является синхронизация передатчика и фотоприемника. Экспериментальные исследования квантово-криптографической сети на базе коммерческой автокомпенсационной СКРК доказывают, что процесс синхронизации

осуществляется в многофотонном режиме. Анализ стратегий отвода оптического излучения в квантовых системах посредством атак типа «Троянский конь» и «Атака в лоб» показывает, что реализация многофотонного режима в процессе синхронизации потенциально упрощает злоумышленнику организацию несанкционированного доступа к информации. Последнее определяет актуальность исследования проблемы защищенности процесса синхронизации автокомпенсационных СКРК от несанкционированного доступа и разработки методов синхронизации, обеспечивающих повышенную защищённость процесса от несанкционированного доступа при атаках типа «Троянский конь» и «Атака в лоб».

Коммерческая система квантового распределения ключа с автоматической компенсацией поляризационных искажений. В системах КРК распространены симметричные криптографические схемы, где один ключ используется для шифрования и дешифрования информации. Отметим, что сгенерированный секретный ключ требует периодического обновления одновременно у отправителя и получателя. В автокомпенсационных системах КРК функции отправителя и получателя соответственно выполняют приёмо-передающая станция Боб (англ. Bob) и кодирующая станция Алиса (англ. Alice). Между собой Алиса и Боб связаны квантовым каналом связи, в качестве которого используется одномодовое оптическое волокно. Станции имеют управляющие входы и выходы для синхронизации своей работы, контроля параметров системы и управления защищённым каналом связи. Конфигурирование и настройка системы производится под управлением программного обеспечения. При работе протокола квантовой криптографии по незащищённому каналу связи осуществляется согласование ключа и выполнение сервисных операций системы КРК.

Существует несколько протоколов КРК, основанных на передаче информации посредством кодирования состояний одиночных фотонов [5]. Однако наиболее применяемым в коммерческих системах КРК является протокол BB84 (англ. Bennett-Brassard-84).

Важнейшей составляющей в работе системы КРК является процесс синхронизации разнесённых в пространстве приёмо-передающей и кодирующей станций. Синхронизация заключается в регистрации момента поступления оптического сигнала на фотодетекторы приёмо-передающей станции путем высокоточного измерения длины пути распространения синхроимпульса [6]. Точность обнаружения синхроимпульса составляет десятки пикосекунд.

На рисунке 1 представлена схема распространения синхроимпульса по волоконно-оптическому пути автокомпенсационной системы КРК. Синхроимпульсы излучаются в приёмо-передающей станции, следуют по оптическому пути через квантовый канал связи к кодирующей станции, где отражаются, и по тому же оптическому пути направляются на фотодетекторы приёмо-передающей станции. Интерференция и компенсация фазы импульсов обеспечивается применением волоконно-оптического интерферометра.

Приёмо-передающая станция предназначена для формирования и приёма оптических

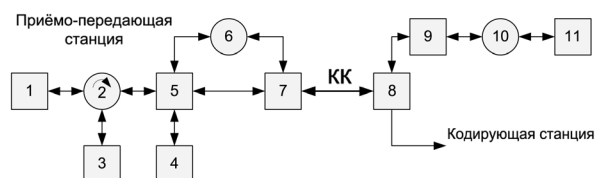


Рисунок 1. Структурная схема оптического пути распространения синхроимпульса

импульсов в процессе синхронизации. В состав станции входят передающий оптический модуль (1), волоконно-оптический циркулятор (2), два приёмных оптических модуля (3, 4), волоконно-оптический делитель мощности X-типа (5), линия задержки оптического излучения (6), волоконно-оптический поляризационный мультиплексор/демультиплексор (7). Станции соединены одноволоконной линией связи (КК). Кодирующая станция Алиса предназначена для кодирования фазовых состояний фотонов. В её состав входят волоконно-оптический делитель мощности Y-типа (8), перестраиваемый волоконно-оптический аттенюатор (9), линия задержки оптического излучения (10), зеркало Фарадея, изменяю-

щее поляризацию оптического излучения на ортогональную. Функциональные блоки внутри станций соединяются оптическими волокнами, сохраняющими поляризацию оптического излучения (фотонов).

В коммерческих системах КРК для синхронизации используется периодическая последовательность оптических импульсов. Временными маркерами при этом являются сами импульсы. Для обеспечения синхронизации с высокой точностью измеряется общая длина оптического пути распространения синхроимпульса как в квантовом канале между двумя станциями, так и во всех функциональных волоконно-оптических узлах внутри СКРК. Подробное описание временных параметров процесса синхронизации системы КРК в литературе отсутствует. Отмечается лишь, что передача сигналов синхронизации в направлении от приёмо-передающей станции к кодирующей всегда должна осуществляться в многофотонном режиме.

В результате экспериментальных испытаний коммерческой системы КРК id3110 Clavis2 в режиме синхронизации было установлено, что процесс синхронизации при распространении синхросигналов в направлении от кодирующей станции к приёмо-передающей осуществляется в многофотонном режиме. Это согласуется с результатами исследований в [7], где показано, что в процессе синхронизации фотодетекторы работают в линейном режиме.

В таблице 1 приведены результаты натурных измерений параметров оптических импульсов на трёх этапах синхронизации СКРК Clavis2.

Реализация многофотонного режима в процессе синхронизации потенциально упрощает злоумышленнику организацию несанкционированного доступа к информации. Задачей несанкционированного доступа может быть не только возможность съёма информации в процессе формирования квантовых ключей, но и внесение помех при работе СКРК. В работах [8, 9] приведены основные виды атак на волоконно-оптические системы связи. Однако описанные способы атак направлены на дестабилизацию

Таблица 1. Параметры оптического импульса

Параметр	Этап синхронизации		
	Первый	Второй	Третий**
Измерения на выходе передающего модуля			
Длительность импульса*	~ 1 нс	~ 1 нс	~ 1 нс
Частота следования импульсов	800 Гц	800 Гц	5 МГц
Амплитуда электрического импульса	140 мВ	40 мВ	40 мВ
Измерения вквантовом канале между станциями СКРК			
Амплитуда первогоэлектрического импульса	48 мВ	13 мВ	13 мВ
Амплитуда второгоэлектрического импульса	21 мВ	6 мВ	6 мВ
*Длительность оптического импульса на осциллограммах имеет размытость, вызванную погрешностью при преобразованиях из оптического сигнала в электрический.			
**Результаты измерений амплитуд усреднены.			

протоколов квантовой криптографии. При этом вопросы синхронизации не рассматривались или считалось, что на момент совершения атаки система КРК синхронизирована.

На рисунке 2 приведена структурная схема наиболее удачной с точки зрения практической реализации атаки надвухпроводную схему СКРК. При использовании двухпроводной схемы синхросигналы распространяются по одному оптическому волокну в направлении от приёмо-передающей станции к кодирующей, а в противоположном направлении от кодирующей станции к приёмо-передающей — по другому оптическому волокну. Злоумышленнику достаточно обеспечить себе доступ к каналу прямого прохождения оптического синхросигнала. При этом злоумышленник имитирует работу станций Боб и Алиса. От станции Боб злоумышленник принимает оптические импульсы и после анализа параметров принимаемых сигналов направляет к станции Алиса свои имитационные синхросигналы. Сигналы обрабатываются в кодирующей станции и следуют к станции Боб в обратном направлении через нетронутое злоумышленником оптическое волокно.

Злоумышленник способен генерировать копии оптических синхроимпульсов, пере-

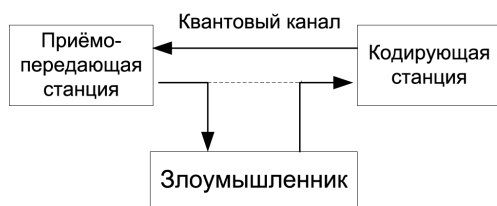


Рисунок 2. Структурная схема атаки на двухпроводную СКРК

хватываемых от станции Боб и направлять их к кодирующей станции. Установлено, что при атаке по данной схеме процент квантовых ошибок (англ. QBER) в присутствии злоумышленника не превышает процент ошибок при отсутствии злоумышленника в квантовом канале и, как следствие, легитимные пользователи не способны распознать присутствие злоумышленника в канале связи системы КРК.

Реализация одноволоконной автокомпенсационной схемы КРК значительно усложняет, но не исключает возможность несанкционированного доступа злоумышленника к квантовому каналу (рисунок 3). Злоумышленник встраивается в квантовый канал между станциями СКРК, имитируя работу приёмо-передающей и кодирующей станций. Перехватывая сигналы от приёмо-передающей станции, злоумышленник направляет имитационные синхросигналы по направлению к кодирующей станции, где импульсы кодируются и после отражения от зеркала Фарадея направляются по тому же оптическому пути к злоумышленнику. Перехватив импульс от кодирующей станции, злоумышленник посылает на фотодетектор станции Боб свои оптические сигналы.

Для реализации атаки злоумышленнику требуется обладать информацией о точном

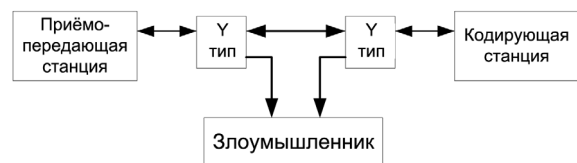


Рисунок 3. Структурная схема отвода оптического излучения при одноволоконной схеме

времени стробирования однофотонных лавинных фотодиодов приёмо-передающей станции. В режиме синхронизации задача злоумышленника сводится к отводу части энергии оптического импульса из квантового канала. Так как в процессе синхронизации не функционируют алгоритмы контроля передаваемых сигналов, следовательно, незначительная потеря энергии оптического импульса не нарушает работу системы, исключая обнаружение присутствия злоумышленника. Отвод части оптической мощности может быть осуществлен без особых усилий, при помощи двух направленных волоконно-оптических ответвителей Y-типа (см. рисунок 3) или специальных бесконтактных «прищепок».

Момент перехвата оптического импульса при прямом прохождении не даст достаточной информации злоумышленнику о работе системы КРК (как в случае использования двухпроводной схемы). Определяющим является момент появления оптического синхроимпульса при обратном распространении в квантовом канале. Отводя часть энергии многофотонного импульса в двух временных моментах (при прямом и обратном распространении импульса, как показано на рисунке 3), злоумышленник способен рассчитать задержку отражённого сигнала для дальнейшей имитации кодирующей станции. Данные о времени переотражения позволят в нужный момент осуществлять посылку имитационных сигналов на лавинные фотодиоды приёмо-передающей станции.

Таким образом, оставаясь незамеченным в процессе синхронизации и обладая необходимыми сведениями о квантовом канале и времени стробирования фотодиодов, злоумышленник способен успешно реализовать вышеописанные атаки на этапе работы протокола формирования квантовых ключей. Последнее определяет актуальность разработки и исследования методов синхронизации систем КРК с автоматической компенсацией поляризационных искажений, обеспечивающих повышенную защищённость процесса от несанкционированного доступа при атаках типа «Троянский конь».

Принцип вхождения в синхронизм с повышенной защищённостью от несанкционированного доступа. Для повышения защищённости процесса синхронизации от несанкционированного доступа разработан и исследован алгоритм вхождения в синхронизм с использованием в качестве синхронизирующих сигналов фотонных импульсов [10]. Отличительной особенностью алгоритма является то, что среднее число фотонов в синхроимпульсе не превышает 0,1. Отметим, что ослабление оптического импульса до фотонного уровня обеспечивается при обратном распространении синхросигнала от кодирующей станции к приёмо-передающей и реализуется посредством управляемого оптического аттенуатора в кодирующей станции.

Алгоритм предполагает деление периода следования оптических импульсов на временные окна и обнаружение сигнального окна с фотонным синхроимпульсом. Для доказательства эффективности разработанного алгоритма проведено имитационное моделирование процесса синхронизации [11]. По результатам компьютерного моделирования получено оптимальное соотношение, устанавливающее связь между длительностью временного окна и длительностью фотонного синхроимпульса:

$$\tau_w = 2 \cdot \tau_s, \quad (1)$$

где τ_w — длительность временного окна; τ_s — длительность фотонного синхроимпульса.

При этом обеспечивается снижение более чем в 4 раза вероятности принятия ошибочного решения [12]. Доказана возможность использования для расчёта вероятности правильного обнаружения сигнального временного окна аналитического выражения, учитывающего случайный момент появления синхроимпульса во временном окне:

$$P_D = \exp(-N_w \cdot \overline{n_{d,N}} + \overline{n_{d,N}}) \langle \overline{n_{w,N}} \cdot \exp(-\overline{n_{w,N}}) + [1 - \exp(-\overline{n_{w,N}}) - \overline{n_{w,N}} \cdot \exp(-\overline{n_{w,N}})] (1 + \overline{n_{d,N}})^{N_w - 1} \rangle, \quad (2)$$

где $\overline{n_{w,N}}$ — среднее количество регистрируемых фотоэлектронов и импульсов темнового тока в сигнальном временном окне за выборку; N_w — количество временных окон во временном кадре; $\overline{n_{d,N}}$ — среднее число регистрируемых импульсов темнового тока в сигнальном временном окне за выборку.

Результаты имитационного моделирования разработанного алгоритма и результаты расчетов по полученным аналитическим выражениям имеют расхождение не более 2 %.

Таким образом, можно говорить о новом принципе синхронизации автокомпенсационной волоконно-оптической системы квантового распределения ключа с повышенной защищённостью от несанкционированного доступа, в основу которого положено использование фотонных импульсов в качестве сигналов синхронизации.

Выводы. Проведены исследования автокомпенсационной волоконно-оптической системы КРК с фазовым кодированием состояний фотонов, функционирующей по квантовому протоколу BB84 и реализованной по технологии «plug&play». В результате натурных испытаний системы id3110 Clavis2 установлено, что передача сигналов синхронизации в направлении от приёмо-передающей к кодирующей станции и обратно осуществляется в многофотонном режиме.

Показано, что реализация многофотонного режима в процессе синхронизации потенциально упрощает злоумышленнику организацию несанкционированного доступа к квантовому каналу связи. Особой уязвимостью к атакам типа «Троянский конь» обладают СКРК, функционирующие по двухпроводной схеме. Приведено описание нового принципа синхронизации автокомпенсационной системы КРК с повышенной защищённостью от несанкционированного доступа к квантовому каналу связи. Доказано, что использование в качестве синхросигналов фотонных импульсов, где среднее число фотонов в синхроимпульсе не превышает 0,1, обеспечивает повышенную защищённость процесса синхронизации системы КРК при атаках типа «Троянский конь» от несанкционированного доступа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00003 мол_а.

Список литературы

1. Румянцев К.Е. Системы квантового распределения ключа. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. 264 с.
2. Бабаш А.В., Шанкин Г.П. Криптография. М.: СОЛОН-Р, 2002. 512 с.
3. Stucki D., Gisin N., Guinnard O., Ribordy G., Zbinden H. Quantum Key Distribution over 67 km with a Plug & Play System // New J. Phys. 2002. V. 4. P. 41.
4. Clavis. Plug & Play Quantum Cryptography // id3000. Specifications. idQuantiqueSA. Ver. 2.1. January 2005. 2 p.
5. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum Cryptography // Rev. Mod. Phys. 2002. Vol. 74. No. 1. pp. 145–195.
6. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа в режиме однофотонной регистрации импульсов для повышения защищённости // Радиотехника. 2015. № 2. С. 125–134.
7. Курочкин В.Л., Курочкин Ю.В., Зверев А.В., Рябцев И.И., Неизвестный И.Г. Экспериментальные исследования в области

квантовой криптографии // Фотоника. 2012. № 5. С. 54–66.

8. Makarov V. Quantum Cryptography and Quantum Cryptanalysis: Doktor. Engin. Thesis. Norwegian University of Science and Technology. 2007.

9. Lydersen L., Wiechers C., Wittmann C., Elser D., Skaar J., Makarov V. Hacking Commercial Quantum Cryptography Systems by tailored Bright Illumination // Nat. Phot. 2010. Vol. 4. No. 686. P. 5.

10. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8. С. 81–96.

11. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Моделирование процесса синхронизации системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости. Ростов-на-Дону, 2015. 9 с.

12. Pljonkin A.P., Rumyantsev K.Y. Single-Photon Synchronization Mode of Quantum Key

Distribution System. India, New Delhi, 2016. P. 531-534. DOI:10.1109/ICCTICT.2016.7514637.

References

1. Rumjancev K.E. Sistemy kvantovogo raspredelenija kljucha. Taganrog: Izdatel'stvo TTI JuFU, 2011. 264 s.
2. Babash A.V., Shankin G.P. Kriptografija. M.: SOLON-R, 2002. 512 c.
3. Stucki D., Gisin N., Guinnard O., Ribordy G., Zbinden H. Quantum Key Distribution over 67 km with a Plug & Play System // *New J. Phys.* 2002. V. 4. P. 41.
4. Clavis. Plug & Play Quantum Cryptography // id3000. Specifications. idQuantiqueSA. Ver. 2.1. January 2005. 2 p.
5. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum Cryptography // *Rev. Mod. Phys.* 2002. Vol. 74. No. 1. P. 145–195.
6. Rumjancev K.E., Pljonkin A.P. Sinhronizacija sistemy kvantovogo raspredelenija kljucha v rezhime odnofotonnoj registracii impul'sov vdlja povyshenija zashhishhennosti. 2015. № 2. S. 125–134.
7. Kurochkin V.L., Kurochkin Ju.V., Zverev A.V., Rjabcev I.I., Neizvestnyj I.G. Jeksperimental'nye issledovanija v oblasti kvantovoj kriptografii // *Fotonika*. 2012. № 5. S. 54–66.
8. Makarov V. Quantum Cryptography and Quantum Cryptanalysis: Doctor. Engineering Thesis. Norwegian University of Science and Technology, 2007.
9. Lydersen L., Wiechers C., Wittmann C., Elser D., Skaar J., Makarov V. Hacking Commercial Quantum Cryptography Systems by Tailored Bright Illumination // *Nat. Phot.* 2010. Vol. 4. No. 686. P. 5.
10. Rumjancev K.E., Pljonkin A.P. Sinhronizacija sistemy kvantovogo raspredelenija kljucha pri ispol'zovanii fotonnyh impul'sov dlja povyshenija zashhishhjonnosti // *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*. 2014. № 8. S. 81–96.
11. Rumjancev K.E., Pljonkin A.P. Modelirovanie processa sinhronizacii sistemy kvantovogo raspredelenija kljucha pri ispol'zovanii fotonnyh impul'sov dlja povyshenija zashhishhjonnosti. Rostov-na-Donu, 2015. 9 s.
12. Pljonkin A.P., Rumyantsev K.Y. Single-Photon Synchronization Mode of Quantum Key Distribution System. India, New Delhi, 2016. p. 531–534. DOI: 10.1109/ICCTICT.2016.7514637.



Artyushenko V. M.
Артюшенко В. М.

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Information Technology and Control
Systems Chair, SEI HE MR «University of Technology»,
Korolev, Russian Federation*



Volovach V. I.
Воловач В. И.

*Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of Informational and Electronic Service Chair,
FSBEI HE «Volga Region State University of Service»,
Togliatti, Russian Federation*

UDC 621.37

DETERMINATION OF PROBABILITIES OF DETECTION OF OBJECTS MOVING AT CONSTANT AND VARYING CONDITIONS OF DETECTION

In the article we consider detection probabilities of moving extended objects under various conditions of detection and in changing range. We justified the problem of obtaining analytical expressions for estimating the probability of object detection based on the statistical distribution range of detection devices. It is shown that to solve the above mentioned problem one should establish mathematical laws that define the actual distribution range of the detection device. It is related to the issue of determining and estimating the cumulative probability of object detection.

It is shown that the process of object detection should be considered as a random process carried out usually in relatively homogeneous «typical» conditions. In this case, range distribution is subject to a certain distribution law. It is shown that some uncertainty is inherent to object detection and the random nature of detection range is typical for it. The main factors influencing the object detection are established.

We introduced and found accumulating momentary and expectable probabilities of object detection by short-range wireless devices for different conditions of detection. It is shown that the object detection can be performed through continuous scan of an area and through a momentary scan. Each of these statistical characteristics is mathematically defined.

We studied the use of intensity of target detection on the range to estimate the efficiency of detection devices. It is shown that the detection devices can be classified according to the efficiency of object detection and according to the distance to the object. The efficiency of the detection process can be estimated by accumulating probabilities of object detection.

The expressions are given, that connect the momentary probabilities and the intensity of detection through object speed or scanning interval of a detection device.

We obtained expressions to estimate the expectable probability of detection of a moving object in both constant and varying conditions of detection. It is shown that according to certain laws of distribution range of detection devices, estimating the expected probability of establishing the instrument contact means determining the cumulative probability of detection based on momentary probability function. The characteristics of these laws and the nature of object motion are taken into consideration when calculating this function. Using this function to quantify the efficiency of detection devices is determined by the possibility of statistical estimating the distributions of detection ranging for all kinds of typical detection conditions in actual practice.

Key words: short range wireless device, object detection, momentary detection probability, intensity of detection, expectable detection probability.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОСТОЯННЫХ И ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ ОБНАРУЖЕНИЯ

В статье рассмотрено определение вероятностей обнаружения движущихся протяженных объектов при различных условиях обнаружения и изменяющейся дальности. Обоснована задача получения аналитических выражений для оценки вероятности обнаружения объекта по статистическому распределению дальности действия устройства обнаружения. Показано, что для решения названной задачи следует установить математические законы, которыми можно характеризовать реальные распределения дальности действия устройств обнаружения, что, в свою очередь, связано с изучением вопросов определения и оценки накапливающейся вероятности обнаружения объектов.

Показано, что процесс обнаружения объектов следует рассматривать как случайный процесс, осуществляемый, как правило, в достаточно однородных «типичных» условиях. В этом случае распределение дальностей подчиняется некоторому закону распределения. Показано, что обнаружению объекта присуща неопределенность, а также характерен случайный характер дальности обнаружения объекта. Определены основные факторы, влияющие на обнаружение объектов.

Введено понятие и найдены накапливающиеся — мгновенные и ожидаемые — вероятности обнаружения объектов устройствами ближнего действия для различных условий обнаружения. Показано, что обнаружение объектов может осуществляться как в ходе непрерывного обследования пространства, так и путем одного мгновенного наблюдения. Каждая из названных статистических характеристик определена математически.

Рассмотрено использование интенсивности обнаружения цели по дальности для количественной оценки эффективности устройств обнаружения. Показано, что устройства обнаружения можно классифицировать по эффективности обнаружения объекта по дальности до него. Эффективность же процесса обнаружения может быть оценена с помощью накапливающихся вероятностей обнаружения объекта.

Приведены выражения, связывающие мгновенные вероятности и интенсивность обнаружения через скорость движения объекта либо период обзора устройства обнаружения.

Получены выражения оценок ожидаемой вероятности обнаружения движущегося объекта как в постоянных, так и в изменяющихся условиях обнаружения. Показано, что при известных законах распределения дальности действия устройства обнаружения оценка ожидаемой вероятности установления приборного контакта сводится к определению накапливающейся вероятности обнаружения на основе функции мгновенной вероятности обнаружения, рассчитываемой с учетом характеристик этих законов и характера движения объекта. В свою очередь, использование последней функции для количественной характеристики эффективности устройств обнаружения обусловлено возможностью определения на практике статистических распределений дальности обнаружения объектов для всех видов типичных условий обнаружения.

Ключевые слова: радиотехническое устройство ближнего действия, обнаружение объекта, мгновенная вероятность обнаружения, интенсивность обнаружения, ожидаемая вероятность обнаружения.

1. Introduction

The solving of the problem of creation and theoretical analysis of a problem connected with any short range wireless device (SRWD) used for detection [1] and measuring of extended objects movement parameters [2] comes down to the solving of several local tasks among which one of the most important is the development and assessment of effectiveness indices of

SRWD taking into account the extended character of the objects under detection with constantly changing distance and different momentary detection probability laws. Earlier there was studied [1] the question of finding the valid law of distance distribution of detection devices and systems referring to the moving extended object depending on its speed of movement, character of a reflective surface, working conditions of

SRWD, taking into account static characteristics of reflected signals [3], as well as forms of direction response pattern of detection device in which radio-location modes of operation are used.

There were received [1] the estimations of detection faithfulness of extended objects on the basis of static distribution of SRWD distance as well as analytical correlations for the function of distance action distribution of detection devices which allow estimating the probability of extended object detection penetrating into the zone of SRWD action.

Moreover in most cases there can arise a necessity of acquiring analytical expressions for estimation of detection probability of an object at statistical distribution of action distance of SRWD [4].

In order to solve this task it is necessary to state mathematical laws with the help of which it is possible to characterize real distribution of action distance of detection devices which in its turn suppose the study of questions connected with the definition and estimation of accumulating detection probability of objects with the help of SRWD.

In its turn, the solving of theoretical aspects of extended objects detection allows implementing significant questions of both integrated realization of doppler radar [5], widely used in detection devices, and solving more general questions of object detection system building [6, 7].

2. Theoretical foundations of the method

2.1 *The uncertainty of the object detection of short range wireless device*

If we consider the object detection as a random process [8] (which characteristic for the most of practical cases) that is being performed in quite homogeneous «typical» conditions, the distance distribution of detection complies with a certain distribution law.

According to the typification of conditions the influence of some dominating factors on the process of detection is restricted, i.e. it is supposed that during some period of time some factors influencing the detection process remain unchanged (e.g. meteorological factors, object character, type of detection device etc.) or are changed insignificantly within the stated limits.

Thus, every separate category of «typical» conditions has opportunities for implementation

of this or that distribution law if the acquiring of this or that value of action distance of SRWD (as well as random value) is conditioned by the cooperation of a great number of factors of insignificant power.

It was established empirically and analytically, that the object which got into the control zone of short range wireless device, hardly ever gets detected at its limit range [9].

It is also established, that in a number of cases event with a relatively small range (much smaller than the average range of SRWD) the object may not be detected [10]. The reason is that detection depends not only on the distance to the object, but also on a number of factors, which can be divided into three groups:

- factors characterizing SRWD;
- factors characterizing the distribution conditions of physical fields (signals) in the environment;
- factors characterizing a detected object.

In each of these groups there are such factors that have the crucial influence on patterns of variation in the range of SRWD. These factors are commonly referred to as main factors. For example, it is the transmitter power for a radar station, the effective area of the antenna, image intensifier of target (in the case of SRWD of detectable object), and wavelength. Studying the main factors one can predict a numerical value of the range, without resorting to a special experience.

Along with this, it should be noted that any natural phenomenon, including the detection of objects is inevitably accompanied by random deviations. Therefore, in practice, no matter how accurately conditions of the experiment for the determination of the range of different SRWD are fulfilled, it is not possible to achieve exactly the same results when repeating the experience. These random deviations are caused by the presence of such secondary factors as changing the course angle of the object relative to SRWD, the isotropy of the environment, the instability of the supply voltage, the presence of «shiny» spots [10] and other.

In addition, the effectiveness of any technical device depends on the quality of work of the operator (if we do not consider automated and intelligent systems that operate without human

intervention) as the target recording element in the overall scheme of indication, that makes the decision about the fact of detection (intrusion into a zone of control of SRWD).

Different values of the recorded range can be obtained under the same conditions using different detection criteria depending on different time periods spent for their implementation.

2.2 Random nature of the detection range

Methods of probabilistic estimates of expected range of object detection using [11] a statistical distribution range of SRWD make it possible to determine such characteristics that allow us to mathematically describe the processes and acts of establishing the instrument contacts in all situations of object search and object detection. In particular it is instant and accumulating probability of objects detecting.

The difficulties of direct and precise definition of the expectable value of detection distance R are conditioned by the fact that the influence of these or those factors can be not only of stable but in most cases of unstable character and therefore cannot be previously reported and controlled.

Nevertheless, while estimating the accumulating (momentary and expectable) probabilities of object detection by SRWD it is possible to significantly improve the faithfulness of object

detection including the acquiring of necessary indices of distance distribution of SRWD.

Let us firstly consider the detection probability of objects by SRWD. Depending on the design peculiarities of detection devices and ways of their usage the investigation of the space during the process of detection can be continuous or consisting of separate momentary actions.

The observation should be referred to the continuous process if the observer constantly fixes his eyes on some part of space or if the observation is being carried out with the help of direct focus means.

If the direct focus means are used for investigation of space within some angle exceeding the width of the diagram of direction of these means, it should be considered as the observation consisting of a range of separate momentary actions. The periods of time during which momentary actions of observation are carried out depend on the degree of the angle and angular speed of observation. Sometimes these periods can be so little that the observation can be considered as continuous.

In general case the decision on the question of observation type depends on the fact which of these types provides greater precision of description of the process of device contact establishment.

In the case when the observation consists of separate actions the important criterion for estimation of observation means effectiveness during the searching is the momentary (elementary) probability g of object detection on the given distance by means of a single momentary observation.

If in the process of searching a constant observation is being carried out, the important criterion for estimation of observation means is the momentary (elementary) probability γdt of detection within a very short time period dt . The value γ is the intensity (momentary density of probability) of detection number.

The above mentioned characteristics are statistical ones, i.e. the can be found in experience [12]. For this purpose the formula are used

$$g = 1/\bar{n}, \gamma = 1/\bar{t}, \tag{1}$$

where \bar{n} is a mathematical expectation of observation number during which the object detection by SRWD is provided; \bar{t} is the mathematical expectation of time during which the object

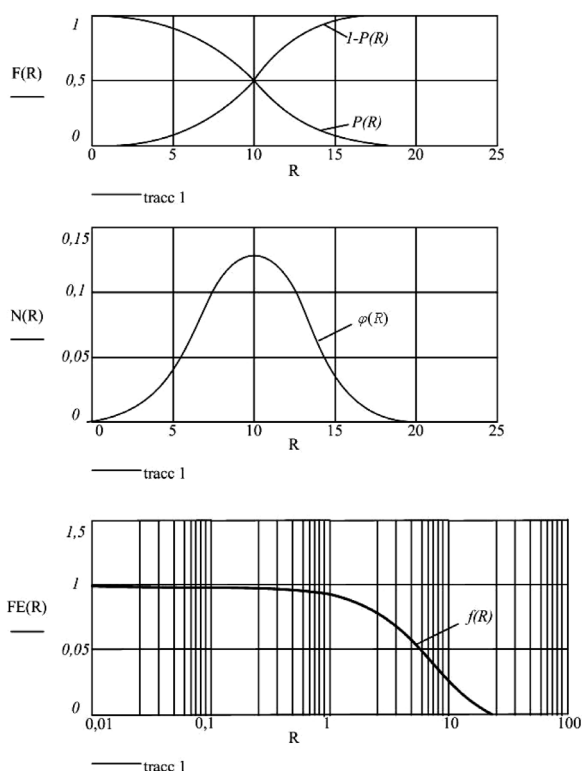


Figure 1. Function graph $P(R)$, $\varphi(R)$ and $f(R)$

detection number from the moment of switching on of the detection system (device) is provided.

Use of values g and γ for quantitative characteristic of detection devices effectiveness is provided by the possibility of detection of statistical distributions of distance of object detection and definition on their basis the relationships of $\gamma(R)$ for the typical detection conditions under observation. The mentioned graphics for different (good, normal, bad) detection conditions are presented in [12]. The graphics have a decreasing character at increasing of the distance from SRWD to the detected object; the lines of the graphic come closer to the increase of the mentioned distance under different conditions of detection (i.e. the detection conditions are levelled out on the significant distances; it should be noted that under such conditions the probability of object detection is minimum).

2.3 Intensity of object detection

Besides the two mentioned characteristics one can use the third one which is called intensity (momentary density of probability) of object detection at distance

$$f = -d\varphi/dR = -P(R)/[1 - P(R)], \quad (2)$$

where $\varphi = \varphi(R)$ is a detection potential, $P(R)$ is an integral law of distance distribution of object detection.

Review of analytical dependences shows that for SRWD with low efficiency even when the object is in the immediate vicinity of SRWD, the probability of finding a given object will be less than unity. For the most effective SRWD reliable detection occurs at some distance.

Among the considered characteristics there are definite expressions [12] which connect them with the speed of movement of a detected object:

$$\gamma = fV_{ob}; \quad (3)$$

$$g = 1 - \exp(-\gamma T), \quad (4)$$

where V_{ob} is a speed of movement of the object; T is a period of view;

$$f = \gamma/V_{ob} = \ln(1/(1-g))/V_{ob}T. \quad (5)$$

If we know the law of distribution $P(R)$ we can find an analytical expression for f . Comparable function graphs $P(R)$, $\varphi(R)$ and $f(R)$ are represented on the Figure 1.

From these graphs [1] we see that the detection probability for SRWD with low effectiveness will be less than 1. For more effective detection devices the faithful detection occurs at some distance R_r .

The effectiveness of the process of contact establishment with the object within this or that time period can be assessed with the help of accumulating (increasing) detection probabilities of an object [12, 13]. Let us study this question stage by stage for different detection conditions and character of object behaviour.

3. Expectable detection probability of objects by security systems

3.1 Unchangeable observation conditions ($g = const$, $\gamma = const$)

If the sampling action detection system is used and the detection of an object during every detection cycle is a dependent event, the detection probability $P(n)$ of an object can be found at least once under the conditions of n momentary observations in accordance with the theory of repetition of independent experiments according to the formula [14]:

$$P(n) = 1 - (1 - g)^n. \quad (6)$$

Basing on this formula we can draw an important practical conclusion: when the physical conditions, in which the detection is taking place, provide certain detection probability g within a single momentary observation, the probability $P(n)$ (be it never so small) can be very close to the value 1 having n big enough, i. e. the event of detecting an object will ten to one occur.

If the observation is being carried out continuously within the time t under the unchangeable physical conditions, the detection probability of an object P within the time t is being determined by the formula

$$P(t) = 1 - \exp(-\gamma t). \quad (7)$$

Formula (7) shows that having the value of a quantity γ and describing the observation time t , it is possible to calculate the detection probability of an object upon non-measurable observation conditions (upon the unchangeable distance to an object $R = const$ in particular).

Considering the above said it was accepted that an object is at a certain distance from the detection device, which is not changed in the course of time. It was also supposed that γ is not changed in the course of time t .

One can see that the value γt in the degree of expression (7), (be the value γ so small) theoretically can be infinitely big as it is always possible to choose such observation time t , that the detection probability $P(t)$ will be close to the value 1.

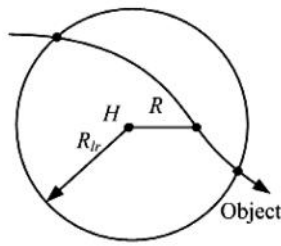


Figure 2. Object trajectory in the area of SRWD action

3.2 Changeable observation conditions ($g = var; \gamma = var$)

Let us mark the changing values of momentary probabilities with g_i and γdt , where g_i is a momentary detection probability of object for the momentary observation i , and γdt is a density of detection probability of an object that changes in the course of time. The formula for calculation of detection probability [12] in this case will be as follows:

— for discrete observation

$$P(n) = 1 - (1 - g_1)(1 - g_2) \dots (1 - g_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - g_i); \quad (8)$$

— for continuous observation

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \gamma_i dt\right]. \quad (9)$$

4. Estimation of the expectable detection probability of a moving object

4.1 Unchangeable observation conditions ($g = const, \gamma = const$)

Concerning quickly moving objects one can state that during the time of their movement in the area of detection devices control which is restricted by the outer detection limit R_{lr} , the sufficient change of physical observation conditions as well as changes of the values g and γ connected to this observation are not taking place. This supposition is admissible and even regular in some cases [1].

That's why one can consider (Figure 2) that the change of the values g and γ in the area restricted by the radius R_{lr} will be conditioned only by the movement of an object in the area of detection device control (change of its relative location). Point H on the Figure 2 denotes the place of an observer location (detection device).

Thus, g and γ are the functions of the current distance to the object r , which is denoted inside the area of detection device activity R , i.e. $g_i = g_i(r) = g_i(R)$ and $\gamma_i = \gamma_i(r) = \gamma_i(R)$. Values $P(n)$ and $P(t)$ can be defined according to the formula:

$$P(n) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R)]; \quad (10)$$

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \gamma_i(R) dt\right]. \quad (11)$$

Values $g_i(R)$ and $\gamma_i(R)$ can be chosen by the SRWD operator.

4.2 Changeable observation conditions ($g = var; \gamma = var$)

The situation at which g and γ are the functions of not only the current distance to the object R , but also of the current time t (as in the course of time the detection conditions, leading to the change of g and γ change) is the most common one. In this case $g_t = g_t(R, t)$ and $\gamma_t = \gamma_t(R, t)$ and formulas for defining detection probabilities $P(n)$ и $P(t)$ are as follows:

$$P(n) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - g_i(R, t)]; \quad (12)$$

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \gamma_i(R, t) dt\right]. \quad (13)$$

Values $g_i(R, t)$ and $\gamma_i(R, t)$ a chosen as applied to the corresponding conditions characteristic for every detection i . However in order to directly calculate value $P(t)$ using the formulas (11) and (13) it is necessary to find analytical expressions for laws of change $g_i(R)$ and $\gamma_i(R, t)$.

5. Conclusion

There introduced the concept and finds the detection probability of objects with the help of detection systems for different detection conditions. The concept of intensity of object detection at distance is defined. The analytical expression for detection intensity f for normal distribution law was found.

There received the estimations of the expectable probability of a moving object detection both in constant and changing detection conditions. In particular, if the physical conditions provide certain detection probability g within a single momentary observation, the event of object detection, in spite of its smallness, will ten to one occur if n is big enough.

It is shown that with the certain laws of range distribution of SRWD the estimation of the expected probability of establishing the instrument contact is reduced to the determination of the cumulative detection probability $P(t)$ based on the function of the instantaneous detection probability $\gamma = \gamma(t)$, that we calculate taking into account the characteristics of these laws and the nature of the motion of the object.

References

1. Volovach V.I. Metody i algoritmy analiza radiotekhnicheskikh ustrojstv obnaruzhenija blizhnego dejstvija / Pod red. V.M. Artjushenko. M.: Radio i svjaz', 2013. 228 s.
2. Egorov Ju.M., Izotov V.A., Kochetov L.A. i dr. Distancionnyj kontrol' skorosti dvizhenija transportnyh sredstv. M.: Transport, 1987. 271 s.
3. Shehy I.I. Optimum Detection of Signals in Non-Gaussian Noise // Journ. of Acoust. Soc. of Am. 1978. Vol. 63, 1. P. 81–90.
4. Ostrovitjanov R.V., Basalov F.A. Statisticheskaja teorija radiolokacii protjazhennyh celej. M.: Radio i svjaz', 1982. 232 s.
5. Szabo L., Vensenn E. The Doppler Radar Sensor in Integrated Execution // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Boston, Mass., 31 May — 3 June, 1983, New York. N.Y., 1983. P. 472–474.
6. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Statistical Characteristics of Envelope Outliers Duration of non-Gaussian Information Processes // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). 2013. P. 137–140.
7. Hughes P.K. Metody obnaruzhenija celej radiolokatorom s vysokoj razreshajushhej sposobnost'ju // IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst. 1983. Vol. 19, 5. P. 663–667.
8. Bendat Dzh., Pirsol A. Izmerenie i analiz sluchajnyh processov. M.: Mir, 1974. 326 s.
9. Teoreticheskie osnovy radiolokacii / Pod red. V.E. Dulevicha. M.: Sov. radio, 1978. 608 s.
10. Kogan I.M. Blizhnaja radiolokacija. M.: Sov. radio, 1973. 272 s.
11. Tihonov V.I. Statisticheskaja radiotekhnika. M.: Radio i svjaz', 1982. 624 s.
12. Abguk V.A., Suzdal' V.G. Poisk ob`ektov. M.: Sov. radio, 1977. 336 s.
13. Kulikov E.I., Trifonov A.P. Ocenka parametrov signala na fone pomeh. M.: Sov. radio, 1978. 296 s.
14. Levin B.R., Shvarc V. Verojatnostnye modeli i metody v sistemah svjazi i upravlenija. M.: Radio i svjaz', 1985. 312 s.

Список литературы

1. Воловач В.И. Методы и алгоритмы анализа радиотехнических устройств обнаружения ближнего действия / Под ред. В.М. Артюшенко. М.: Радио и связь, 2013. 228 с.
2. Егоров Ю.М., Изотов В.А., Кочетов Л.А. и др. Дистанционный контроль скорости движения транспортных средств. М.: Транспорт, 1987. 271 с.
3. Shehy I.I. Optimum Detection of Signals in Non-Gaussian Noise // Journ. of Acoust. Soc. of Am. 1978. Vol. 63, 1. P. 81–90.
4. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.
5. Szabo L., Vensenn E. The Doppler Radar Sensor in Integrated Execution // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Boston, Mass., 31 May – 3 June, 1983, New York. N.Y., 1983. P. 472–474.
6. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Statistical Characteristics of Envelope Outliers Duration of non-Gaussian Information Processes // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). 2013. P. 137–140.
7. Hughes P.K. Методы обнаружения целей радиолокатором с высокой разрешающей способностью // IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst. 1983. Vol. 19, 5. P. 663–667.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 326 с.
9. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
10. Коган И.М. Ближняя радиолокация. М.: Сов. радио, 1973. 272 с.
11. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
12. Абгук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. М.: Сов. радио, 1977. 336 с.
13. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигнала на фоне помех. М.: Сов. радио, 1978. 296 с.
14. Левин Б.Р., Шварц В. Вероятностные модели и методы в системах связи и управлении. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.



Зайнуллин А. Р.

Zainullin A. R.

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

УДК 621.372

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ В МНОГОЖИЛЬНЫХ ВОЛОКНАХ

В статье описывается исследование в области технологии оптической передачи данных, направленное на преодоление ограничений пропускной способности высокоскоростных оптических каналов. Для достижения этой цели были использованы технология пространственного мультиплексирования (SDM) с рассмотрением возможности применения многожильных оптических волокон (MCF) и режима мультиплексирования с разделением по модам (MDM). В частности, описаны алгоритмы мультиплексирования многомерных систем передачи данных (M2) для передачи по MCF-волокнам. Представлена разработка интегрированного фотонно-кремниевого устройства, способного выполнять преобразования мод для MDM режима мультиплексирования. Это устройство позволяет передавать сгенерированный сигнал в MDM-режиме через различные сердцевинны MCF-волокна, применяя SDM технологию. Рассмотрен процесс формирования MDM режима путем перехода основной моды в моду более высокого порядка в асимметричном делителе в первом окне прозрачности. Преобразование основной моды в моду более высокого порядка в асимметричном делителе основывается на условии фазового синхронизма, согласно методу, описанному в теории связанных мод. Однако эффективность передачи ограничена перекрестными помехами, возникающими между смежными волокнами в MCF-волокне. В результате был проведен теоретический анализ перекрестных помех с учетом состояния многоволоконного возбуждения на промежутке 150 м четырехжильного оптического волокна MCF с постоянным коэффициентом скручивания 4 об./м и двумя различными радиусами изгиба (R_b) величинами 67 и 100 см. Выводы, полученные при теоретическом анализе, были подтверждены математической моделью статистических данных распределения этих помех при возбуждении нескольких волокон в многосердцевинном волокне. Таким образом, была решена задача преодоления ограничения пропускной способности оптических каналов связи, а также продемонстрирован результат экспериментального исследования ожидаемых перекрестных помех внутри многосердцевинного волокна после одновременного возбуждения нескольких волокон.

Ключевые слова: пространственное мультиплексирование каналов, мультиплексирование с разделением по модам, многожильное оптическое волокно, многомодовое распространение, оптические системы, оптические сети.

DISTRIBUTION STATISTICS STUDING OF CROSSTALK IN MULTICORE FIBERS

This article describes current research in optical transmission technology aiming to overcome the capacity limitations in high-bitrate optical data links.

A spatial multiplexing technology (SDM) considering the possibility of using multicore optical fiber (MCF) and mode division multiplexing (MDM) have been used to solve these problems. In particular, the enabling algorithms of multidimensional multiplexing (M2) transmission schemes for transmission in multicore fiber were described. The development of an integrated device capable of performing mode conversion for modal division multiplexing (MDM) is reported herein. This device enables the generation of a mode-division multiplexed signal to be transmitted

through the different cores of a MCF employing SDM technology. The MDM regime forming based on conversion from fundamental mode to the higher order mode in an asymmetric coupler in the first transmission window of an optical fiber is considered. This mode conversion determined by the phase-matching condition given by the coupled mode theory. However, the transmission performance is limited by the crosstalk from each core in the MCF. Therefore the statistical analysis of the inter-core crosstalk considering a multi-core excitation condition has been experimentally evaluated on a 150 m optical with a 4-core MCF with a constant twist rate of 4 turns/m and two different bending radius (Rb) configurations of 67 and 100 cm. Theoretical analyses results have been proved by mathematical model of the statistical data crosstalk distribution when several cores are excited simultaneously in the MCF. Thus the bandwidth limitation overcoming task of the optical communication channels was solved and experimental study of the crosstalk expected is presented.

Key words: spatial multiplexing technology, mode division multiplexing, multicore optical fiber, multimode distribution, the optical system, optical network.

1. Введение

Использование пространственного мультиплексирования (*SDM*) было выбрано в качестве решения задачи дальнейшего увеличения пропускной способности оптических линий связи. *SDM* обеспечивает многочисленные пространственные каналы в одном волокне [1, 2]. Выделяют две основные реализации *SDM* технологии [1]: (I) использование многосердцевинного волокна (*MCF*), содержащего отдельные волокна с низким уровнем перекрестных помех, или (II) передачу данных по различным модам в режиме модового мультиплексирования (*MDM*). В данной работе демонстрируются разработанные технологии, ориентированные на *MCF* оптические линии, использующие *MDM*-мультиплексирование.

Оптические длины волн в окне 850 нм являются привлекательными для оптических линий связи малой дальности в качестве недорогих коммерчески доступных устройств, например *VCSEL* с прямой полосой модуляции, превышающие Гбит/с порог. Было продемонстрировано использование полосы 850 нм в *SSMF*-волокне, включая модовые фильтры, упраздняющие моды

высокого порядка [3, 4]. Актуальными считаются возможности конвертации, мультиплексирования и демультиплексирования оптических мод на длине волны 850 нм. В данной статье также оцениваются ожидаемые перекрестные помехи оптической линии связи *SDM-MCF*. Оптическая эффективность ограничена перекрытием мод между линейно поляризованными модами (англ. *Linearly polarized (LP)*) каждого волокна [5]. Если уровень перекрестных помех между волокнами достаточно высокий, именуемый в источниках как межсердцевинные перекрестные помехи (англ. *inter-core-crosstalk, IC-XT*), то он должен компенсироваться применением цифровой обработки сигналов на приемнике. В общем случае аналитически исследованы межсердцевинные перекрестные помехи (*IC-XT*) в *MCF*, то есть в момент возбуждения нескольких сердцевинных волокон.

2. Модовый преобразователь мультиплексирования

Общая идея оптической линии *MDM*, где различные потоки данных передаются по модам LP_{01} и LP_{11} , изображена на рисунке 1, а. Оптические сигналы от двух лазеров, работа-

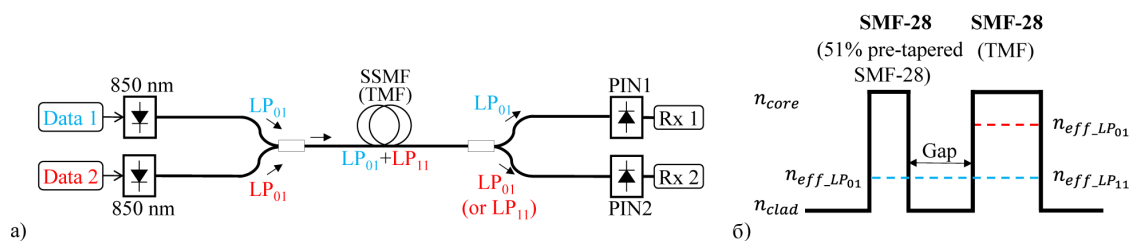


Рисунок 1. Схема для модового мультиплексирования (*MDM*) на длине волны 850 нм по двумодовому оптическому волокну (*TMF*) (а); профиль распределения показателя преломления связанных мод между модами LP_{01} и LP_{11} (б)

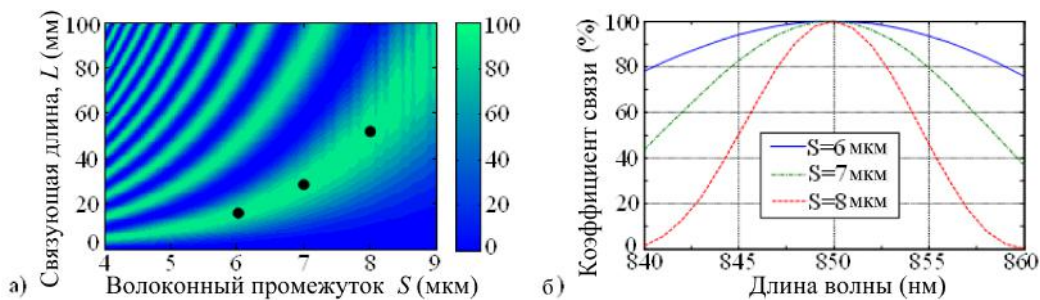


Рисунок 2. Коэффициент связи (LP_{01} к LP_{11}) в соответствии со связующей длиной в зависимости от промежутка между волокнами (а); отношение коэффициент связи LP_{01} к LP_{11} в зависимости от длины волны (б)

ющих на длине волны 850 нм, будут соответствовать LP_{01} моде в том случае, если лазеры точно выровнены по центру волокна, или если участки световодов изготовлены из оптического волокна, функционирующего в режиме $SSMF$ волокна на длине волны 850 нм. Модовый преобразователь необходим для перевода основной моды LP_{01} в моду высшего порядка LP_{11} и дальнейшей передачи обеих мод по $SSMF$ волокну или двумодовому волокну (TMF) при необходимости. При должной настройке оптический делитель может выполнять функцию модового преобразователя и в то же время модового мультиплексора/демультиплексора. На приемной стороне модовый демультиплексор необходим для перенаправления каждой моды на соответствующий фотодиод (PIN).

В модовом преобразователе (асимметричный делитель) использовано волокно SMF-28 от компании *Corning Inc.* (диаметр сердцевины 8,2 мкм, $\Delta = 0,36$ % разность показателей преломления и оболочки из SiO_2). Это волокно поддерживает две линейно-поляризованные моды (моды LP_{01} и LP_{11}) на длине волны 850 нм. Эффективные коэффициенты показателя преломления рассчитываются при помощи метода трехмерного распространения луча (3D-BPM). Рассчитанные показатели преломления равны $n_{core} = 1,4577$, $n_{cladding} = 1,4525$, $n_{eff,01} = 1,4564$ и $n_{eff,11} = 1,4545$. Переход от основной моды (LP_{01}) в моду более высокого порядка (LP_{11}) в асимметричном делителе определяется фазовым соответствием, где эффективный показатель моды LP_{01} в коническом волокне SMF-28 должен соответствовать эффективному показателю моды LP_{11} в TMF волокне, как это показано на рисунке 1, б. Модовое преобра-

зование включает в себя не только промежуток между волокнами (S), но и связующую длину (L). Оптимальная ширина конического волокна была выбрана таким образом, чтобы достичь условия фазового синхронизма для моды LP_{11} , что, в свою очередь, может быть осуществлено за счет уменьшения (на 51 %) диаметра одной из жил SMF-28 волокна до 4,17 мкм.

На рисунке 2, а изображена симуляция асимметричного делителя на длине волны 850 нм для различных расстояний между волокнами (S) и значений длины связи (L). Наилучшая эффективность связи предполагается при разделении нескольких волокон на значение связующей длины. Оптимальная эффективность достигается при расстоянии между волокнами $S = 6, 7$ и 8 мкм и значении связующей длины $L = 15,66, 46,95$ и 52,17 мм соответственно. Эти разрывы между волокнами изображены на рисунке 2, а в виде черных точек. На рисунке 2, б показана эффективность связи в области 850 нм. Ожидаемые значения потери связи ниже 0,05 дБ. Производительность делителя для более высокого диапазона длин волн зависит от расстояния между волокнами. Лучшая эффективность связи достигается при наименьшем расстоянии и кратчайшей длине связи $S = 6$ мкм и $L = 15,66$ мм, достигаемая эффективность связи 93,5 % (0,3 дБ вносимых потерь), учитывая диапазон в 10 нм.

3. Анализ перекрестных помех пространственного мультиплексирования

Для успешной передачи в многожильной оптической линии MCF при возбуждении нескольких волокон необходимо проанализировать влияние перекрестных помех в режиме многожильного возбуждения [6, 7]. Учитывая,

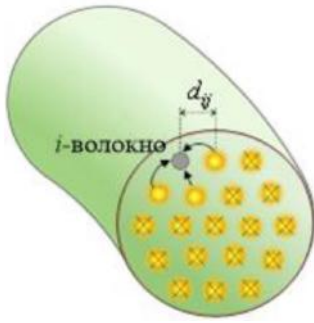


Рисунок 3. Многоволоконные возбуждения при увеличении перекрестных помех в *i*-м волокне соседними

что в *MCF* освещаемы *N* волокон, модовой связью не соседних волокон по отношению к невозбужденному *i*-му волокну можно пренебречь, как это показано на рисунке 3. Предполагая, что перекрестные помехи увеличиваются только на *M* соседних волокон ($M < N$), перекрестные помехи в *i*-м волокне определяются следующим образом:

$$Y := \frac{P_i(z=L)}{\sum_{j=1}^M p_j(z=L)} = \frac{\sum_{j=1}^M p_{ij}(z=L)}{\sum_{j=1}^M p_j(z=L)} \approx \frac{M \cdot p_{ij}(z=L)}{\sum_{j=1}^M p_j(z=L)} \quad (1)$$

где $P_i(z=L)$ — полная выходная мощность в *i*-м волокне; $p_j(z=L)$ — выходная мощность в *j*-м возбужденном волокне и $p_{ij}(z=L)$ — сопряженная мощность в *i*-м волокне от *j*-го волокна на выходе. Предполагая, что соседние волокна с одинаковым центральным расстоянием (d_{ij}) от *i*-го волокна, мы приближенно считаем $P_i(z=L) \approx M \cdot p_{ij}(z=L)$. Кроме того, *IC-XT* от *j*-го волокна по отношению к *i*-му волокну определяется выражением $X_{ij} = p_{ij}(z=L)/p_j(z=L)$. Таким образом, переменные *Y* и X_{ij} могут быть связаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Y} &\approx \frac{1}{M \cdot p_{ij}(z=L)} \sum_{j=1}^M p_j(z=L) = \\ &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{p_j(z=L)}{p_{ij}(z=L)} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{1}{X_{ij}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Из уравнения (2) распространение перекрестных помех *i*-го волокна может быть найдено после выполнения следующего дифференцирования. Функция плотности вероятности переменной $Z_{ij} = 1/X_{ij}$, где $X_{ij} \geq 0$, может быть записана в следующем виде:

$$f_{Z_{ij}}(z_{ij}) = f_{X_{ij}}\left(\frac{1}{z_{ij}}\right) \left| \frac{d}{dz_{ij}} \left(\frac{1}{z_{ij}} \right) \right| = \frac{1}{z_{ij}^2} f_{X_{ij}}\left(\frac{1}{z_{ij}}\right). \quad (3)$$

К тому же, вводя новую случайную переменную $W = \sum Z_{ij}$, производная $f_w(w)$ будет выражаться следующим образом:

$$\begin{aligned} f_W(w) &= f_{Z_{i1}}(w) * \dots * f_{Z_{iM}}(w) = \\ &= \left[\frac{1}{w^2} f_{X_{i1}}\left(\frac{1}{w}\right) \right] * \dots * \left[\frac{1}{w^2} f_{X_{iM}}\left(\frac{1}{w}\right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где знак * обозначает операцию свертки. Из уравнения (4) можно выразить производную случайной переменной $U=1/W$ в виде:

$$\begin{aligned} f_U(u) &= f_W\left(\frac{1}{u}\right) \left| \frac{d}{du} \left(\frac{1}{u} \right) \right| = \\ &= \frac{1}{u^2} \left[\left[u^2 f_{X_{i1}}(u) \right] * \dots * \left[u^2 f_{X_{iM}}(u) \right] \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где $f_{X_{ij}}(u)$ находится из уравнения (21) в [7]. В итоге производная случайно переменной $Y = M \cdot U$ находится из уравнения (5) и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} f_Y(y) &= f_U\left(\frac{y}{M}\right) \left| \frac{d}{dy} \left(\frac{y}{M} \right) \right| = \\ &= \frac{1}{M^{2M-1} y^2} \left[\left[y^2 f_{X_{i1}}\left(\frac{y}{M}\right) \right] * \dots * \left[y^2 f_{X_{iM}}\left(\frac{y}{M}\right) \right] \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Как описано в уравнении (6), распространение перекрестных помех в состоянии многосердцевинного возбуждения может быть установлено по модели *IC-XT*, описанной в источнике [7]. Это исследование показывает, что распределение перекрестных помех в *MCF* линии возбуждения также может быть идентифицировано как хи-квадрат распределение. Тем не менее, степени свободы распространения перекрестных помех могут быть увеличены более чем на 4 степени за счет $M-1$ операций свертки. Математическая интерпретация заключается в приращении изменения перекрестных помех из-за операции свертки. Кроме того, физическое обоснование связано с приращением числа точек синхронизма в *i*-м волокне в связи с возбуждением соседних волокон. Для подтверждения результатов теоретического анализа экспериментально было исследовано однородное *MCF* волокно с 4 жилами, проведен анализ статистики перекрестных помех в линейных и нелинейных режимах при рассмотрении вопроса о многоволоконном возбуждении.

Был проведен статистический анализ перекрестных помех с учетом состояния многоволоконного возбуждения на промежутке 150 м 4-жильного оптического волокна *MCF* с постоянным коэффициентом скручивания 4 об./м и двумя различными радиусами

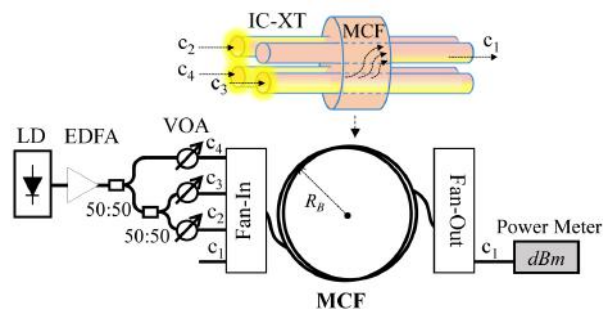


Рисунок 4. Экспериментальная установка для оценки перекрестных помех внутри жил в режиме многоволоконного возбуждения

изгиба (R_B) величинами 67 и 100 см, как показано на рисунке 4. Перестраиваемый лазер с внешней резонаторной полостью (англ. *ECL*) при длине волны 1550 нм при частоте линии 50 кГц использовался совместно с оптическим усилителем на основе оптического волокна, легированного эрбием (англ. *EDFA*). Возможно также использование других схем усиления многосердцевинного волокна: в качестве *EDFA* с накачкой оболочки (англ. *cladding-pumped EDFAs*) [8], *EDFA* с волоконным расслоением (англ. *fiber-bundle EDFAs*) [9] или *EDFA* с накачкой общего волокна (англ. *pumped shared-core EDFAs*) [10].

В ходе экспериментальных измерений *EDFA* усиление увеличивается с тем, чтобы уменьшить усреднение *IC-XT* из-за усиления спонтанного излучения (англ. *Amplified Spontaneous Emission (ASE)*) шума [6]. Использовались три различных оптических разветвителя (50:50) с тремя переменными оптическими аттенюаторами (*VOA*), чтобы сбалансировать оптическую мощность, вносимую во 2, 3 и 4 волокна. Функция плотности вероятности (англ. *PDF*) перекрестных помех была измерена в 1-м волокне с помощью измерителя мощности, используя метод волнового свипирования, описанный в [6] в диапазоне от 1550 до 1580 нм с шагом 5 мкм.

Анализ перекрестных помех в многосердцевинном возбуждении осуществляется с учетом только возбужденных соседних волокон. Облучая 2-ое, 3-е и 4-е волокна, перекрестные помехи в 1-м волокне анализируются исключительно с учетом модовой связи 1-го волокна со 2-м и 3-м волокнами. Как можно увидеть из рисунка 5, измеренная величина *PDF* в межволоконных перекрестных помехах в 1-м волокне соответствует выраже-

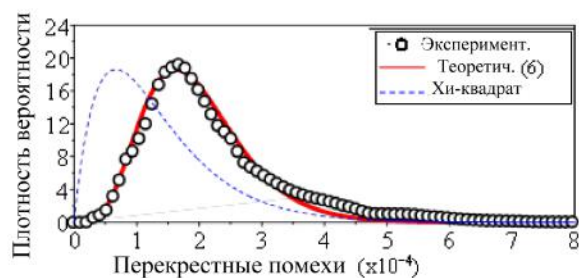


Рисунок 5. Анализ функции плотности вероятности (*PDF*) внутриканальных перекрестных помех (*IC-XT*) в режиме многосердцевинного возбуждения и радиусом изгиба $R_B = 100$ см

нию (6), при использовании выражения (21) из [7] для оценки отдельных *PDF* перекрестных помех $f_{X_{12}}(y)$ и $f_{X_{13}}(y)$ при $N_L = 136$ и $N_L = 206$ соответственно. Как было отмечено ранее, *PDF* перекрестных помех при многосердцевинном возбуждении характеризуется более чем 4-мя степенями свободы распределения хи-квадрат из-за приращения дисперсии перекрестных помех вследствие операции свертки, как это показано на рисунке 5.

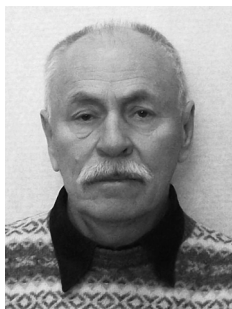
4. Заключение

В данной статье описывается метод использования режима мультиплексирования с разделением по модам (*MDM*) для многомерных систем передачи данных (M^2) в *MCF*. В качестве первого шага была рассмотрена структура интегрированного фотонно-кремниевого устройства, способного выполнить преобразование мод. Для поддержания LP_{01} и LP_{11} мод на длине волны 850 нм использовалось оптическое волокно марки *SMF-28*. Преобразование основной моды (LP_{01}) в моду более высокого порядка (LP_{11}) в асимметричном делителе основывалось на условии фазового синхронизма, согласно методу, описанному в теории связанных мод. Также было исследовано распределение перекрестных помех в *MCF* с учетом многоволоконного возбуждения. Теоретический и экспериментальный анализы показывают, что распределение перекрестных помех является распределением хи-квадрат с более чем четырьмя степенями свободы.

Данное исследование выполнено при поддержке Стипендиатов Президента Российской Федерации, направляемых на обучение за рубеж в 2015/16 учебном году (приказ № 558 от 03.06.2015).

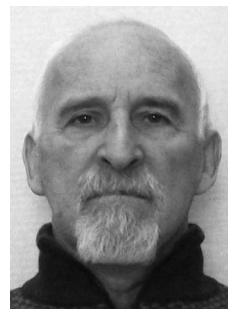
Список литературы**References**

1. Ryf R. SDM Components and MIMO Experiments in Multimode and Multicore Fibers // European Conference on Optical Communication (ECOC2014), France, 2014. T. 2.1.1. P. 1–3.
2. Mizuno T., Takara H., Sano A., Miyamoto Y. Dense Space Division Multiplexed Transmission over Multi-Core and Multi-Mode Fiber // J. Light Technol. 2016. Issue 34, No. 2. P. 582–592.
3. Moon S., Kim D.Y. Effective Single-Mode Transmission at Wavelengths Shorter than the Cutoff Wavelength of an Optical Fiber // IEEE Photon. Technol. Lett. 2005, Issue 17, No. 12. P. 2604–2606.
4. Tian Z., Chen C., Plant D.V. 850-nm VCSEL Transmission over Standard Single-Mode Fiber Using Fiber Mode Filter // IEEE Photon. Technol. Lett. 2012. Issue 24, No. 5. P. 368–370.
5. Llorente R., Morant M., Beltrán M., Macho A. Deep Optical Access on Multi-Core and Multi-Mode Fiber for Integrated Wireless Applications // SPIE 9387, 938708-1 — 9388708-8. 2015.
6. Macho A., Morant M., Llorente R. Experimental Analysis of Multicore Crosstalk Impact on MIMO LTE-A Radio-over-Fiber Optical Systems // ICCW 15454481. 2015. P. 329–333.
7. Macho A., Morant M., Llorente R. Unified Model of Linear and Nonlinear Crosstalk in Multi-Core Fiber // J. Light Technol. 2016. Issue 34, No. 13. P. 3035–3046.
8. Chen H., Fontaine N. K., Ryf R., Huang C.J., Shang K., Essiambre R. Demonstration of Cladding-Pumped Six-Core Erbium-Doped Fiber Amplifier // Journal of Light. Technol., 2016. Issue 34, No. 8. P. 1654–1660.
9. Yamada M., Tsujikawa K., Ma L., Ichii K., Matsuo S., Hanzawa N., Ono H. Optical Fiber Amplifier Employing a Bundle of Reduced Cladding Erbium-Doped Fibers // IEEE Photon. Technol. Lett. 2012. Issue 24, No. 21. P. 1910–1913.
10. Sakaguchi J., Klaus W., Puttnam B. J., Mendinueta J-M. D., Awaji Y., Wada N., Tsuchida Y., Maeda K. 19-core MCF Transmission System Using EDFA with Shared Core Pumping Coupled via Free-Space Optics // Opt. Exp. 2014. Issue 22, No. 1. P. 90–95.



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 621.317.087.92+681.3.05

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА ВРЕМЯ-ИНТЕРВАЛЬНЫХ КОДОВ

Статья относится к области приема и декодирования самосинхронизирующихся импульсных последовательностей на основе использования время-интервальных кодов. Данная тема актуальна, т.к. время-интервальное кодирование имеет высокую помехозащищенность и до настоящего времени используется в системах обработки информации, в устройствах помехоустойчивого кодирования и декодирования информации, в системах управления объектами. Приводятся различные методы повышения помехоустойчивости приема время-интервальных кодов на основе использования значения средней частоты импульсной помехи. Цифровое значение средней частоты импульсов помехи, формирующееся на реверсивном счетчике, используется для непрерывной автоматической регулировки порогового уровня входного амплитудного квантователя. Пороговый уровень амплитудного квантователя автоматически регулируется в зависимости от величины средней частоты помехи, поступающей на вход устройства в смеси с полезными импульсами время-интервального кода. Автоматическая регулировка порогового уровня амплитудного квантователя позволяет минимизировать вероятность ошибки при декодировании время-интервальных кодов. Достоинством предложенных устройств декодирования время-интервальных кодов также является то, что в них используется одна и та же дискретная линия задержки как для декодирования время-интервальных кодов, так и для оценки значения средней частоты импульсов помехи. Предлагается для реализации линии задержки на основе регистра сдвига использовать программируемые логические интегральные схемы, позволяющие создавать регистры сдвига с большим числом разрядов. На все описанные приемные устройства получены авторские свидетельства СССР. Рекомендуется к применению в асинхронных системах приема и декодирования информации, использующих время-интервальные коды (самосинхронизирующиеся импульсные последовательности).

Ключевые слова: самосинхронизирующаяся импульсная последовательность, помехоустойчивость, время-интервальный код, амплитудный квантователь, частота импульсной помехи, кодирование, декодирование, вероятность ошибки, программируемые логические интегральные схемы, асинхронные системы.

THE INCREASE OF IMMUNITY OF RECEIVING TIME-INTERVAL CODES

Article relates to receiving and decoding the self-synchronizing pulse sequences through the use of time-interval codes. This topic is relevant because encoding-time interval has a high noise immunity to the present time is used in information processing devices error-correcting coding and decoding information in object management systems. The various methods to improve the noise immunity of the reception-interval time code through the use of the mean frequency pulse interference. The numerical value of the average pulse frequency interference is formed on the down counter is used for continuous automatic adjustment of the threshold level of the input amplitude quantizer. The threshold level of the amplitude quantizer automatically adjusted depending on the magnitude of the average interference frequency, input to apparatus useful in admixture with the time-interval pulse code. Automatic adjustment of the threshold amplitude quantizer to minimize the probability of error in decoding the time-interval codes. The advantage of the proposed decoding apparatus time-interval codes is also that they use the same discrete delay line for decoding time-interval codes, and for evaluating the value of the average pulse frequency interference. It is proposed to implement the delay line on the basis of the shift register to use programmable logic integrated circuits, allow you to create shift registers with a large number of bits. In all the above receptors received copyright certificates of the USSR. Recommended for use in asynchronous systems receive and decode information using a time-interval codes (self-synchronizing pulse sequences).

Key words: self-clocking pulse sequence, noise immunity, time-interval code, quantizer amplitude, frequency impulse noise threshold, encoding, decoding, error probability, programmable logic integrated circuits, asynchronous system.

Статья относится к области двоичного кодирования и декодирования информации в асинхронных системах. В [1] рассматриваются вопросы кодирования и декодирования сигналов, построенных на базе время-интервальных кодов (ВИК) (или самосинхронизирующихся импульсных последовательностей). Рассматриваются методы повышения помехоустойчивости устройств декодирования ВИК. ВИК представляют собой серии импульсов одинаковой длительности, которые расположены на базовом времени кода на неравных и некратных интервалах между собой, что обеспечивает максимальную помехоустойчивость при их декодировании.

Все приемные устройства ВИК строятся по одному принципу на основе использования линии задержки (ЛЗ), на определенных отводах которой при приеме ВИК появляются кодовые комбинации (последовательности) ВИК, в виде серии импульсов [1]. Когда кодовые последовательности ВИК заполняют ЛЗ, с помощью схем совпадения осуществляется декодирование ВИК и с помощью дешифратора (ДШ) кодовые комбинации разделяются друг от друга. Схема такого устройства представлена на рисунке 1.

Во время приема кодовых комбинаций ВИК, кроме полезных импульсов, на вход ЛЗ поступают импульсы помехи, снижающие помехоустойчивость приема ВИК. Повышение помехоустойчивости приема ВИК может осуществляться различными способами. Например, повысить помехоустойчивость можно с помощью мажоритарного декодирования.

В настоящей статье рассматриваются декодирующие устройства, защищенные авторскими свидетельствами СССР, которые повышают помехоустойчивость приема ВИК с помощью автоматической регулировки порога амплитудного квантователя (АК) в зависимости от интенсивности импульсной помехи.

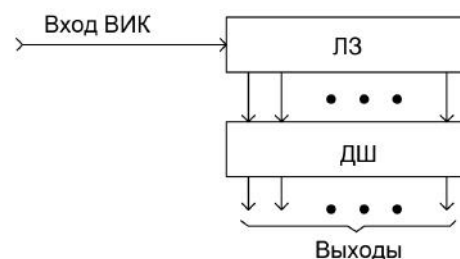


Рисунок 1. Декодирующее устройство ВИК

На рисунке 2 представлена схема устройства для приема ВИК (самосинхронизирующихся импульсных последовательностей) на основе использования адаптивной регулировки порога АК [2].

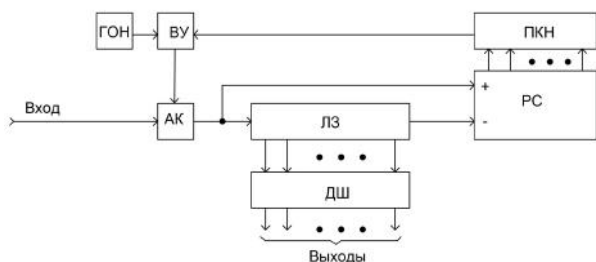


Рисунок 2. Декодирующее устройство ВИК с адаптивной регулировкой порога

В данной схеме предложено непрерывно определять среднюю частоту смеси импульсов полезного сигнала и импульсов помехи, поступающих на вход декодирующего устройства по способу измерения средней частоты импульсов [3]. Примеры устройств, реализующих данный способ, приведены в [4]. На основе использования значения средней частоты импульсов помехи можно регулировать пороговый уровень входного АК.

Устройство работает следующим образом. Входная импульсная последовательность ВИК, пройдя АК, поступает на суммирующий вход реверсивного счетчика (РС) и, пройдя через ЛЗ, поступает на вычитающий вход РС. Цифровой код, образующийся на выходе РС, прямо пропорционален средней частоте смеси импульсов полезного сигнала и помехи, поступающих на вход устройства. Вход преобразователя код-напряжение (ПКН) подключен к выходу РС, а выход ПКН подключен ко входу вычитающего устройства (ВУ), на второй вход которого поступает опорное напряжение от генератора опорного напряжения (ГОН). Порог АК регулируется ВУ, напряжение на выходе которого тем больше, чем больше средняя частота смеси импульсов полезного сигнала и помехи, т.е. пороговый уровень АК устанавливается самым высоким при минимальном значении средней частоты смеси полезных импульсов и импульсов помехи. При уменьшении средней частоты смеси импульсов помехи и импульсов полезного сигнала пороговый уровень АК понижается. Таким образом,

в данном устройстве осуществляется адаптивное регулирование порога АК в зависимости от интенсивности импульсных помех.

Вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ при декодировании ВИК определяется по формуле:

$$P_{\text{ош}} = P_{\text{под}} + P_{\text{воспр}}$$

где $P_{\text{под}}$ — вероятность подавления полезных импульсов;

$P_{\text{воспр}}$ — вероятность воспроизведения ложных импульсов.

Суммарная вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ имеет наименьшее значение при среднем уровне порога АК, когда вероятности $P_{\text{под}}$ и $P_{\text{воспр}}$ имеют минимальные значения.

Для более точной регулировки порога в [5] предложено определять не среднюю частоту смеси полезного сигнала и помехи, а непрерывно определять только среднюю частоту помехи и на основе ее значения регулировать порог АК.

На рисунке 3 представлена схема приемного устройства, учитывающего при регулировке порога АК только частоту импульсов помехи.

Для того чтобы при более точной автоматической регулировке порога АК учитывать только среднюю частоту импульсов помехи, все принимаемые кодовые комбинации, имеющие одинаковое число импульсов, после

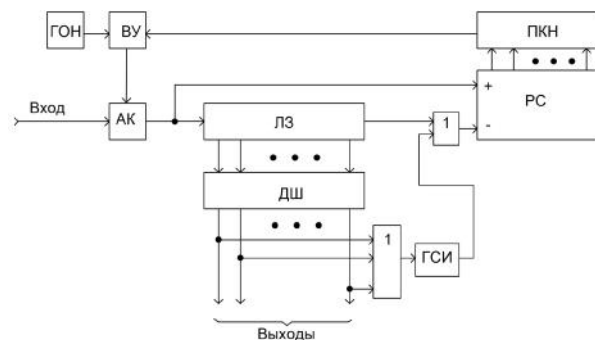


Рисунок 3. Декодирующее устройство ВИК с адаптивной регулировкой порога

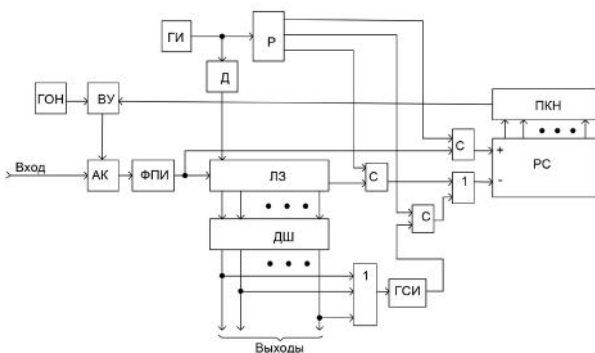


Рисунок 4. Декодирующее устройство ВИК с адаптивной регулировкой порога

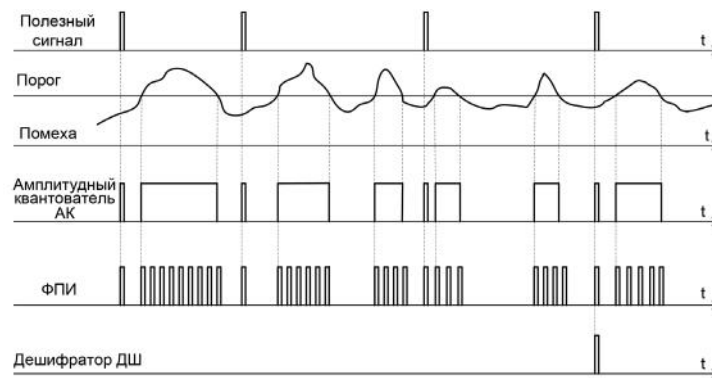


Рисунок 5. Временная диаграмма работы декодирующего устройства ВИК с адаптивной регулировкой порога

декодирования воспроизводятся генератором серии импульсов (ГСИ) с таким же числом импульсов, как в кодовой комбинации ВИК, и через элемент ИЛИ вычитаются на РС.

Импульсные помехи, поступающие на вход устройства и снижающие помехоустойчивость приема ВИК, могут иметь длительность, равную длительности полезных импульсов, или длительность, большую длительности полезных импульсов.

В [6] предложено для повышения помехоустойчивости приема в цепь после АК ввести формирователь пачек импульсов одинаковой длительности (ФПИ), равной длительности полезных импульсов. Причем этот формирователь вырабатывает импульсы одинаковой длительности и одинакового периода до тех пор, пока суммарный входной сигнал превышает пороговый уровень. Это разбивает сплошной входной сигнал, превышающий порог, на импульсные серии и позволяет учесть счетным методом реальную интенсивность импульсной помехи.

На рисунке 4 приведена схема декодирующего устройства с ФПИ, включенного между АК и ЛЗ. Временная диаграмма работы декодирующего устройства приведена на рисунке 5.

В [6] также предложено на обоих входах РС установить синхронизаторы, которые управляются распределенными по времени импульсными сериями, формируемые распределителем импульсов (Р). Это дает возможность устранять совпадение во времени импульсов на счетных входах реверсивного счетчика и более точно учитывать частоту помехи, что, в свою очередь, повышает помехоустойчивость приема ВИК. Для

формирования тактовой частоты сдвига дискретной ЛЗ используются генератор импульсов (ГИ) и делитель частоты (Д).

При использовании дискретных ЛЗ в описанных способах повышения помехоустойчивости приема ВИК, построенных на основе регистров сдвига, есть возможность обнуления ЛЗ. Если используется аналоговая ЛЗ с отводами, то для того, чтобы декодировать очередной ВИК, необходимо дождаться пока из ЛЗ выйдет предыдущий ВИК, т.е. между сообщениями должна быть защитная пауза, равная базовому времени ВИК. При использовании в качестве дискретной ЛЗ сдвигового регистра после декодирования каждой комбинации ВИК дискретную ЛЗ можно обнулить и без паузы начинать прием следующего ВИК. Таким образом, можно в два раза увеличить скорость декодирования ВИК без снижения помехоустойчивости приема.

Для реализации предложенных устройств удобно использовать программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), т.к. на них можно создавать регистры сдвига с большим числом разрядов, необходимых для построения высокоточных дискретных ЛЗ с возможностью их обнуления.

Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Достоинством описанных устройств приема ВИК является то, что дискретная ЛЗ одновременно используется как для приема и декодирования сигналов ВИК, так и для оценки интенсивности импульсных помех. Величина интенсивности импульсных помех

используется для адаптивной регулировки порога амплитудного квантователя.

2. Автоматическая регулировка порогового уровня амплитудного квантователя существенно повышает помехоустойчивость приема ВИК, т.к. в такой схеме минимизируется вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$.

3. В настоящее время в связи с возможностью использования дискретных ЛЗ на регистрах сдвига большой длины на базе ПЛИС существенно упрощается реализация предложенных устройств для приема ВИК (самосинхронизирующихся импульсных последовательностей).

Список литературы

1. Глобус И.А. Двоичное кодирование в асинхронных системах. М.: Связь, 1972. 108 с.
2. Авторское свидетельство 726670 СССР, МПК Н 04 L 7/04, Н 04 В 1/10. Устройство для приема самосинхронизирующихся импульсных последовательностей / Р.И. Юргенсон, Ю.Г. Вихорев, С.Л. Сироткин (СССР). 2625278; заявл. 05.06.1978, опубл. 05.04.1980. БИ № 13.
3. Авторское свидетельство 161417 СССР, МПК Н 03 К 13/20. Способ измерения частоты / С.С. Бруфман (СССР). 832865; опубл. 01.01.1964. БИ № 7.
4. Сироткин С.Л., Коньков А.Н. Методы непрерывной обработки информации от частотных датчиков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. № 3. С. 90-97.
5. Авторское свидетельство 907837 СССР, МПК Н 04 L 7/04, Н 04 В 1/10. Устройство для приема самосинхронизирующихся импульсных последовательностей / Р.И. Юргенсон, Ю.Г. Вихорев, Э.И. Козлов, В.А. Орленко, С.Л. Сироткин (СССР). 2916469; заявл. 22.04.1980, опубл. 23.02.1982. БИ № 7.
6. Авторское свидетельство 1088148 СССР, МПК Н 04 L 7/04, Н 04 В 1/10. Устройство для приема самосинхронизирующихся импульсных последовательностей / С.Л. Сироткин (СССР). 3557892; заявл. 28.02.1983, опубл. 23.04.1984. БИ № 15.
7. Авторское свидетельство 1160581 СССР, МПК Н 04 L 7/04. Устройство для приема самосинхронизирующихся импульсных последовательностей / С.Л. Сироткин (СССР). 1985. БИ № 21.

References

1. Globus I.A. Dvoichnoe kodirovanie v asinhronnyh sistemah. M.: Svjaz', 1972. 108 s.
2. Avtorskoe svidetel'stvo 726670 SSSR, MPK H04L 7/04, H04B 1/10. Ustrojstva dlja priema samosinhronizirujushhihsja impul'snyh posledovatel'nostej / R.I. Jurgenson, Ju.G. Vihorev, S.L. Sirotkin (SSSR). 2625278; zajavl. 05.06.1978, opubl. 05.04.1980. BI № 13.
3. Avtorskoe svidetel'stvo 161417 SSSR, MPK H 03 K 13/20. Sposob izmerenija chastoty / S.S. Brufman (SSSR). 832865; opubl. 01.01.1964. BI № 7.
4. Sirotkin S.L., Kon'kov A.N. Metody nepreryvnoj obrabotki informacii ot chastotnyh datchikov // Jelektrotehnicheckie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2014. № 3. S. 90-97.
5. Avtorskoe svidetel'stvo 907837 SSSR, MPK H 04 L 7/04, H 04 B 1/10. Ustrojstvo dlja priema samosinhronizirujushhihsja impul'snyh posledovatel'nostej / R.I. Jurgenson, Ju.G. Vihorev, Je.I. Kozlov, V.A. Orlenko, S.L. Sirotkin (SSSR). 2916469; zajavl. 22.04.1980, opubl. 23.02.1982. BI № 7.
6. Avtorskoe svidetel'stvo 1088148 SSSR, MPK H 04 L 7/04, H 04 B 1/10. Ustrojstvo dlja priema samosinhronizirujushhihsja impul'snyh posledovatel'nostej / S.L. Sirotkin (SSSR). 3557892; zajavl. 28.02.1983, opubl. 23.04.1984. BI № 15.
7. Avtorskoe svidetel'stvo 1160581 SSSR, MPK H 04 L 7/04. Ustrojstvo dlja priema samosinhronizirujushhihsja impul'snyh posledovatel'nostej / C.L. Sirotkin (SSSR). 1985. BI № 21.



Мухамадиев А. А.
Mukhamadiev A. A.

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



Фаррахов Р. Г.
Farrakhov R. G.

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

УДК 621.38:669

СКАНИРУЮЩИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

В ряде случаев метрологические характеристики опτικο-электронных преобразователей температуры обусловлены тем, что коэффициент излучения объектов либо неизвестен, либо изменяется по неизвестному закону в сверхмалый промежуток времени, а также влиянием атмосферы. Одним из возможных путей их улучшения является обеспечение сканирования спектра излучения объекта контроля.

Разработана структурная схема сканирующего опτικο-электронного преобразователя температуры. Акустооптический монохроматор с электронным управлением предназначен для выделения из широкого спектрального диапазона электромагнитного излучения узкой линии, длина волны и интенсивность которой изменяются в соответствии с электронным управляющим сигналом. Описан принцип действия работы монохроматора. Основным устройством является драйвер, который управляет работой монохроматора. Драйвер представляет собой металлический корпус, в котором располагаются синтезатор частоты прямого синтеза с микропроцессорным управлением и усилитель мощности. Драйвер имеет четыре разъема для соединения с внешними устройствами: ВЧ разъем типа SMA для соединения с оптическим блоком, разъем USB-2 для соединения с ПК, разъем питания, разъем для подключения к внешнему генератору видеоимпульсов модуляции мощности. Представлена фотография конструкции драйвера.

Сканирование осуществляется изменением частоты управляющего электрического сигнала. Описаны различные режимы его осуществления и регулируемые параметры.

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены перестроечные зависимости акустооптического монохроматора с электронным управлением с относительной погрешностью вычисления, не превышающей 0,3 % (при сравнении с экспериментальными результатами, полученными для длин волн 1152,3 и 1542 нм).

Таким образом, использование акустооптического монохроматора с электронным управлением позволяет реализовать сканирование теплового спектра излучения контролируемого объекта посредством выделения из широкого спектрального диапазона электромагнитного излучения узкой линии, длина волны и интенсивность которой изменяются в соответствии с электронным управляющим сигналом, тем самым улучшив метрологические характеристики разработанного устройства.

Ключевые слова: измерение температуры, акустооптический преобразователь температуры, акустооптический перестраиваемый фильтр, алгоритм, эффективная длина волны, оптический блок.

SCANNING TEMPERATURE OPTICAL-TO-ELECTRICAL CONVERTER

In some cases metrological characteristics of optical-to-electrical converters of temperature are caused by the fact that the coefficient of radiation of objects either is unknown, or changes under the unknown law in a midget period, and also influence of the atmosphere. One of possible ways of their improving is support of scanning of a range of radiation of a subject of monitoring.

The skeleton diagram of the scanning temperature optical-to-electrical converter is developed. The acousto-optic monochromator with electronic control is intended for separation from the broad spectral range of an electromagnetic radiation of the narrow line which wavelength and intensity change according to the electronic managing director of a signal. The principle of action of operation of the monochromator is described. The main device is the driver which controls operation of the monochromator. The driver represents the metal casing in which settle down a frequency synthesizer of direct synthesis with microprocessor control and the power amplifier. The driver has four connectors for connection with external devices: HF the SMA connector for connection with the optical unit, the USB-2 connector for connection with the PC, power connector, the connector for connection to the external generator of video pulses of modulation of power. The photo of construction of the driver is provided.

Scanning is carried out by frequency change of the controlling electrical signal. Different modes of its implementation and adjustable parameters are described.

As a result of the conducted pilot researches dependences of the acousto-optic monochromator with electronic control were received with the relative error of computation which isn't exceeding 0,3 % (when comparing with the experimental results received for lengths of waves of 1152,3 and 1542 nanometers).

Thus, use of the acousto-optic monochromator with electronic control allows to realize scanning of a thermal range of radiation of a controlled object, by means of separation from the broad spectral range of an electromagnetic radiation of the narrow line which wavelength and intensity change according to the electronic managing director of a signal, thereby having improved metrological characteristics of the developed device.

Key words: temperature measurement, acousto-optic temperature transducer, acoustooptic tunable filter, algorithm, effective wavelength, optical unit.

Дистанционное измерение температуры получило распространение во многих отраслях народного хозяйства ввиду невозможности в ряде случаев проведения измерения контактными способами. Основными требованиями к измерительным устройствам являются: высокая точность и чувствительность, широкий диапазон измерения. Однако существующие на сегодняшний день устройства не в полной мере обеспечивают необходимое качество измерения. Невысокие метрологические характеристики обусловлены тем, что коэффициент излучения объектов либо неизвестен, либо изменяется по неизвестному закону в сверхмалый промежуток времени, а также влиянием атмосферы. Одним из возможных путей повышения качества является обеспечение сканирования спектра излучения объекта контроля. Работа направлена на разработку сканирующего оптико-электрон-

ного преобразователя температуры, обладающего улучшенными метрологическими характеристиками.

На рисунке 1 изображена структурная схема сканирующего оптико-электронного преобразователя температуры, состоящая из оптического блока 1, в котором находятся последовательно соединенные стеклянное окно, прозрачное в инфракрасном диапазоне 2, и линза 3, фокусирующая световой поток на входной торец волоконного световода 4, выходной торец которого соединен с акусто-оптическим монохроматором 5, выход которого соединен со входом измерительного блока 6, а выход управления измерительного блока связан с управляющим входом монохроматора [1–11].

Акустооптический монохроматор с электронным управлением (АМЭУ) предназначен для выделения из широкого спектраль-

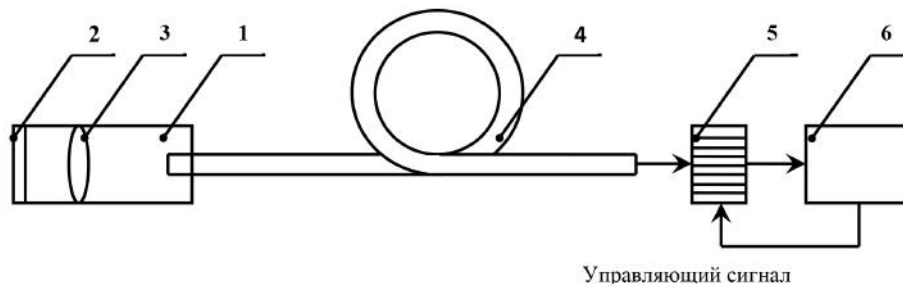


Рисунок 1. Структурная схема сканирующего опико-электронного преобразователя температуры

ного диапазона электромагнитного излучения узкой линии, длина волны и интенсивность которой изменяются в соответствии с электронным управляющим сигналом. Одним из важнейших составляющих АМЭУ является драйвер, обеспечивающий электронное управление.

Драйвер АМЭУ (рисунок 2) представляет собой металлический корпус, в котором располагаются синтезатор частоты прямого синтеза (рабочий частотный диапазон 40–80 МГц) с микропроцессорным управлением и усилитель мощности. В конструкции драйвера предусмотрено четыре разъема для соединения с внешними устройствами: ВЧ разъем типа SMA для соединения с оптическим блоком; разъем USB-2 для соединения с ПК; разъем питания (+ 5 В), к которому присоединяется прилагающийся малогабаритный источник питания, подключаемый непосредственно к сети переменного тока 50 Гц, 220 В; разъем для подключения к внешнему генератору видеоимпульсов модуляции мощности для обеспечения импульсного режима работы. Напряжение видеоимпульсов + (3,0–4,0) В. В случае непрерывного режима работы следует подать на вход постоянный потенциал + (3,0–4,0) В. Другой способ обеспечения непрерывного режима работы — режим внешней модуляции с обратной полярностью.



Рисунок 2. Драйвер АМЭУ

Принцип действия АМЭУ основан на акустооптическом эффекте. Переменное электрическое поле (управляющий сигнал), приложенное к пьезопреобразователю, возбуждает акустическую волну, которая распространяется в призме из TeO_2 , вызывая периодические возмущения показателя преломления, т.е. создавая в среде фазовую дифракционную решетку. На этой решетке происходит дифракция света, распространяющегося в кристалле под определенным углом и имеющего определенное состояние поляризации, формируемое входным поляризатором. В результате дифракции поляризация световой волны меняется на ортогональную, так что на выходе кристалла продифрагировавший и непродифрагировавший пучки расходятся на угол не менее $6,4^\circ$ (величина угла зависит от длины волны фильтруемого излучения), при этом продифрагировавший пучок распространяется по траектории падающего, а непродифрагировавший отклоняется в сторону.

Конструкция АМЭУ такова, что падающий плоскополяризованный световой пучок ортогонален входной грани кристалла TeO_2 , а плоскость его поляризации ортогональна основанию корпуса оптического блока АМЭУ, именно для такой геометрии обеспечивается режим большой угловой апертуры. Плоскости поляризации входного и выходного поляризаторов установлены ортогонально. Следовательно, выходной поляризатор пропускает продифрагировавший пучок и блокирует непродифрагировавший. Драйвер имеет возможность перестройки на произвольный шаг в рабочем частотном диапазоне.

Перестройка длины волны пропускания АОФ осуществляется изменением частоты управляющего электрического сигнала. Связь длины волны и частоты дается приближенным выражением

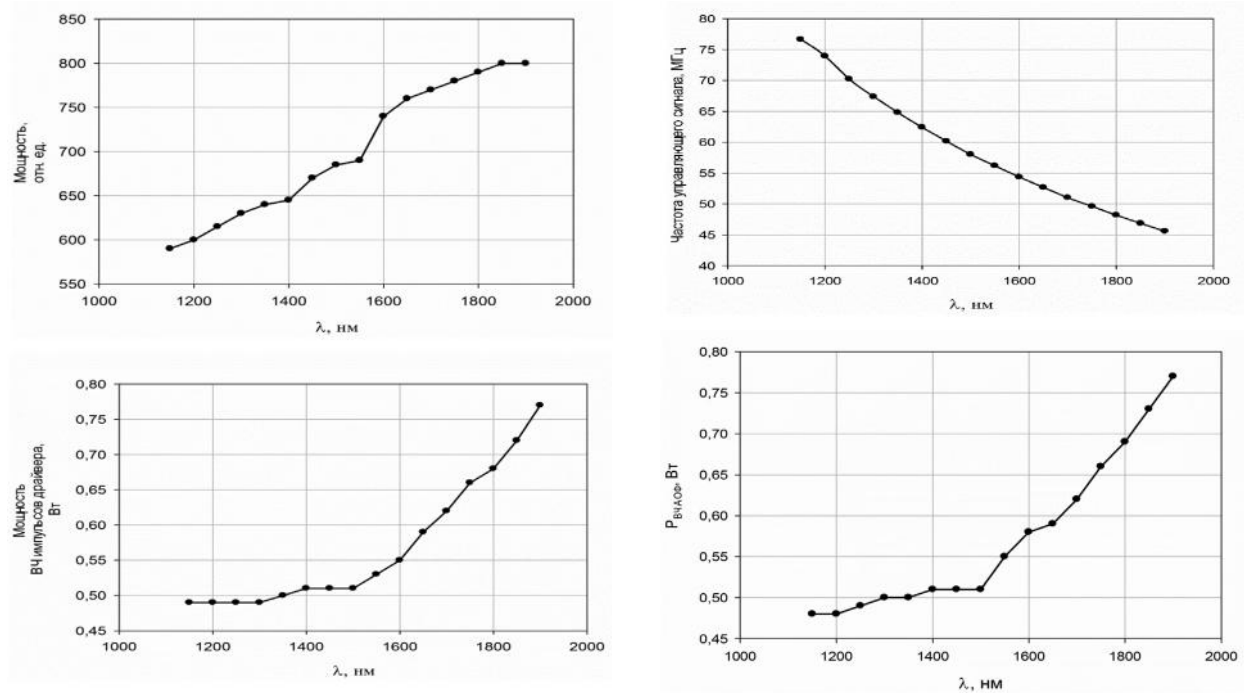


Рисунок 3. Перестроечные зависимости акустооптического монохроматора с электронным управлением

$$f = K_1 \times \Delta n / \lambda, \quad (1)$$

где $K_1 = 6,17286 \times 10^5$ МГц×нм;

$\Delta n = (n_e - n_o)$, n_e , n_o — показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, соответственно, для кристаллического TeO_2 [1].

Модуляция интенсивности отфильтрованного излучения осуществляется модуляцией электрической мощности управляющего сигнала. Режим модуляции выбирается с помощью программного обеспечения. Для любого режима модуляции существует возможность подавления выбросов на переднем и заднем фронтах выходного ВЧ-импульса. При этом длительность фронтов увеличивается приблизительно на 20 %. В режиме внутренней модуляции работает встроенный в драйвер генератор прямоугольных модулирующих импульсов. В этом режиме длительность ВЧ импульса t равна половине периода следования ВЧ импульсов T . Частота следования модулирующих импульсов определяется значениями масштабного множителя и внутреннего таймера, а ее значение выводится на экран монитора в Гц. Максимальная частота внутренней модуляции — 1,5 кГц. В режиме внешней модуляции работает внешний генератор прямоугольных модулирующих импульсов, который соединяется с драйвером через разъем SMC кабелем. Амплитуда модулирующих

импульсов составляет + (3,0–4,0) В. В режиме прямой полярности драйвер выдает на выходе ВЧ мощность в течение модулирующего импульса, и мощность равна нулю при отсутствии модулирующего импульса. Минимальная длительность импульса модуляции 100 мкс, минимальная длительность паузы 200 мкс, максимальная частота следования — 3 кГц. Для обеспечения непрерывной генерации ВЧ мощности следует подать на соответствующий разъем постоянный потенциал + (3,0–4,0) В. В режиме обратной полярности драйвер выдает на выходе ВЧ мощность при отсутствии модулирующих импульсов, и мощность равна нулю при наличии модулирующих импульсов. Минимальная длительность импульса модуляции 200 мкс, минимальная длительность паузы 100 мкс, максимальная частота следования — 3 кГц. Для обеспечения непрерывной генерации ВЧ мощности следует не подавать на разъем модулирующих импульсов. Значение начальной частоты (Гц) выбирается из рабочего диапазона частот: 40–80 МГц. Значение шага частоты устанавливается с возможностью минимального значения шага частоты: 1 Гц. Количество рабочих частотных точек устанавливается из диапазона 0–65536. Количество циклов устанавливается в диапазоне значений 0–255.

Параметр мощности (в относительных единицах), пропорциональный значению выходной ВЧ мощности, устанавливается из диапазона 0–1023.

В режиме линейной развертки частоты время экспозиции частотной точки совпадает с длительностью выходного ВЧ импульса драйвера, то есть переключение частоты происходит в паузах между выходными ВЧ импульсами драйвера.

В программе предусмотрен режим линейной развертки параметра мощности. Устанавливается значение параметра начального уровня мощности (параметр равен коду напряжения смещения в схеме усилителя мощности, от которого зависит уровень выходной мощности драйвера) и значение шага кода напряжения смещения с выбором знака. Первый модулирующий импульс обеспечит выходной импульс ВЧ мощности драйвера АМЭУ с параметром мощности, равным установленному значению. Второй модулирующий импульс обеспечит выходной импульс драйвера с мощностью, соответствующей увеличенному на один шаг коду напряжению смещения и т.д. После того как заданное в меню число шагов будет пройдено, программа возвращается к начальному значению частоты, и цикл повторяется. Таким образом, линейная (по коду напряжению смещения) развертка параметра мощности осуществляется синхронно с линейной разверткой частоты в паузах между выходными импульсами драйвера. Такое двойное сканирование позволяет создать требуемый профиль распределения выходной мощности драйвера в рабочем частотном диапазоне для улучшения равномерности коэффициента передачи.

Список литературы

1. Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. Принципы построения оптических преобразователей температуры // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2009. № 2 (6). С. 21–26.
2. Фаррахов Р.Г., Ураксеев М.А., Мухамадиев А.А. Оптико-электронные преобразователи температуры для систем контроля технологическими процессами: науч.

Дополнительной юстировкой положения фланцев входного и выходного объективов оптического блока (предварительно ослабив винты крепления фланцев к корпусу оптического блока) можно добиться максимальной интенсивности продифрагировавшего излучения.

Монохроматор имеет те же параметры при реверсивном подключении — в этом случае входной и выходной световоды подключаются к разноименным оптическим разъемам.

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены перестроечные зависимости акустооптического монохроматора с электронным управлением с относительной погрешностью вычисления не превышающей 0,3 % (при сравнении с экспериментальными результатами, полученными для длин волн 1152,3 и 1542 нм).

На рисунке 3 представлены перестроечные зависимости АМЭУ и рекомендованные значения смещения при проходе рабочего спектрального диапазона МЭУ с шагом 50 нм.

Выводы

Таким образом, использование акустооптического монохроматора с электронным управлением позволяет реализовать сканирование теплового спектра излучения контролируемого объекта посредством выделения из широкого спектрального диапазона электромагнитного излучения узкой линии, длина волны и интенсивность которой изменяются в соответствии с электронным управляющим сигналом, тем самым улучшив метрологические характеристики разработанного устройства.

издание. Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2010. 105 с.

3. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г., Ураксеев М.А. Акустооптические приборы информационно-измерительных систем экологического мониторинга: науч. издание. Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2009. 119 с.

4. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г. Математическая модель акустооптического

пирометра // Датчики и системы. 2012. № 2. С. 28–30.

5. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г. Статическая характеристика, чувствительность и разрешающая способность акустооптического пирометра // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 41–43.

6. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г. Акустооптический преобразователь температуры // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 1. С. 26–28.

7. Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. Универсальный пирометр для измерения высоких температур // Датчики и системы. 2010. № 11. С. 23–25.

8. Фаррахов Р.Г. Математическая модель оптического преобразователя температуры с волоконным световодом // Приборы. 2010. № 4. С. 11–14.

9. Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А., Фаррахов Р.Г., Ильясов И.Р. Основные этапы становления и развития акустооптики в XX веке // История науки и техники. 2010. № 3 (спец. выпуск № 1). С. 34–37.

10. Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. Оптический преобразователь температуры для систем контроля и управления // Датчики и системы. 2010. № 10. С. 39–41.

11. Пат. 2399892 Российская Федерация, МПК 8 G 01 J 15/10. Оптический преобразователь температуры / Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. (РФ). 2009122755/28, заявл. 15.06.2009; опубл. 20.09.10.

References

1. Farrahov R.G., Muhamadiev A.A. Principy postroenija opticheskikh preobrazovatelej temperatury // Prikaspijskij zhurnal: Upravlenie i vysokie tehnologii. 2009. № 2 (6). S. 21–26.

2. Farrahov R.G., Urakseev M.A., Muhamadiev A.A. Optiko-jelektronnye preobrazovateli temperatury dlja sistem kontrolja tehnologicheskimi processami:

Nauchnoe izdanie. Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa. 2010. 105 s.

3. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G., Urakseev M.A. Akustoopticheskie pribory informacionno-izmeritel'nyh sistem jekologicheskogo monitoringa: Nauchnoe izdanie. Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2009. 119 s.

4. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G. Matematicheskaja model' akustoopticheskogo pirometra // Datchiki i sistemy. 2012. № 2. S. 28–30.

5. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G. Statischeeskaja harakteristika, chuvstvitel'nost' i razreshajushhaja sposobnost' akustoopticheskogo pirometra // Datchiki i sistemy. 2011. № 11. S. 41–43.

6. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G. Akustoopticheskij preobrazovatel' temperatury // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2011. № 1. S. 26–28.

7. Farrahov R.G., Muhamadiev A.A. Universal'nyj pirometr dlja izmerenija vysokih temperature // Datchiki i sistemy. 2010. № 11. S. 23–25.

8. Farrahov R.G. Matematicheskaja model' opticheskogo preobrazovatelja temperatury s volokonnym svetovodom // Pribory. 2010. № 4. S. 11–14.

9. Muhamadiev A.A., Urakseev M.A., Farrahov R.G., Il'jasov I. R. Osnovnye jetapy stanovlenija i razvitija akustooptiki v XX veke // Istorija nauki i tehnik. 2010. № 3 (spec. vypusk № 1). S. 34–37.

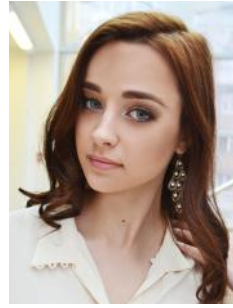
10. Farrahov R.G., Muhamadiev A.A. Opticheskij preobrazovatel' temperatury dlja sistem kontrolja i upravlenija // Datchiki i sistemy. 2010. № 10. S. 39–41.

11. Pat. 2399892 Rossijskaja Federacija, MPK 8 G 01 J 15/10. Opticheskij preobrazovatel' temperatury / Farrahov R.G., Muhamadiev A.A. (RF). — 2009122755/28, zajavl. 15.06.2009; opubl. 20.09.10.



Федосов А. В.
Fedosov A. V.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Мизгирева В. В.
Misgireva V. V.

студент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Щербакова Э. Д.
Shcherbakova E. D.

студент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Янтирякова А. Р.
Yantiryakova A. R.

магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 620.179.16.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с экспертизой промышленной безопасности. Экспертизу промышленной безопасности проводят в связи с тем, что работа на поврежденном оборудовании ведет к различного рода авариям, которые могут возникнуть из-за ненадлежащего контроля. Она необходима для опасных производственных объектов, зданий и сооружений, устройств, эксплуатируемых на опасных предприятиях, к которым относятся химические, нефтехимические, нефтеперерабатывающие предприятия, предприятия газовой отрасли.

Одним из этапов экспертизы промышленной безопасности является проведение технического диагностирования методом неразрушающего или разрушающего контроля.

На сегодняшний день наиболее актуален метод неразрушающего контроля, так как он сохраняет целостность оборудования, в том числе его пригодность к использованию. Одним из широко распространенных методов контроля является акустический, обладающий рядом преимуществ среди других методов контроля. Эти методы позволяют извлечь достаточное количество данных о состоянии материалов и конструкций. В соответствии с имеющимися сведениями больше половины современных средств неразрушающего контроля являются акустическими. Его работа основана на звуковых и ультразвуковых колебаниях. Диапазон частот составляет приблизительно от 0,5 кГц до 30 МГц. Акустический метод основывается на использовании волн и колебаний и регистрации их параметров. С помощью этого метода можно определить дефекты различных размеров и практически на любой поверхности. Ультразвуковые волны посылаются сквозь материал. Пройдя заданное расстояние, волна отражается от границ либо трещин. Она регистрируется на преобразователе. Наиболее распространёнными средствами измерения являются «DIO-562» ультразвуковой дефектоскоп общего назначения, «A1212» ультразвуковой дефектоскоп широкого применения, «A1220 МОНОЛИТ» ультразвуковой низкочастотный дефектоскоп, «Авгур 4.2» компьютерная голографическая система ультразвукового контроля.

Ключевые слова: экспертиза промышленной безопасности, опасный производственный объект, неразрушающий контроль, методы неразрушающего контроля, виды неразрушающего контроля, акустический метод, средства измерения, дефектоскоп, пьезоэлектротребователь, контроль качества металла.

FEATURES OF APPLICATION OF ULTRASONIC TESTING FOR EXAMINATION OF INDUSTRIAL SAFETY OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES

This article discusses issues related to industrial safety expertise. Industrial safety expertise prodrive due to the fact that the work on the damaged equipment leads to time-personal nature of accidents that may occur due to improper control. It is necessary for hazardous industrial facilities, buildings and structures, devices operating at hazardous enterprises, to include chemical, petrochemical, refineries, gas industry.

One of the stages of the industrial safety examination is technical diagnostics and nondestructive destructive testing.

To date, the most relevant non-destructive method of control, as it preserves the integrity of the equipment, including its at-suitability for use. One of the most common methods of control is acoustic, which has several advantages over other methods of control. These methods allow to obtain a lot of information about the status of materials and structures. According to available data, more than half of modern means of non-destructive testing are acoustic. Thiss work is based on sound and ultrasonic vibrations. The frequency range is from about 0.5 kHz to 30 MHz. Method is based on acoustic waves and vibrations using registration and their parameters. With this method it is possible to determine defects of different size and practically any surface. Ultrasonic waves are sent through the material. Having a predetermined distance, the wave is reflected from the boundaries of any cracks. It is registered on the transmitter. The most common means of measuring «DIO-562» ultrasonic flaw general purpose, «A1212» ultrasonic flaw wide application, «Augur 4.2» holographic computer system of ultrasonic testing.

Key words: industrial safety expertise, hazardous production facility, non-destructive testing, non-destructive testing methods, types of non-destructive control, acoustic method, measuring instruments, defectoscope, piezoelektrischen, quality control of metal.

Экспертиза промышленной безопасности — обязательная процедура, которая проводится в соответствии с ФЗ-116 «О промышленной безопасности опасного производственного объекта» от 21.07.97 г. и федеральными нормами и правилами промышленной безопасности только на предприятиях, которые относятся к опасным производственным объектам не зависимо от класса опасности. На данных опасных производственных объектах экспертизе промышленной безопасности подлежат: технические устройства, здания и сооружения, проектная документация, декларация промышленной безопасности, обоснование безопасности.

Законодательно определено, в каких случаях и при каких обстоятельствах возникает необходимость проведения экспертизы про-

мышленной безопасности: авария, выявление дефекта, завершение нормативного срока безопасной эксплуатации, решение инспектора Ростехнадзора, проведение технического перевооружения объекта и другие, согласно нормативным актам в сфере промышленной безопасности

Экспертиза осуществляется для того, чтобы определить, отвечает ли объект экспертизы предъявляемым к нему требованиям промышленной безопасности и опирается ли на принципы самостоятельности, беспристрастности, универсальности и всесторонности исследований, осуществляемых с помощью новых вкладов науки и техники [1].

Экспертиза промышленной безопасности в случае необходимости осмотра оборудования и зданий проводится с выездом на место нахождения объекта. В процессе выезда на

объект эксперты проводят наблюдение за процессом работы объекта экспертизы; техническое диагностирование методом неразрушающего или разрушающего контроля.

Неразрушающий контроль — сфера науки и техники, включающая в себя анализ физических принципов, создание, модернизацию и использование способов, приспособлений и методик технического контроля объектов, не разрушающего и не усугубляющего их применимость к эксплуатации [2].

Методы неразрушающего контроля основаны на контроле, регистрации и оценке итогов взаимосвязи физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, при этом направленность этой взаимосвязи обуславливается химическим соединением, видом, положением конфигурации контролируемого объекта и т.п.

Все методы неразрушающего контроля предстают как неявные методы. Настройка, калибрование должны проводиться по контрольным образцам, перенимающим определяемый физический показатель.

Каждый отдельный метод контроля подходит для ограниченного круга задач и не может выявить все виды дефектов.

Предпочтение оптимизированного метода неразрушающего контроля нужно реализовывать в зависимости от его:

- объективных свойств;
- физических оснований;
- сферы использования;
- чувствительности;
- допускающей способности;
- технических требований выбраковки;
- технических параметров оборудования.

Существенным параметром каждого метода неразрушающего контроля является чувствительность.

Чувствительность — обнаружение минимального по величине повреждения; зависит от особенностей метода неразрушающего контроля, условий проведения контроля, материала изделий. Допустимая чувствительность для обнаружения одних повреждений может быть совсем неприменимой для обнаружения повреждений другого характера.

Чувствительность методов неразрушающего контроля к обнаружению одного и того

же по виду повреждения различна. При нахождении предельных отклонений подобранного метода неразрушающего контроля необходимо непременно принимать во внимание дополнительные отклонения:

- минимального радиуса кривизны вогнутой и выпуклой поверхностей;
- шероховатости контролируемой поверхности;
- структуры материала;
- геометрических размеров зоны контроля;
- других влияющих факторов, указанных в инструкциях для конкретных приборов.

По физическому действию методы неразрушающего контроля делятся на [3]:

- акустический;
- магнитный;
- вихретоковый;
- проникающими веществами;
- радиоволновый;
- радиационный;
- оптический;
- тепловой;
- электрический;
- виброакустический.

Наиболее широкое распространение получили первые четыре метода.

Акустический метод неразрушающего контроля основан на регистрации величин пружинистых изменений, вызванных и (или) обнаруживаемых в контролируемом объекте (под объектом контроля подразумеваются материалы, полуфабрикаты и готовые изделия).

При акустическом методе неразрушающего контроля зачастую задействуют звуковые и ультразвуковые частоты, т.е. применяют в диапазоне частот от 0,5 кГц до 30 МГц. Например, когда при контроле прибегают к частотам больше 20 кГц, употребляют термин «ультразвуковой» вместо «акустический».

Изначально неразрушительный ультразвуковой контроль начали применять в 1930 году. Спустя 20 лет он стал особенно популярным по сравнению с другими методами контроля, и, следует отметить, что для диагностики определенных изделий он стал обязательным.

Суть данного способа состоит в принятии отраженного от изделия ультразвукового колебания с помощью специально предна-

значенного технического оснащения, дальнейшем исследовании полученной информации с целью установления существующих повреждений, а также их эквивалентных размеров, форм (объемной/плоскостной), вида (точечного/протяженного), глубины залегания и прочего.

Величину обнаруженного повреждения определяют посредством ультразвуковых дефектоскопов. По времени прохождения ультразвука в изделии определяют расстояние до повреждения, а по амплитуде отраженного импульса — его относительный размер.

В зависимости от определенных требований осуществления ультразвукового контроля имеется ряд методов.

На сегодняшний день существует пять основных методов УЗК [4]:

- теневой — метод контроля, при котором исследуются ультразвуковые сигналы, проникающие через объект.
- зеркально-теневой — используется для контроля деталей с двумя параллельными сторонами. Признаком дефекта будет считаться пропадание отраженных колебаний. Основным плюсом этого метода в отличие от теневого является доступ к детали только с одной стороны;
- зеркальный — метод контроля, когда применяются два преобразователя с одной стороны детали;
- дельта-метод — способ контроля, при котором анализируют расстояние между двумя сигналами от краев и граней объекта, с учетом угла наклонного преобразователя, находят условный размер несплошности;
- эхо-метод — метод контроля, при котором оценивают эхо-сигналы от дефекта.

На практике ультразвуковой контроль металла на выявление дефектов проводят в диапазоне частот 0,5-10 МГц. В некоторых случаях, когда необходимо выявить очень маленькие дефекты, проводят неразрушающий контроль с частотой волн до 20 МГц. Для контроля объектов большой толщины или крупнозернистых металлов с плохой проводимостью ультразвука используют низкие частоты.

К достоинствам ультразвукового контроля относятся:

- высокая мобильность вследствие применения портативных ультразвуковых дефектоскопов;
- скорость исследования и высокая точность, а также низкая стоимость;
- возможность проведения ультразвукового контроля на рабочем объекте, т.е. во время проведения контроля не требуется выведение детали/объекта из эксплуатации;
- безопасность для человека;
- при проведении УЗК исследуемый объект не повреждается.

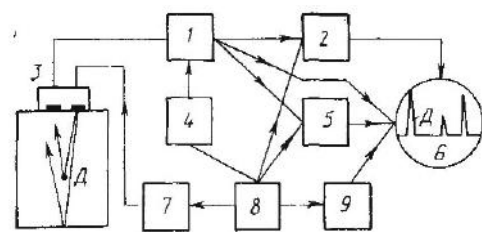
Наибольшее распространение ультразвуковой контроль получил в химической, нефтегазовой, машиностроительной отрасли, при определении износа металла магистральных трубопроводов и др.

Ультразвуковой дефектоскоп — это прибор, который используется для обнаружения внутренних дефектов и неоднородностей.

Принцип работы ультразвукового дефектоскопа основан на использовании ультразвуковых колебаний, которые отражаются от неоднородностей изделий, позволяя тем самым определить их глубину, координаты и размеры.

Блок-схема ультразвукового дефектоскопа представлена рисунке 1 [5].

Работа импульсного дефектоскопа заключается в следующем: электрические колебания от генератора возбуждают ультразвуковые в преобразователе, отраженный от несплошности сигнал улавливается преобразователем, который модифицирует его в электрический импульс, далее он усиливается



1 — усилитель; 2 — автоматический сигнализатор дефектов; 3 — преобразователь; 4 — система регулировки чувствительности; 5 — измерительное устройство; 6 — электронно-лучевой индикатор; 7 — генератор импульсов; 8 — синхронизатор (обеспечивает последовательность работы узлов дефектоскопа); 9 — генератор развертки электронно-лучевого индикатора

Рисунок 1. Блок-схема импульсного дефектоскопа

ется до требуемой величины и поступает на вход автоматического сигнализатора дефектов, измерительное устройство обрабатывает сигнал и выводит информацию на табло.

Наиболее распространенные типы дефектоскопов, применяемые при неразрушающем контроле [6]:

- «DIO-562» *ультразвуковой дефектоскоп общего назначения* — приборы этой серии предназначены для выявления и определения координат и параметров нарушений сплошности и неоднородностей в изделиях из металлов и пластиков. Дефектоскоп работает с любыми преобразователями в диапазоне частот от 0,5 до 20,0 МГц;

- «A1212» *ультразвуковой дефектоскоп широкого применения* предназначен для выявления и определения координат различных нарушений материала в изделиях. «A1212» применяется для работы со сварными соединениями, им можно измерять толщины стенок изделий, выявлять очаги коррозии, трещин и других дефектов. «A1212» применяется во многих отраслях промышленности. Прибор рассчитан на стандартные методики контроля, работает с преобразователями частот от 1 до 10 МГц;

- «Авгур 4.2» *компьютерная голографическая система ультразвукового контроля* позволяет определить действительные размеры и тип дефекта на основе концепции комплексной диагностики. Задача концепции — определить степень опасности выявленных дефектов, определить остаточный ресурс объекта. На основании полученных данных можно выявить безопасное время эксплуатации изделия, проводить периодический мониторинг состояния оборудования и

снизить издержки производства за счет несвоевременного простоя оборудования.

Дефектоскопы применяются и в лабораторных, и в полевых условиях. Технология отлично себя зарекомендовала при диагностике котлов и прочих установок, работающих под действием высоких температур, давления и агрессивных сред. Проверка возможна даже в отношении изделий со сложной геометрией.

К недостаткам ультразвукового контроля относят, прежде всего, ограниченность информации о дефекте сварного соединения. Кроме того, при исследовании металлов, имеющих крупнозернистую структуру, возникают сложности, обусловленные сильным рассеянием и затуханием волн. Наконец, для выполнения диагностики нужно позаботиться о предварительной подготовке шва.

Выводы

Ультразвуковой контроль по сравнению с другими методами является высокоэффективным средством для выявления возможных дефектов. Он требует наличия специально подготовленных специалистов, оборудования и вспомогательных средств контроля, также предъявляет особые требования к подготовке поверхности изделия.

Таким образом, при экспертизе промышленной безопасности опасных производственных объектов наиболее эффективными являются средства измерения «DIO-562» ультразвуковой дефектоскоп общего назначения, «A1212» ультразвуковой дефектоскоп широкого применения, «Авгур 4.2» компьютерная голографическая система ультразвукового контроля.

Список литературы

1. Федеральный закон Российской Федерации № 116-ФЗ от 21.07.1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (ред. от 13.07.2015).
2. ГОСТ Р 53697-2009. Контроль неразрушающий. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010.

3. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2015.

4. ГОСТ Р ИСО 5577-2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь. М.: Стандартинформ, 2011.

5. Прокина Д.Н., Федосов А.В., Штур В.Б. Применение информационных систем для оценки риска опасных производственных объектов // Электротехнические и информа-

ционные комплексы и системы. 2014. № 2, Т. 10. С. 73–79.

6. Федосов А.В., Абдрахимов Ю.Р., Вадулина Н.В. Управление рисками и техническое регулирование. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2013. 176 с.

7. Федосов А.В., Гайнуллина Л.А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 2, Т. 11. С. 73–78

8. Федосов А.В., Федосов В.А., Шаймухаметов Э.Ф. Современные средства измерения, применяемые при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройств на опасных производственных объектах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 1, Т. 12. С. 117–124.

References

1. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii № 116-FZ ot 21.07.1997. «O promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh ob#ektah» (red. ot 13.07.2015).

2. GOST R 53697-2009. Kontrol' nerazrushajushhij. Osnovnye terminy i opredelenija. M.: Standartinform, 2010.

3. GOST R 56542-2015. Kontrol' nerazrushajushhij. Klassifikacija vidov i metodov. M.: Standartinform, 2015.

4. GOST R ISO 5577-2009. Kontrol' nerazrushajushhij. Ul'trazvukovoj kontrol'. Slovar'. M.: Standartinform, 2011.

5. Prokina D.N.Ю, Fedosov A.V., Shtur V.B. Primenenie informacionnyh sistem dlja ocenki riska opasnyh proizvodstvennyh ob#ektov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2014. № 2, Т. 10. S. 73–79.

6. Fedosov A.V., Abdrahimov Ju.R., Vadulina N.V. Upravlenie riskami i tehlichesкое regulirovanie. Ufa: Izd-vo «Neftegazovoe delo», 2013. 176 s.

7. Fedosov A.V., Gajnullina L.A. Metody nerazrushajushhego kontrolja // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2015. № 2, Т. 11. S. 73–78

8. Fedosov A.V., Fedosov V.A., Shajmuhametov Je.F. Sovremennye sredstva izmerenija, primenjaemye pri provedenii jekspertizy promyshlennoj bezopasnosti tehlicheskih ustrojstv na opasnyh proizvodstvennyh obyektah // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2016. № 1, Т. 12. S. 117–124.



Петрова И. Ю.
Petrova I. Yu.

*доктор технических наук,
профессор кафедры систем
автоматизированного
проектирования
и моделирования,
ГАОУ ВО «Астраханский
государственный архитектурно-
строительный университет»
г. Астрахань,
Российская Федерация*



Ураксеев М. А.
Urakseev M. A.

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



Николаев А. В.
Nikolaev A. V.

*аспирант кафедры
«Информационно-измерительная
техника», ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 681.518.3

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Известные методы контроля стойкости режущих инструментов при механической обработке металлов позволяют с достаточной точностью контролировать остаточное время работы инструмента. Однако большинство из них основано на электропроводности детали, что ограничивает их применимость к композиционным материалам. В связи с этим в работе рассматривается обобщенная структура информационно-измерительной и управляющей системы контроля стойкости режущего инструмента для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) на основе метода газового анализа вблизи зоны резания. Показано, что в процессе механической обработки углеродсодержащих материалов с уменьшением остаточной стойкости инструмента происходит увеличение концентрации газов вблизи зоны резания. Также представлена экспериментальная зависимость концентрации оксида углерода от подачи и частоты вращения шпинделя. Результаты эксперимента представлены в виде диаграмм, на которых приведены значения режимов резания и соответствующие им концентрации газов, где отчетливо просматривается зависимость увеличения концентрации газов от уменьшения времени остаточной стойкости. Предложенная обобщенная структура информационно-измерительной и управляющей системы контроля стойкости режущего инструмента для станков с ЧПУ позволяет своевременно оценивать изменение концентрации газов и пересчитывать на основе этих данных остаточную стойкость инструмента. По окончании времени работы инструмента формируется управляющий сигнал для системы ЧПУ станка и смена происходит автоматически, сигнализируя оператору о том, что произошла замена режущего инструмента дублером. Практическая значимость работы состоит в возможности на основании предложенной информационно-измерительной и управляющей системы контроля стойкости режущего инструмента для станков с ЧПУ повысить эффективность производства в связи с развитием и усовершенствованием метода и средств входного и промежуточного контроля режущего инструмента в процессе его эксплуатации.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, механическая обработка, концентрация газов в зоне резания, композиционные материалы, стойкость инструмента, оксид углерода, газоанализатор, инструмент-дублер.

INFORMATION-MEASURING AND OPERATING SYSTEM OF CONTROL OF STABILITY OF CUTTING TOOLS FOR CNC MACHINES

Well-known cutting tool life control methods by the mechanical treatment of metals allow with the sufficient accuracy to test a remaining operating time of the tool. However the majority of them are based on the electro-conductivity of a detail that limits their applicability to composite materials. In connection with this the generalized structure of the information-measuring and operating-monitoring system of cutting tool life control system for machine tools with the numerical program control (CNC) on the basis of a method of the gas analysis near cutting zone is considered. It is shown, that during the mechanical treatment of carbon materials with the reduction of the tool life residual system there is an increase in the concentration of gases near the cutting zone. Also experimental dependence of the carbon oxide concentration from submission and frequency of rotation of a spindle is presented. Results of experiment are presented in the diagrams on which values of modes of cutting and concentration of gases, corresponding them, are shown. The dependence of increase in concentration of gases on reduction of time of residual stability is overviewed. The offered generalized structure of information-measuring and operating-monitoring system of tool life control system for machine tools with numerical program control allows to estimate the change of concentration of gases and to recalculate the tool life residual system on the basis of these data. Upon termination of a tool operating time the operating signal for CNC system is formed and the change occurs automatically, signaling the operator that there was a replacement of the cutting tool with the doubler. The practical importance of this work consists of an opportunity on the basis of offered information-measuring and operating-monitoring system of tool life control system for machine tools with a numerical program control to raise a production efficiency because of the development and improvement of a method and means of the entrance and intermediate control of the cutting tool during its operation.

Key words: information-measuring system, machining, gas concentration in cutting zone, composite materials, tool life, carbon monoxide, gas analyzer, tool understudy.

На современном этапе развития машиностроения изготовление деталей производится субтрактивными методами, т.е. формообразование происходит за счет удаления лишнего материала. Поэтому машиностроительные предприятия вынуждены содержать большой станочный парк. В погоне за производительностью руководители предприятий вынуждены активно проводить техническое перевооружение производства. Однако сокращение бюджета на развитие предприятий и высокие цены на современные станки с ЧПУ не позволяют обновлять устаревающий станочный парк своевременно, поэтому на большинстве предприятий на производственных мощностях можно встретить станки советского образца.

Чтобы не выпасть из борьбы на рынке, приходится проводить модернизацию имеющегося оборудования. Модернизация механообрабатывающих станков проходит по двум направлениям: первое — это автоматизация

основных операций, второе — автоматизация вспомогательных операций. Под вспомогательными операциями предполагают некоторые действия человека и оборудования, которые не сопровождаются изменением формы детали. Одним из таких действий является смена режущего инструмента. На станках старого образца станочник вынужден остановить станок и вручную поменять инструмент. Современное оборудование имеет устройство автоматической смены инструмента, освобождающее станочника от вмешательства в производственный цикл станка. Однако и те, и другие вынуждены производить замену по истечении времени стойкости режущего инструмента, а не по фактическому износу инструмента.

В большинстве случаев режимы резания рассчитывают, выбирая основным фактором период стойкости инструмента, который выбирают по нормативным справочникам. Естественно, в таких нормативах нельзя

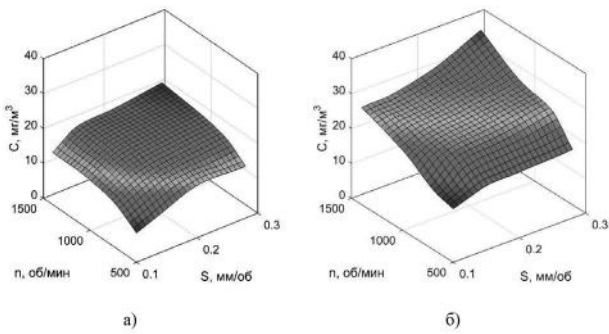


Рисунок 1. Зависимость концентрации оксида углерода от подачи и частоты вращения шпинделя в начале периода стойкости $T = 0$ мин (а), в конце периода стойкости $T = 25$ мин (б)

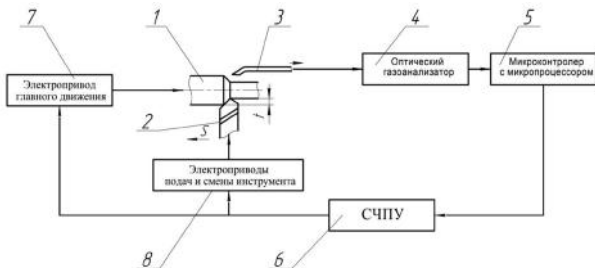


Рисунок 2. Информационно-измерительная и управляющая система контроля стойкости режущего инструмента для станков с ЧПУ

учесть повышенный расход инструмента по случайным факторам, что приведет к большому износу инструмента, чем было заложено изначально. Большой износ инструмента, во-первых, повлияет на качество обрабатываемой детали и ее геометрию, а во-вторых, приведет к повышенному расходу инструмента. В процессе переточки инструмента снимается слой материала на режущей части инструмента. Соответственно, чем больше износ инструмента, тем больший слой необходимо снять для восстановления геометрии режущей части, уменьшая, в свою очередь, количество возможных переточек. Поэтому одними из основных условий эксплуатации инструмента являются контроль износа инструмента и своевременная смена инструмента на заранее заготовленный инструмент-дублер.

На сегодняшний день существует большое количество методов контроля износа режущего инструмента, однако в большинстве случаев они требуют конструктивного вмешательства в оборудование, что ведет к затратам, несоизмеримым с расходом режущего инструмента.

В качестве метода контроля износа инструмента предлагается использовать метод газового анализа. В процессе механической обработки углеродсодержащих материалов (стали, композиты, углепластики и т.д.) под действием сил резания происходят деформация и разрушение кристаллической решетки, которые сопровождаются выделением большого количества тепла [1, 2]. Под действием высоких температур на поверхностях инструмента протекают химические реакции. Результатом реакции является образование таких газов, как оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2), углеводороды (CH) и другие [3, 4, 5]. Зависимость концентрации оксида углерода от подачи и частоты вращения шпинделя показана на рисунке 1. Обработка материала производилась сверлом диаметром 6 мм, материал режущей части Р6М5К5 (HSS Co 5 %), период стойкости инструмента, заявленный производителем, $T = 25$ мин.

Анализ экспериментальных данных показывает, что с увеличением времени работы инструмента происходит увеличение концентрации оксида углерода. Таким образом, значение критической концентрации оксида углерода будет являться индикатором необходимости замены режущего инструмента.

Информационно-измерительная и управляющая система контроля стойкости режущего инструмента для станков с ЧПУ, показанная на рисунке 2, работает следующим образом. Зонд 3 газоанализатора 4 производит забор газа вблизи зоны резания обрабатываемой детали 1 резцом 2. Цифровой сигнал о величине концентрации CO поступает с выхода газоанализатора на вход микроконтроллера 5 со встроенным микропроцессором, где в случае критического значения концентрации формируется сигнал на замену инструмента. Если оборудование не обладает устройством автоматической смены инструмента, то включается светозвуковая сигнализация для оператора, предупреждающая о необходимости замены инструмента. Если же станок имеет устройство автоматической смены инструмента, то формируется управляющий сигнал для системы ЧПУ станка, и смена происходит автоматически, сигнализи-

руя оператору о том, что произошла замена режущего инструмента дублером.

Наличие информационно-измерительной и управляющей системы контроля стойкости режущего инструмента для станков с ЧПУ на основе метода газового анализа во многих случаях позволяет избежать образования дефектов на обработанной поверхности.

А тот факт, что забор газа происходит вблизи зоны резания и не требует конструктивного вмешательства в оборудование, говорит об универсальности такой системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50122 мол_нр.

Список литературы

1. Cong W.L., Xiatian Z., Deines T.W. Rotary Ultrasonic Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites: An Experimental Study on Cutting Temperature // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2012. № 22. Vol. 31. P. 1516–1525.
2. Valavan U. Tool Life Prediction Based on Cutting Forces and Surface Temperature in Edge Trimming of Multidirectional CFRP Composites: Master of Science — 05.03.01. Wichita, 2007. 120 s.
3. Швецов И.В. Диагностирование состояния режущего инструмента на основе газоаналитического отображения процессов механической обработки: дисс. ... д-ра техн. наук — 05.03.01. Великий Новгород, 2004. 365 с.
4. Никуленков О.В. Повышение эффективности строгальных операций при обработке крупногабаритных деталей на основе оценки состояния газовой среды в зоне резания: дисс. ... канд. техн. наук. — 05.03.01. Великий Новгород, 2005. 146 с.
5. Афанасьев К.В. Диагностирование зоны резания методами бесконтактного контроля при сверлении углеродсодержащих сплавов: дисс. ... канд. техн. наук — 05.02.07. М., 2012. 183 с.

References

1. Cong W.L., Xiatian Z., Deines T.W. Rotary Ultrasonic Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites: An Experimental Study on Cutting Temperature // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2012. № 22. Vol. 31. P. 1516–1525.
2. Valavan U. Tool Life Prediction Based on Cutting Forces and Surface Temperature in Edge Trimming of Multidirectional CFRP Composites: Master of Science — 05.03.01. Wichita, 2007. 120 s.
3. Shvecov I.V. Diagnostirovanie sostojanija rezhushhego instrumenta na osnove gazoanaliticheskogo otobrazhenija processov mehanicheskoj obrabotki: diss. ... d-ra tehn. nauk — 05.03.01. Velikij Novgorod, 2004. 365 s.
4. Nikulenkov O.V. Povyshenie jeffektivnosti strogal'nyh operacij pri obrabotke krupnogabaritnyh detalej na osnove ocenki sostojanija gazovozdushnoj sredy v zone rezanija: diss. ... kand. tehn. nauk — 05.03.01. Velikij Novgorod, 2005. 146 s.
5. Afanas'ev K.V. Diagnostirovanie zony rezanija metodami beskontaktnogo kontrolja pri sverlenii uglerodsoderzhashhih splavov: diss. ... kand. tehn. nauk — 05.02.07. M., 2012. 183 s.



Абдрахманов В. Х.
Abdrahmanov V. Kh.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация



Важдаев К. В.
Vazhdaev K. V.

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



Салихов Р. Б.
Salikhov R. B.

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 681.518.3

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА

В целях повышения энергосбережения (в жилых помещениях) или в технологических целях (например в теплицах) часто необходимо поддерживать требуемый температурный или климатический режим в помещении. Обычно в таких устройствах имеется индикация параметров (температуры, влажности) и интерфейс пользователя в виде небольшого графического либо алфавитно-цифрового дисплея и функциональной клавиатуры, ручки регулятора температуры или влажности. Также бывает необходимо дистанционно отслеживать параметры или управлять устройством дистанционно, например менять температурный режим, программу функционирования по дням недели.

Представленные в статье идеи по разработке автоматизированной системы для мониторинга состояния и управления температурным режимом, климатом и теплопотреблением в помещениях являются примером реализации Интернета Вещей (Internet of Things) в Умном городе (Smart City) [1].

Решение проблем энергоресурсосбережения возможно путем повсеместного внедрения современных автоматизированных систем мониторинга и управления (АСМУ) теплопотреблением зданий [2]. Существующие пилотные решения АСМУ отоплением и распределенных информационно-измерительных систем приборного учета [2–7] выполняются с помощью коммутируемых линий связи [2], беспроводных GSM-сетей [3], глобальных каналов Internet [4, 5, 7] и решают частные вопросы мониторинга состояния и удаленного управления оборудованием тепловых пунктов. Для простых и бюджетных решений удаленного мониторинга хорошо подходит глобальная сеть Internet [4, 5] ввиду ее широкой распространенности в России (подведена практически к каждому жилому дому, предприятию и учебному заведению) и относительной простоты реализации. В информационно-измерительных системах дистанционного контроля и управления параметрами микроклимата используются акустооптические датчики [8, 9, 10].

Использование обычных стандартных погодных регуляторов (например, Danfoss ECL Comfort 210 [11], Siemens RVD145 [12]) в составе автоматизированных систем для мониторинга не всегда эффективно, поскольку погодные регуляторы в стандартном исполнении не имеют встроенных Ethernet-контроллеров и, следовательно, не имеют возможности включения в локальную сеть без доработок, кроме того, это экономически невыгодно из-за их относительно высокой цены, поскольку в погодные регуляторы закладывается некоторая функциональная избыточность — возможность подключения нескольких контуров отопления, горячего водоснабжения, управления газовыми котлами и т.д., а также из-за того, что на рынке работают только давно зарекомендовавшие себя известные западные фирмы (Danfoss, Siemens и др.), которые производят также и другие элементы систем автоматизации теплоснабжения (электроприводы регулирующих клапанов, датчики и др.), обеспечивая техническую поддержку своих продуктов.

В статье проведен анализ основных тенденций развития автоматизированных систем мониторинга и управления температурным режимом, климатом и отоплением помещений. В результате сделан вывод о целесообразности использования для связи с устройствами глобальной сети Internet. После рассмотрения основных используемых в современных системах автоматизации аппаратных и программных средств подключения к сети Интернет были выбраны оптимальные методы решения поставленной задачи. Разработанная система реализуется на самой современной элементной базе, используемой для построения устройств с Ethernet-интерфейсом, она многофункциональна, легко перестраивается под конкретное применение и оптимальна с точки зрения затрат на реализацию.

Ключевые слова: системы отопления, энергоресурсосбережение, автоматизация зданий, мониторинг режимов, управление теплотреблением, управление климатом, погодные регуляторы, Ethernet контроллер, стек протоколов TCP/IP, M-Bus.

INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF REMOTE CONTROL OF MICROCLIMATE

In order to enhance the energy saving (in residential areas) or for technological purposes (e.g. in greenhouses), it is often necessary to maintain the required temperature and climatic conditions in the room. Such devices usually have a display (temperature, humidity), the user interface as a small graphic or alphanumeric display and some functional keyboard, control knobs for temperature or humidity. Also it is necessary to remotely monitor and manage the device settings — for example, to change the temperature, the functioning program per day. The developed system for monitoring and management of climate and space heating is an example of the Internet of Things in the Smart City [1].

Solving problems of energy saving is possible by the widespread introduction of modern automated monitoring and control systems of heat consumption of buildings [2]. Such existing pilot systems of heating management and distributed information and control metering systems [2–7] are made via dial-up lines [2], the wireless of GSM-networks [3], the global Internet channels [4, 5] and solve particular issues of status monitoring and remote control of heat equipment points. For simple and low cost solutions for remote monitoring well suited Internet global network [4, 5], in view of its high prevalence in Russia (is brought to almost every dwelling house, dwelling-house in enterprises and educational institutions), and the relative ease of implementation.

Using the commonly used standard weather compensators (e.g., the type of Danfoss ECL Comfort 210 [11], Siemens RVD145 [12]) as part of automated monitoring systems are not always effective, because of weather compensators as standard do not have built-in Ethernet-controllers and therefore do not have the possibility of switching to a local network without modification. Moreover, it is not economically viable due to their relatively high price, because the weather controls laid some functional redundancy — the ability to connect multiple heating circuits, hot water, gas boilers, etc., and also because in this market well-known western companies (Danfoss, Siemens and others) only work for a long time, which also produce other elements of heating automation systems (electric control valves, sensors, etc.), provide technical support to their products.

The analysis of the main trends in the development of automated systems for monitoring and thermal management, climate and buildings heating is provided. As a result, the conclusion of the

feasibility of using the global Internet to communicate with devices is done. After reviewing of the basic hardware and software of connecting to the Internet, used in modern automation systems, optimal methods for the solution of the problem have been chosen. The developed system is implemented on most modern components used to build devices with Ethernet-interface. Moreover, the developed system is multifunctional, easy to rebuilt for specific applications and optimal in terms of its implementation costs.

Key words: district heating systems, energy and resource saving, building automation, monitoring modes, heat consumption control, climate control, weather compensators, Ethernet controller, TCP/IP stack, M-Bus network.

Обзор существующих решений

При необходимости в создании устройства с возможностью подключения к сети Ethernet возможны следующие варианты готовых технических решений.

Преобразователь RS-232 — Ethernet (например, NetCom 111 от VSCom [13]), обычно представляющий собой виртуальный СОМ-порт, преобразующий поток данных RS-232 в IP-пакеты на одном конце, и некое устройство, осуществляющее приём и раскодирование этих пакетов и отдающее контроллеру в виде RS-232 на другом конце. Достоинства такого решения — простота программирования. Недостатки у такого решения — невозможность использования протоколов более высоких уровней, таких как SNMP, HTTP и других.

Микросхема WIZNET W5100 [14] и основанный на ней Arduino Ethernet Shield. На этом контроллере уже возможно реализовать WEB-сервер или Telnet и через них управлять встраиваемым устройством. Недостатки такого решения: невысокая гибкость (возможно использовать только те протоколы, которые заложили разработчики) и высокая стоимость, часто может быть превышающая стоимость самого управляемого устройства.

Бюджетный и удобный в применении готовый модуль Mini ENC28J60 Ethernet LAN Network Module [15] на базе Ethernet-контроллера ENC28J60 с Ethernet-разъемом HR911105A (со встроенными трансформаторами гальваноразвязки и индикацией), выходным последовательным синхронным интерфейсом SPI (поддерживаемым практически любым современным контроллером). Таким образом, модуль можно подключить к любому микроконтроллерному устройству, он широко используется в устройствах на

платформе Arduino. Из недостатков необходимо отметить, что модуль требует питание 3,3 В, причем ток потребления немаленький — до 250 мА, т.е. требуется отдельный стабилизатор на 3,3 В.

Предлагаемые идеи по разработке

Возможно реализовать подключение к сети Ethernet на базе имеющейся современной элементной базы. Для этого обычно вводят в схему дополнительно к основному контроллеру драйвер физического уровня (PHY), включенный по шине SPI, такой как микросхема ENC28J60 стандарта 10 Base-T (рисунок 1), или микросхема ENC624J600 стандарта 10/100 Base-T от компании Microchip Technology Inc., или же берется контроллер семейства PIC18FXXJXX со встроенным PHY (рисунок 2) и программно реализуются все необходимые протоколы. При этом можно воспользоваться уже готовым стеком (существует довольно большой выбор TCP стеков для микроконтроллеров различных производителей).

На рисунке 3 приведены основные блоки ENC28J60, где обозначены: PHY — физический уровень, приёмник, передатчик, драйверы и т.д., то есть всё, что необходимо для работы с определённой средой передачи данных. В данном случае — с витой парой по стандарту 10BASE-T. Доступ к PHY происходит исключительно через МП (Medium Independent Interface). МП задуман так, чтобы следующий (канальный) уровень мог абстрагироваться от типа среды передачи данных. PHY имеет свой набор 16-битных регистров (специфичных для среды передачи данных), доступ к которым осуществляется через МП.

MAC (Medium Access Controller) — канальный уровень, в него входит вся логика, необходимая для отправки и приёма пакетов

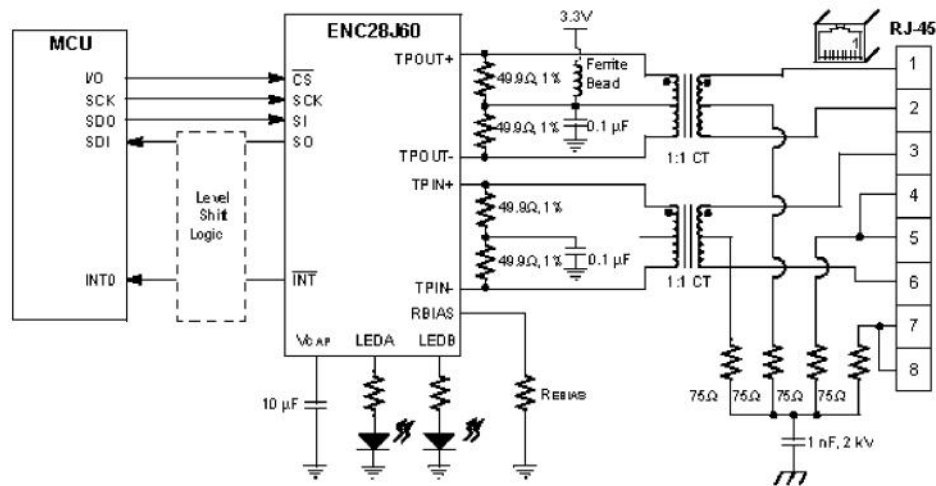


Рисунок 1. Типовая схема подключения ENC28J60

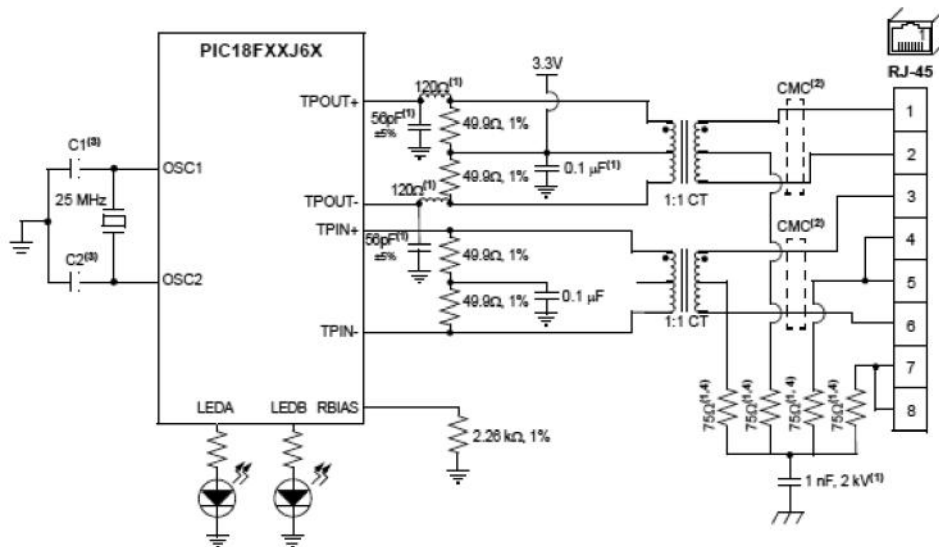


Рисунок 2. Типовая схема подключения PIC18FXXJXX

в сети Ethernet. MAC занимается адресацией, расчётом контрольной суммы, фильтрацией принимаемых пакетов, разрешением коллизий (в полудуплексном режиме) и т.д. Обменивается со следующим, сетевым уровнем готовыми пакетами, а с физическим — отправляемыми и принимаемыми «сырыми» байтами.

Управляющая логика занимается всем остальным, в том числе обслуживает буфер,

из которого MAC берёт отправляемые данные и складывает принятые, управляет режимами энергопотребления и т.д.

Свободно распространяемая библиотека стека протоколов TCP/IP от Microchip Technology Inc. [16] выполняет поддержку следующих протоколов (рисунок 4):

- ARP, IP, ICMP, UDP, TCP, DHCP, SNMP, SMTP, HTTP, FTP, TFTP;
- поддержка TCP и UDP;
- поддержка SSL;
- поддержка NetBIOS;
- поддержка DNS.

Имеются исходные файлы http-сервера, поддерживающего GET и POST запросы, SSL-аутентификацию и сжатие GZIP, клиент и сервер ICMP, клиент и сервер SNMP (версии 1, 2 и 3, в том числе SNMP TRAP), программный мост TCP2UART, сервер TELNET, клиент DynDNS, DNS, DHCP и многое другое, при этом стек занимает не так

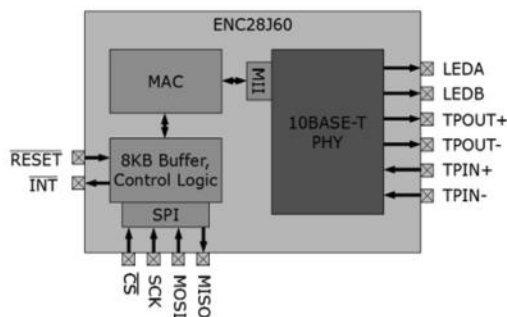


Рисунок 3. Архитектура Ethernet — контроллера ENC28J60

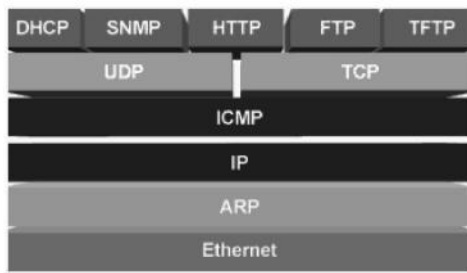


Рисунок 4. Стек протоколов TCP/IP, поддерживаемый библиотекой от Microchip Technology Inc.

много памяти. Так, реальный проект, содержащий WEB-сервер, DHCP и DNS-клиент, мост Ethernet–Serial, сервер TFTP и SNMP, клиент SMTP, потребует порядка 33 килобайт памяти программ (ROM) и 2 килобайта памяти данных (RAM), при том, что типичный размер памяти PIC18F67J60 составляет 128 килобайт.

Кроме TCP/IP стека Microchip предлагает следующие инструменты для разработки:

- Среда разработки. Бесплатные MPLab 8 (слегка устаревшая, но проверенная годами) или MPLab-X [17] (перспективная, но пока не слишком стабильная среда разработки);
- Компилятор. Официально поддерживаются C18, C30 и C32. Ознакомительную 60-дневную версию можно скачать с официального сайта компании;
- Программатор и (или) внутрисхемный отладчик. ICD3 или PICKIT3 (ICD2 также работает, но не поддерживается средой MPLab-X и более медленная).

Реализация такого собственного проекта с разработкой принципиальной схемы, разводкой печатной платы, сборкой, написанием под это устройство собственного программного обеспечения, его отладкой требует достаточно больших трудозатрат. Хорошим решением в такой ситуации может быть использование отладочной платы PIC WEB-EK [18] для контроллера PIC18F97J60. Контроллер PIC18F97J60 от компании Microchip Technology Inc., специализированный, со встроенным 10Base-T Ethernet контроллером и интегрированным MAC и PHY.

Физический уровень реализован в самом контроллере, т.е. развязывающий трансформатор подключается сразу на контроллер. Фактически на одном только разъеме, кварце-

вом осцилляторе и микроконтроллере, а также при минимальной обвязке возможно реализовать, например, самодостаточный веб-сервер, пригодный для многих применений в области автоматизации. Отладочная плата PIC WEB-EK может быть использована для удаленного мониторинга и управления через сеть Ethernet, поставляемые с платой исходные файлы демонстрируют ее возможности: мониторинг и управление восемью цифровыми выходами, управление двумя выходами реле, снятие показаний термодатчика (рисунок 5).

Большие функциональные возможности в сочетании с относительно низкой ценой позволяют реализовать на этой плате разнообразные устройства, исключая или сводя к минимуму ее схемную доработку. Модификация устройства под требования конкретного применения может состоять только в перепрограммировании устройства, что легко осуществляется через имеющийся разъем внутрисхемного программирования ICSP с помощью практически любых программаторов или отладчиков PIC — контроллеров, например, внутрисхемный отладчик PICKIT2 или PICKIT3. Наличие на плате микросхемы часов реального времени (RTC) и разъема для батарейки позволяет менять программу работы, например, изменения температурного режима по календарному плану, по дням недели, вести журнал данных показаний датчиков (сохраняя данные в энергонезависимом ППЗУ, которое также имеется на плате). Наличие выхода с протоколом 1-Wire для подключения стандартного термодатчика типа DS18B20 очень удобно, т.к. для работы в режиме погодного регулятора нужно несколько термодатчиков, измеряющих температуру в помещении, на улице, температуру теплоносителя (на батарее отопления) в нескольких местах (на входе и выходе). Количество термодатчиков в зависимости от сложности системы регулирования может быть различным, но все они могут быть подключены по одному проводу при использовании выхода по протоколу 1-Wire. Существует возможность подключения также аналоговых датчиков типа Pt1000, но для этого нужно будет использовать имеющиеся на плате выводы портов (все выводы

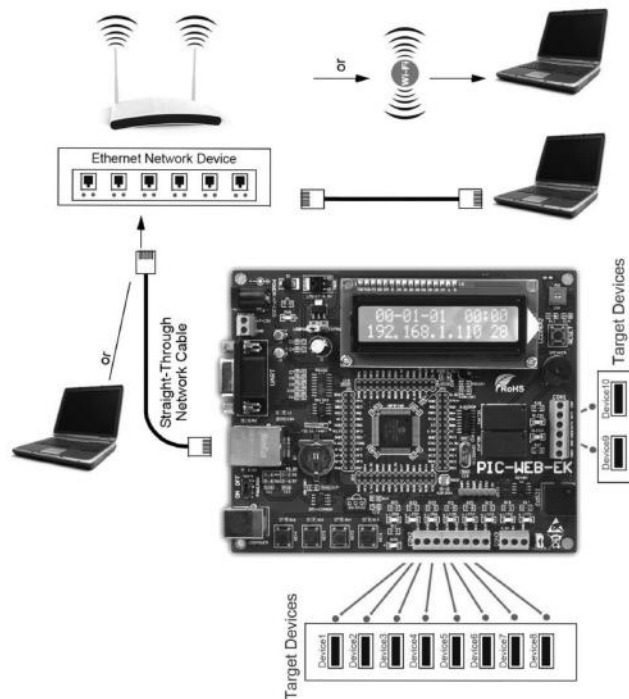


Рисунок 5. Типовая схема подключения PIC WEB-EK для контроллера PIC18F97J6

портов выведены, т.к. плата является отладочной платой для изучения и отладки устройств на контроллерах PIC18F67J60). Наличие 5 кнопок и стандартного 2-строчного дисплея типа LCD1602 позволяет реализовать индикацию параметров и интерфейс пользователя для изменения настроек, например, температурного режима, программы функционирования. Наличие пьезодинамика позволит провести звуковое оповещение при появлении аварийной ситуации. Наличие двух выходов реле позволяет без каких-либо доработок подключить 2 электронагревателя с током до 5 А, либо электропривод задвижки (включение с возможностью реверса), при этом нужно отметить, что для работы устройства в качестве погодного регулятора в большинстве стандартных применений (например для установки его в квартиру, дом) этого вполне достаточно. Поскольку есть 8 цифровых выводов контроллера, выведенных на клеммник, то подключая туда, например, Arduino-платы реле с цифровым входом от тех же китайских производителей [19], можно легко расширять функциональность устройства. Наличие встроенного контроллера физического уровня интерфейса RS485 (токовая петля) позволяет реализовывать на базе платы слож-

ные многоконтроллерные системы регулирования климата больших зданий, связанные по распространенному протоколу Modbus-RTU, а также подключать разнообразные датчики по этому протоколу.

Наличие на плате выхода стандартного протокола RS232 позволит включить через него теплосчетчик. Подавляющее большинство имеющихся на рынке теплосчетчиков имеют в качестве выходного протокол M-Bus [20]. Информационные сети на базе двухпроводной шины M-Bus широко используются в странах Западной и Восточной Европы для дистанционной передачи показаний со счетчиков воды, газа, тепло- и электроэнергии, установленных как в жилых зданиях, так и на промышленных объектах. Все приборы учета (счетчики) соединены параллельно двужильным витым кабелем и подключены к центральному устройству, управляющему работой сети, — M-Bus мастеру.

В состав любой сети M-Bus входит один мастер и один или более подчиненных устройств приборов учета (рисунок 6). Например, Danfoss [11] предлагает M-Bus — мастера серии Hydro-Center на 25, 60, 250 ведомых устройств. Расстояния от прибора учета до мастера могут достигать 10 и более километров. Данные передаются последова-

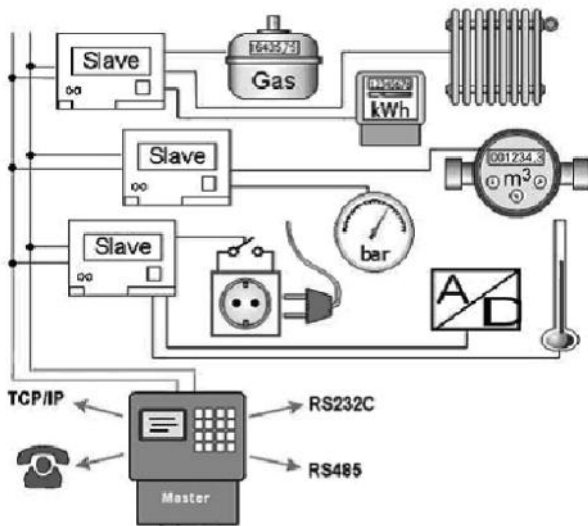


Рисунок 6. Общая схема сети M-Bus

тельно, специальным помехозащищенным протоколом в соответствии с EN1434.

Характерной особенностью протокола является то, что все подключаемые устройства должны питаться от сети M-Bus, что упрощает схемную реализацию оконечных ведомых устройств, но усложняет схемотехнику управляющих ведущих устройств — M-Bus — мастеров. В России протокол не получил широкого распространения, т.к. не было широкого внедрения специализированной сети для автоматизированного снятия показаний счетчиков. Теплосчетчики в жилых домах и вовсе не стоят в каждой квартире как в странах Западной и Восточной Европы, а ставятся обычно по одному на подъезд, дом. Таким образом, необходим переходник на протокол M-Bus для снятия показаний теплосчетчика. Есть простые схемные решения [20] для удаленного подключения 2–3 устройств M-Bus через про-

токол RS-232. При этом реализуется только физический уровень протокола, более высокие уровни: канальный, сетевой и другие нужно реализовать программно. Если реализовать на базе платы переходник Ethernet-RS232 с созданием виртуального порта, то можно использовать стандартное программное обеспечение, поставляемое в комплекте с переходниками M-Bus — Ethernet [21]. Поскольку интенсивность обмена невысока, можно задать скорость 400 бод, к примеру, тогда должно быть достаточно скорости работы стека протоколов TCP/IP и реализуемого на его базе переходника Ethernet-RS232.

Выводы

Проведен анализ основных тенденций развития автоматизированных систем мониторинга и управления температурным режимом, климатом и отоплением помещений. В результате сделан вывод о целесообразности использования для связи с устройствами глобальной сети Internet. После рассмотрения основных используемых в современных системах автоматизации аппаратных и программных средств подключения к сети Интернет были выбраны оптимальные методы решения поставленной задачи. Разработанная система реализуется на самой современной элементной базе, используемой для построения устройств с Ethernet-интерфейсом, многофункциональна, легко перестраивается под конкретные применения и оптимальна с точки зрения затрат на реализацию.

Список литературы

1. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // IEEE Internet of Things J. 2014. Feb. Vol. 1. No. 1. pp. 22–32.
2. Анисимов А.Л., Астапкович А.М., Касаткин А.А. Системные проблемы создания распределенных информационно-управляющих систем приборного учета. Режим доступа: http://guap.ru/guap/skb/docs/article_v3.doc. (дата обращения 12.06.2014).

3. Диспетчеризация приборов учета через интернет [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.t2system.ru>.
4. Автоматизация и диспетчеризация систем теплоснабжения зданий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.halax.ru/avtomatizacija-dispetcherizacijasistem.html>.
5. Система мониторинга «HeatCAM» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://heating.sumdu.edu.ua>.
6. Загирняк М.В., Перекрест А.Л. Опыт внедрения и использования автоматизиро-

ванной системы мониторинга температурных режимов и удаленного управления теплотреблением кременчугского национального университета // Электротехнические и компьютерные системы. 2014. № 15 (91). С. 423–426.

7. Шестака А.И., Мельникова Л.В., Бушер В.В. Современные методы автоматизации зданий // Электротехнические и компьютерные системы. Одесса: Техника, 2013. № 11 (87). С. 82–89.

8. Ураксеев М.А., Важаев К.В. Акустооптические датчики физических величин. Уфа: Уфимск. гос. акад. эконом. и сервиса, 2008. 111 с.

9. Важаев К.В., Губайдуллин А.Г. Волоконно-оптические датчики на акустооптическом эффекте // Приборы и системы управления, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 36–40.

10. Важаев К.В. Акустооптические устройства и их применение в приборах и информационно-измерительных системах // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 1. С. 148–151.

11. Weather Compensators [Electronic resource]. Available: <http://products.danfoss.co.uk/productrange/heatingsolutions/weather-compensators/>.

12. RVD120, RVD140. Controllers for District Heating and D.H.W. Basic Documentation [Electronic resource]. Available: [http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/58301_012\\$RVD120\\$140\\$01\\$en.pdf](http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/58301_012$RVD120$140$01$en.pdf).

13. RS232 to Ethernet Converters [Electronic resource]. Available: <http://www.insat.ru/products/?category=949>.

14. Arduino Ethernet Shield [Electronic resource]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShield>.

15. Mini ENC28J60 Ethernet LAN Network Module [Electronic resource]. Available: <http://www.ebay.com/bhp/enc28j60-module>.

16. Microchips Ethernet Portfolio [Electronic resource]. Available: <http://www.microchip.com/ethernet>.

17. MPLAB IDE Archives [Electronic resource]. Available: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/devtools/dev-tools-parts.html>.

18. PIC Ethernet Development Board PIC-WEB-EK [Electronic resource]. Available: <http://www.logifind.com/pic-dspic-pic32-pic24/development-boards/pic-ethernet-development-board-pic-web-ek-for-pic18f97j60-952.html>.

19. 1 x One Channel Relay Module [Electronic resource]. Available: <http://www.ebay.com/itm/251961847164>.

20. The M-Bus: A Documentation Rev. 4.8. [Electronic resource]. Available: <http://www.m-bus.com/mbusdoc/default.php>.

21. Tech Base M-Bus 10 — конвертер M-Bus (master) на RS-232 [Electronic resource]. Режим доступа: http://www.radioterminal.ru/catalog/rt_converters.

References

1. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // IEEE Internet of Things J. 2014. Feb. Vol. 1. No. 1. pp. 22–32.

2. Anisimov A.L., Astapovich A.M., Kasatkin A.A. Sistemnye problem sozdaniya raspredelennyh informacionno-upravljajushih system pribornogo ucheta. Rezhim dostupa: http://guap.ru/guap/skb/docs/article_v3.doc. (data obrashhenija 12.06.2014).

3. Dispetcherizacija priborov ucheta cherez internet [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.t2system.ru>.

4. Avtomatizacija i dispetcherizacija system teplosnabzhenija zdaniy [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.halax.ru/avtomatizacija-dispetcherizacijasistem.html>.

5. Sistema monitoringa «HeatCAM» [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://heating.sumdu.edu.ua>.

6. Zagirnjak M.V., Perekrest A.L. Opyt vnedrenija i ispol'zovaniya avtomatizirovannoj sistemy monitoring temperaturnyh rezhimov i udalennogo upravlenija teplopotrebleniem kremenchugskogo nacional'nogo universiteta // Jeletrotehnicheskie i komp'juternye sistemy. 2014. № 15 (91). С. 423–426.

7. Shestaka A.I., Mel'nikova L.V., Busher V.V. Sovremennye metody avtomatizacii zdaniy // Jeletrotehnicheskie i komp'juternye sistemy. Odessa: Tehnika, 2013. № 11 (87). С. 82–89.

8. Urukseev M.A., Vazhdaev K.V. Akustoopticheskie datchiki fizicheskikh velichin.

Ufa: Ufimsk. gos. akad. jekonom. iservisa, 2008. 111 s.

9. Vazhdaev K.V., Gubajdullin A.G. Volokonno-opticheskie datchiki na akustoopticheskom jeffekte // Pribory i sistemy upravlenija, kontrol', diagnostika. 2011. № 2. S. 36–40.

10. Vazhdaev K.V. Akustoopticheskie ustrojstva i ih primenenie v priborah i informacionno-izmeritel'nyh sistemah // Neftegazovoe delo. 2012. T.10. № 1. S. 148–151.

11. Weather Compensators [Electronic resource]. Available: <http://products.danfoss.co.uk/productrange/heatingsolutions/weather-compensators>.

12. RVD120, RVD140 Controllers for District Heating and D.H.W. Basic Documentation [Electronic resource]. Available: [http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/58301_012\\$RVD120\\$140\\$01\\$en.pdf](http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/58301_012$RVD120$140$01$en.pdf).

13. RS232 to Ethernet Converters [Electronic resource]. Available: <http://www.insat.ru/products/?category=949>.

14. Arduino Ethernet Shield [Electronic resource]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShield>.

15. Mini ENC28J60 Ethernet LAN Network Module [Electronic resource]. Available: <http://www.ebay.com/bhp/enc28j60-module>.

16. Microchips Ethernet Portfolio [Electronic resource]. Available: <http://www.microchip.com/ethernet>.

17. MPLAB IDE Archives [Electronic resource]. Available: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/devtools/dev-tools-parts.html>.

18. PIC Ethernet Development Board PIC-WEB-EK [Electronic resource]. Available: <http://www.logifind.com/pic-dspic-pic32-pic24/development-boards/pic-ethernet-development-board-pic-web-ek-for-pic18f97j60-952.html>.

19. 1 x One Channel Relay Module [Electronic resource]. Available: <http://www.ebay.com/itm/251961847164>.

20. The M-Bus: A Documentation Rev. 4.8. [Electronic resource]. Available: <http://www.m-bus.com/mbusdoc/default.php>.

21. TechBase M-Bus 10 — konverter s M-Bus (master) na RS-232 [Electronic resource]. Rezhim dostupa: http://www.radioterminal.ru/catalog/rt_converters.



Доломатов М. Ю.
Dolomatov M. Yu.

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



Паймурзина Н. Х.
Paimurzina N. Kh.

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



Ковалева Э. А.
Kovaleva E. A.

кандидат химических наук,
доцент кафедры «Математика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 535.34; 541.1

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛОВ ИОНИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В последние годы в молекулярной электронике предложены полевые органические транзисторы на основе полициклических углеводородов. Важное значение для разработки такого типа устройств имеет информация об электронной структуре молекул, таких как потенциал ионизации (ПИ) и сродство к электрону (СЭ). Современные методы определения ПИ основаны на фотоэлектронной спектроскопии, квантовых расчетах методами Хартри-Фока и методе функционала плотности (DFT). Недостатком современных методов определения потенциала ионизации является их неадекватность расчетам для больших и метастабильных молекул. Целью данной работы является разработка полуэмпирического способа оценки потенциала ионизации для полициклических молекул по интегральным характеристикам их электронных спектров. В основе феноменологического полуэмпирического подхода, развиваемого в данном исследовании, лежит использование эмпирических параметров, характеризующих электронный спектр и атомный остов молекулы. В качестве характеристики спектра предлагается использовать интегральную силу осцилляторов (ИСО), которая с физической точки зрения отражает квантовый континуум распределения спектральной плотности множества электронных состояний. Кроме того, физический смысл ИСО заключается в ее связи с энергией обменного и электростатического взаимодействия электронов, а также с зарядами атомов. Объектами исследования являются органические полупроводники. Определение электронных спектров регистрировались в диапазоне 280-780 нм. Расчет потенциала ионизации проводили неэмпирическим методом RHF 6-31G** с полной оптимизацией геометрии молекул. Исследованы зависимости между интегральными характеристиками спектра и расчетными потенциалами ионизации. Получена двухпараметрическая зависимость, которая связывает потенциал ионизации с интегральными силами осцилляторов электронных спектров и суммарного заряда ядер молекулярного остова. Результаты подтверждаются статистической обработкой данных. Средняя относительная погрешность отклонения расчетных потенциалов ионизации от потенциалов ионизации, определенных по спектрам, не превышает 1 %. Предложен способ определения ПИ полициклических органических полупроводников на основе зависимости ПИ от ИСО и суммарного заряда ядер молекулярного остова.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, потенциалы ионизации, интегральная сила осциллятора, молярный коэффициент поглощения, электронный спектр, двухпараметрическая зависимость, методы многофакторного регрессионного анализа.

SEMIEMPIRICAL EFFICIENCY OF POLYCYCLIC ORGANIC SEMICONDUCTORS MOLECULES IONIZATION POTENTIAL

During the recent years in molecular electronics organic field — effect transistors on the basis of polycyclic hydrocarbons have been suggested. The utmost importance for designing such a type of device is the information on electronic structure of molecules, such as the ionization potential (IP) and electron affinity (EA). Modern methods of determining the IP based on the photoelectron spectroscopy, quantum calculations, Hartree-Fock and density functional theory (DFT). The disadvantage of modern methods of defining the ionization potential is their inadequacy of calculations for large and metastable molecules. The objective of this work is to develop the semi empirical method of evaluating the ionization potential for polycyclic molecules in accordance with the integral characteristics of their electronic spectra. At the heart of the semi-empirical phenomenological approach developed in this study is the use of empirical parameters characterizing the electronic spectrum and the atomic backbone of the molecule. As the characteristics of the spectrum is proposed to use the integrated oscillator strength (ISO), which is from the physical point of view represents a quantum continuum distribution of the spectral density of the plurality of electronic states. In addition, the physical sense of the ISO is its connection with the exchange of energy and electrostatic interaction of electrons and atoms with charges. The objects of research are organic semiconductors. The efficiency of electronic spectra was recorded in the range from 280-780 nm. The calculation of ionization potential was carried out with the help of non empirical method RHF 6-31G** with full optimization of molecule geometry. The dependence between the integral characteristics of a spectrum and calculated ionization potentials has been researched. Two-parameter dependence has been obtained which ties the ionization potential with integral forces of electronic spectra oscillators and the total nuclei charge of molecular frame. The results have been corroborated by the statistical data processing. The average relative error of calculated ionization potentials deviation from the ionization potentials, defined on the spectra, do not exceed 1 %. The way of evaluating IP of polycyclic organic semiconductors on the basis of dependence of IP on ISO and the total nuclei charge of molecular frame has been suggested.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons, ionization potential, oscillator integral power, molar coefficient of absorption, electronic spectrum, two-parameter dependence, method of multiple factor regressive analysis.

Актуальным является исследование электронных характеристик молекул полициклических ароматических полупроводников, благодаря которым возможно их использование в «органической» электронике в виде активных материалов в полевых транзисторах, устройствах хранения информации, светоизлучающих диодах, сенсорах и элементах солнечных батарей. Поэтому оценка потенциала ионизации (ПИ) и сродства к электрону (СЭ) имеет важное значение для нанoeлектроники. Современные методы определения ПИ основаны на фотоэлектронной спектроскопии, квантовых расчетах

методами Хартри-Фока и методе функционала плотности (DFT). Недостатком метода фотоэлектронной спектроскопии является практическая неприменимость метода к большим и метастабильным молекулам. В методе DFT Кона-Шэма [1] предполагается, что функционал энергии основного состояния, вычисляемый в заданной точке пространства, определяется следующим образом

$$E_{xc} = \int \varepsilon_{xc}(n)\rho(r)d^3r, \quad (1)$$

где

$$\rho(\vec{r}) = N \int d^3r_2 \int d^3r_3 \dots \int d^3r_N \psi^*(\vec{r}, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N) \psi(\vec{r}, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N). \quad (2)$$

Метод DFT дает ошибку в расчетах ПИ, для получения более точных значений необходимо учитывать обменную и корреляционную энергию взаимодействия электронов, что весьма непросто. В большинстве расчетов молекул, например, в методе Пердью-Бёрке-Эрнцера (PBE) обменно-корреляционный функционал разбивается на обменную и корреляционную составляющие. Использование этих функционалов в сочетании с многочастичной теорией возмущений дает хорошие результаты при расчете структуры и энергетических характеристик небольших молекул. В некоторых случаях, в частности при расчетах полициклических органических молекул, получаются удовлетворительные результаты, согласующиеся с экспериментом [2]. С увеличением числа атомов в молекуле точность расчетов ПИ снижается, а время расчетов увеличивается в геометрической прогрессии. Основной трудностью является «подгонка» параметров функционала под эксперимент, поэтому важно разрабатывать для определения ПИ упрощенные методы, которые позволили бы более адекватно определять ПИ молекул. В числе таких методов методы определения ПИ по интегральной силе осциллятора (ИСО) [3] и по цветовым характеристикам [4].

Для улучшения определения ПИ сложных органических молекул были предложены методы, в основе которых лежит связь интегральной силы осциллятора θ (ИСО) с ПИ молекул [4]

$$E = \alpha_1 + \alpha_2 \int_{\lambda} \lg(\xi) d\lambda, \quad (3)$$

где E — энергия граничных орбиталей ПИ, эВ; (α_1, α_2) — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа орбитали, постоянные в данном гомологическом ряду, соответственно эВ, эВ·моль·м⁻³; $\xi = f(\varepsilon)$ — соответствующая спектральная функция поглощения электромагнитного излучения для атомов или молекул, где ε — молярный коэффициент поглощения, размерность, принятая в электронной спектроскопии, л·моль⁻¹·см⁻¹, в СИ 10⁻¹·м²·моль⁻¹.

Целью данной работы является разработка полуэмпирического способа оценки ПИ для органических полупроводников на основе информации о структуре молекул и

интегральных характеристиках их электронных спектров.

В основе феноменологического полуэмпирического подхода, развиваемого в данном исследовании, лежит использование эмпирических параметров, характеризующих электронный спектр и атомный остов молекулы. В качестве характеристики спектра предлагается использовать интегральную силу осцилляторов (ИСО), которая является суммой сил осцилляторов отдельных электронных переходов. С физической точки зрения ИСО отражает квантовый континуум распределения спектральной плотности множества электронных состояний. Кроме того, физический смысл ИСО заключается в ее связи с энергией обменного и электростатического взаимодействия электронов, а также с зарядами атомов, так как идеальный электрон имеет силу осциллятора, равную единице. Согласно правилу сумм Томаса-Райха-Куна [5], выполняющегося для идеальных многоэлектронных систем, во внешних полях сумма сил осцилляторов для всех электронов в N -электронной молекуле равна числу электронов N . Последнее означает косвенную связь этой величины с зарядами атомов в молекуле. Принимая во внимание правило сумм и наличие связи энергии граничных электронных состояний с ИСО в выражении (3), логично предположить возможность существования эмпирической зависимости ПИ от ИСО и суммарного заряда ядер молекулярного остова. Наличие зависимостей (3) означает, что подобные закономерности связи интегральных характеристик отражения и энергии ионизации должны выполняться для полициклических органических полупроводников.

В соответствии с изложенным логично предположить существование связи вида

$$E = f(\theta, S), \quad (4)$$

где E — энергетический параметр, характеризующий спектр электронных энергетических состояний квантовой системы, например, потенциал ионизации (эВ); S — параметр, характеризующий электромагнитное взаимодействие частиц, в соответствии с изложенным в качестве S можно использовать заряд Z ; θ — величина, характеризующая результи-

рующий спектр поглощения системы (квантовый континуум электронных состояний).

Введем эмпирические функционалы F , которые построены на множестве энергий всех основных и возбужденных состояний молекул и охватывают весь спектр электронных состояний. Эти функционалы, в свою очередь, выражаются через подмножества функционалов различных физических величин, учитывающих обменное и кулоновское взаимодействие электронов и их электростатическое взаимодействие между собой. Варианты таких подмножеств могут быть построены в виде подмножеств функционалов от интегральных сил осцилляторов $\theta(\epsilon, \lambda)$ и функционалов зарядов $F(Z)$. Эти величины отражают законы числа частиц и сохранения заряда квантовой системы соответственно

$$E = F(\theta, Z). \quad (5)$$

Существенное отличие функционала состоит в том, что значения аргументов его не числа, как у обычной функции, а функции одного или нескольких переменных. Так, ИСО представляет собой функцию двух переменных $\theta(\lambda, \lg \epsilon)$, где λ — длина волны (нм), $\lg \epsilon$ — логарифм молярного показателя поглощения, а сумма зарядов ядер — функция одного переменного $Z(N)$, где N — число протонов. Следует отметить, что мы считаем молекулу замкнутой системой, в которую не входят извне и не выходят наружу электрические заряды. Аргументы θ и Z определяют факторы и процессы, прямо от них не зависящие, т.е. являющиеся их функциями.

Известно, что [5]

$$\theta = \int_{\lambda_0}^{\lambda_k} \lg(\epsilon_\lambda) d\lambda,$$

где λ_0, λ_k — границы спектра, нм; $\lg \epsilon_\lambda$ — логарифм молярного показателя поглощения при определенных длинах волн.

Значение ИСО численно равно площади под кривой спектра, которую определим методом Симпсона.

Предположим, что в рядах молекул близкой структуры изменение энергетического спектра при переходе от одной молекулы к другой можно рассматривать как малое возмущение, и в качестве возмущающего параметра ИСО и эмпирическую функцию от зарядов атомного остова молекул.

Считая функционал E в (5) непрерывной функцией двух переменных, разложим его в ряд по степеням $(\theta - \theta_0)$ и $(Z - Z_0)$ и некоторого остаточного члена

$$E = F(\theta, Z) = f(\theta_0, Z_0) + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial f(\theta_0, Z_0)}{\partial \theta} + \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 f(\theta_0, Z_0)}{\partial \theta^2} + \frac{(\theta - \theta_0)^3}{3!} \cdot \frac{\partial^3 f(\xi_1, Z_0)}{\partial \theta^3} + \frac{Z - Z_0}{1!} \left[\frac{\partial f(\theta_0, Z_0)}{\partial Z} + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial^2 f(\theta_0, Z_0)}{\partial (Z\theta)} + \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^3 f(\xi_2, Z_0)}{\partial (Z\theta^2)} \right] + \frac{(Z - Z_0)^2}{2!} \left[\frac{\partial^2 f(\theta_0, Z_0)}{\partial (Z)^2} + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial^3 f(\xi_3, Z_0)}{\partial (Z^2\theta)} \right] + \frac{(Z - Z_0)^3}{3!} \cdot \frac{\partial^3 f(\theta, \eta_1)}{\partial (Z)^3}, \quad (6)$$

где $\eta_1 = Z_0 + \mu_1(Z - Z_0), 0 < \mu_1 < 1$;

$$\xi_1 = \theta + \mu_2(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_2 < 1;$$

$$\xi_2 = \theta + \mu_3(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_3 < 1;$$

$$\xi_3 = \theta + \mu_4(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_4 < 1.$$

При $n = 2$ формула (6) примет вид:

$$F(\theta, Z) = A_0 + A_1(\theta - \theta_0) + A_2(Z - Z_0) + [A_3(\theta - \theta_0)^2 + A_4(\theta - \theta_0)(Z - Z_0) + A_5(Z - Z_0)^2] + R, \quad (7)$$

где коэффициенты A_0, \dots, A_5 не зависят от θ и Z , а R — остаточный член, структура которого аналогична структуре остаточного члена в формуле Тейлора для сходящегося ряда двух переменных. Полагая $\theta_0 = 0$ и $Z_0 = 0, R_2 \rightarrow 0$ перепишем формулу (7) в виде

$$E = A_0 + A_1\theta + A_2Z + A_3\theta^2 + A_4\theta Z + A_5Z^2. \quad (8)$$

Физический смысл коэффициентов заключается в характеристике возмущения функционала энергетического спектра квантовой системы под влиянием структурных, кулоновских и обменных факторов электронного взаимодействия. Выражение (8) позволяет найти зависимость потенциала ионизации в виде полуэмпирической квадратичной функции двух переменных: ИСО и зарядов ядер молекулярного остова

$$P = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \theta + \alpha_2 \cdot Z + \alpha_3 \theta Z + \alpha_4 \cdot \theta^2 + \alpha_5 \cdot Z^2. \quad (9)$$

Несмотря на полуэмпирический характер зависимости (9) коэффициенты $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ очевидно, имеют физический смысл как характеристики возмущения внешней электронной оболочки. Так, α_0 характеризует тип электронной оболочки; α_1, α_4 — возмущение оболочек под влиянием кулоновских и обменных факторов электронного взаимодействия; α_2, α_5 — возмущение оболочек под влиянием кулоновских факторов взаимодействия электронов с ядрами ядерного остова

Таблица 1. Статистические характеристики двухпараметрической феноменологической модели потенциалов ионизации

Потенциал ионизации									
Соединения	$a_0, \text{эВ}$	$a1, \text{эВ}$	$a2, \text{эВ}$	$a_3, \text{эВ}$	$a4, \text{эВ}$	$a5, \text{эВ}$	R	R ²	S
ПАУ	4,75	0,21	0,003	0,063	0,000	0,001	0,97	0,93	0,08

молекул и распределение ее электростатического потенциала, a_4 характеризует возмущения в результате совместного электростатического и спин-решеточного взаимодействия. Очевидно, что члены, пропорциональные Z и Z^2 , можно интерпретировать через энергию кулоновского взаимодействия точечных зарядов или экранированных систем зарядов, но в данном случае это не имеет значения, так как подход к решению задачи феноменологической и полуэмпирической.

В качестве объектов исследования в данной работе выбраны органические полупроводники (таблица 1), которые представляют собой полициклические углеводороды ароматических соединений рядов пиренов, периленов, бесантенов, антентренов и углеводороды, содержащие от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец.

Электронные спектры некоторых полупроводников (пентафен, тетрацен, гексафен, пентацен, 1, 2-бензперилен, коронен, бисантен, антантрен) регистрировались на спектрофотометре СФ-2000 в химически чистых оптически прозрачных растворах. Спектры органических полупроводников, основанных на сложных полициклических ароматических углеводородах (ПАУ), были выбраны из соответствующих баз данных [6]. Так как растворители, в которых находятся молекулы

ПАУ, воздействуют на электронную оболочку и, следовательно, оказывают влияние на положение максимума и величину коэффициента поглощения, интервал для расчета ИСО был выбран в диапазоне 280–780 нм. Значения ПИ определялись неэмпирическим методом RHF 6-31G** с полной оптимизацией геометрии молекул.

Обсуждение результатов

Коэффициенты зависимости (9) для 58 полициклических углеводородов рассчитывали методом наименьших квадратов [7]. Статистическую обработку спектров поглощения проводили методом многофакторного регрессионного анализа с оценкой множественного коэффициента корреляции R, коэффициента детерминации R², стандартной ошибки S. Данные приводятся в таблице 1.

Таким образом, на основе экспериментальных спектроскопических данных установлены корреляционные зависимости ПИ от ИСО и суммарного заряд ядер молекулярного остова. Достоверность полученных данных подтверждена расчетной оценкой погрешности. В таблице 2 приведены данные о соответствии расчетных и экспериментальных значений ПИ.

Из данных таблицы 2 следует, что для полупроводников, содержащих два и три линейно-аннелированных бензольных

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные ПИ для ПАУ

№	Органические полупроводники	Z	LNZ	ИСО	ПИ (RHF 6-31G**)	ПИ (по зависимости (9))	Абсол. погрешность	Относ. погрешность
Полупроводники, содержащие два и три линейно-аннелированных кольца								
1	1,2-7,8-добензхризен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	444,25	6,95	7,05	0,10	1,44
2	тетрафен(C ₁₈ H ₁₂)	228	5,43	414,35	7,02	6,91	0,11	1,57
3	1,2-7,8-добензантрацен(C ₂₂ H ₁₄)	278	5,63	394,2	7,11	7,06	0,06	0,84
4	1,2-бензтетрафен(C ₂₂ H ₁₄)	278	5,63	493,45	6,86	6,87	0,01	0,15
5	3,4-бензтетрафен(C ₂₂ H ₁₄)	278	5,63	498,5	6,81	6,87	0,06	0,88
6	3,4-8,9-добензтетрафен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	505,5	6,90	6,93	0,03	0,43
7	3,4-бензпентафен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	551,38	6,95	6,85	0,11	1,58

продолжение таблицы...

продолжение таблицы...

8	1,2-5,6-добензтетрафен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	482,75	6,89	6,98	0,09	1,31
9	6,7-бензпентафен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	445	7,13	7,05	0,08	1,12
10	нафт[2',3':3,4]пентафен(C ₃₀ H ₁₈)	378	5,93	650,88	6,80	6,72	0,08	1,18
11	антрацено[2',1':1,2] антрацен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	634,25	6,59	6,70	0,11	1,67
12	2,3-бензпицен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	518,25	6,88	6,91	0,03	0,44
13	2,3-8,9-добензпицен(C ₃₀ H ₁₈)	378	5,93	577,75	6,88	6,86	0,02	0,29
Средняя абсолютная (относительная) ошибка 0,06 эВ (0,99 %)								
Полупроводники, содержащие четыре линейно-аннелированных кольца								
14	1,2-бензтетрацен(C ₂₂ H ₁₄)	276	5,62	726,25	6,53	6,50	0,04	0,61
15	1,2-3,4-добензтетрацен(C ₂₆ H ₁₆)	326	5,79	661,75	6,63	6,65	0,02	0,30
16	1,2-7,8-добензтетрацен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	669,63	6,65	6,64	0,01	0,15
17	1,2-9,10-добензтетрацен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	685,2	6,65	6,61	0,04	0,60
1	1,2-3,4-7,8-трибензтетрацен(C ₃₀ H ₁₈)	378	5,93	631,98	6,82	6,76	0,07	1,03
19	1,2-3,4-7,8-9,10-тетрабензтетрацен(C ₃₄ H ₂₀)	428	6,06	675,5	6,74	6,72	0,02	0,30
20	гексафен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	783,23	6,60	6,46	0,14	2,12
21	7,8-бензгептафен(C ₃₄ H ₂₀)	428	6,06	740,85	6,70	6,60	0,11	1,64
Средняя абсолютная (относительная) ошибка 0,06 эВ (0,84 %)								
Полупроводники, содержащие пять линейно-аннелированных кольца								
22	Пентацен(C ₂₂ H ₁₄)	278	5,63	¹ 104,00	6,07	6,05	0,02	0,33
23	1,2-бензпентацен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	¹ 045,35	6,18	6,10	0,07	1,13
Средняя абсолютная (относительная) ошибка 0,05 эВ (0,73 %)								
Полупроводники ряда периленов								
24	перилен(C ₂₀ H ₁₂)	252	5,53	586,13	6,57	6,68	0,11	1,67
25	1,2-бензперилен(C ₂₄ H ₁₄)	302	5,71	926,38	6,22	6,24	0,03	0,48
26	2,3-бензперилен(C ₂₄ H ₁₄)	302	5,71	687,5	6,59	6,58	0,00	0,00
27	1,2-7,8-добензперилен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	¹ 093,03	6,02	6,05	0,03	0,50
28	1,2-10,11-добензперилен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	998,53	6,23	6,16	0,07	1,12
29	1,2-11,12-добензперилен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	¹ 104,90	5,98	6,03	0,06	1,00
30	2,3-8,9-добензперилен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	703,25	6,59	6,60	0,02	0,30
31	2,3-10,11-добензперилен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	723,73	6,60	6,57	0,03	0,45
32	1,12-бензперилен(C ₂₂ H ₁₂)	276	5,62	515,25	6,77	6,83	0,06	0,89
33	1,12-2,3-добензперилен(C ₂₆ H ₁₆)	328	5,79	562	6,81	6,83	0,02	0,29
34	1,12-2,3-8,9-трибензперилен(C ₃₀ H ₁₈)	378	5,93	632,78	6,68	6,75	0,08	1,20
35	1,12-2,3-10,11-трибензперилен(C ₃₀ H ₁₈)	378	5,93	561,13	6,88	6,89	0,02	0,29
36	1,12-0-фениленперилен(C ₂₆ H ₁₄)	326	5,79	629,13	6,57	6,70	0,13	1,98
37	антрацено[1',4':1,12] перилен(C ₃₀ H ₁₆)	376	5,93	821,13	6,39	6,43	0,04	0,63
38	1,2-3,4-5,6-10,11-тетрабензантрацен(C ₃₆ H ₁₈)	450	6,11	632,75	6,86	6,82	0,04	0,58
39	коронен(C ₂₄ H ₁₂)	300	5,70	526,98	6,97	6,85	0,12	1,72
40	1,2-бензкоронен(C ₂₈ H ₁₄)	350	5,86	624,25	6,76	6,74	0,02	0,30
41	1,2-3,4-5,6-трибензкоронен(C ₃₆ H ₂₀)	452	6,11	759,18	6,66	6,58	0,08	1,20

продолжение таблицы...

42	нафт[2',3':1,2]коронен(C ₃₂ H ₁₆)	400	5,99	699,45	6,56	6,65	0,09	1,37
Средняя абсолютная (относительная) ошибка 0,06 эВ (0,84 %)								
Полупроводники ряда бисантена								
43	1,14-бензбисантен(C ₃₀ H ₁₄)	374	5,92	1 023,65	6,01	6,13	0,13	2,16
44	3,4-11,12-добензбисантен(C ₃₄ H ₁₆)	424	6,05	790,5	6,47	6,51	0,04	0,62
45	3,4-10,11-добензбисантен(C ₃₄ H ₂₀)	428	6,06	899,58	6,26	6,33	0,07	1,12
Средняя абсолютная (относительная) ошибка 0,08 эВ (1,30 %)								
Полупроводники ряда пирена								
46	3,4-9,10-добензпирен(C ₂₄ H ₁₄)	302	5,71	640,13	6,57	6,66	0,09	1,37
47	нафт[2',3':3,4]пирен(C ₂₄ H ₁₄)	302	5,71	782,38	6,39	6,44	0,05	0,78
48	1,2-бензнафт[2'',3''':4,5] пирен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	728,38	6,51	6,56	0,06	0,92
49	3,4-бензнафт[2'',3''':8,9] пирен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	925,25	6,12	6,26	0,14	2,29
50	3,4-бензнафт[2'',3''':9,10] пирен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	882,5	6,41	6,32	0,09	1,40
51	динафт[2',3':1,2]-[2'',3''':4,5] пирен(C ₃₂ H ₁₈)	402	6,00	794,88	6,57	6,49	0,09	1,37
52	1,14-4,5-добензпентацен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	733,48	6,66	6,55	0,11	1,65
53	нафт[1',7':2,14]пентацен(C ₂₈ H ₁₆)	352	5,86	1 054,80	6,15	6,09	0,06	0,98
54	1,2-бензфенантreno[9',10':6,7] пирен(C ₃₂ H ₁₈)	402	6,00	718,25	6,73	6,62	0,11	1,63
55	5,6-15,16-добензгексацен(C ₃₂ H ₂₀)	404	6,00	724,75	6,65	6,61	0,04	0,60
56	6,7-16,17-добензгептацен(C ₃₆ H ₂₀)	452	6,11	690,3	6,65	6,71	0,06	0,90
57	7,8-17,18-добензоктацен(C ₄₀ H ₂₂)	502	6,22	725,53	6,57	6,68	0,11	1,67
Средняя абсолютная (относительная) ошибка 0,08 эВ (1,30 %)								
Полупроводники ряда антантрена								
58	2,3-4,5-добензантантрен(C ₃₀ H ₁₈)	378	5,93	1 065,25	6,11	6,08	0,03	0,49

кольца, средняя абсолютная (относительная) ошибка не превышает 0,06 эВ (0,99 %). Для полупроводников, содержащих четыре линейно-аннеллированных бензольных кольца, средняя абсолютная (относительная) ошибка составляет 0,06 эВ (0,84 %). Полупроводники, содержащие пять линейно-аннеллированных бензольных колец, имеют среднюю абсолютную (относительную) ошибку 0,05 эВ (0,73 %). Полупроводники ряда пирелена, бисантена, пирена и антантрена показывают средние абсолютные (относительные) ошибки 0,06 эВ (0,84 %), 0,08 эВ (1,30 %), 0,08 эВ (1,30 %) и 0,03 эВ (0,49 %) соответственно. Для характеристики адекватности двухпараметрической модели был вычислен коэффициент множественной корреляции $R \approx 0,97$, указывающий на корректность применяемого подхода.

Заключение

В результате исследований был разработан способ определения ПИ полициклических органических полупроводников по интегральным силам осциллятора и суммарного заряд ядер молекулярного остова. Предлагаемый подход апробирован на полициклических органических полупроводниках. Результат подтверждают квантовые расчеты и статистическая обработка экспериментальных данных. Практическая значимость предлагаемого подхода заключается в использовании возможности определения ПИ молекул с числом атомов углерода до 40, а также предложенный способ можно применять и к химически не стабильным органическим соединениям.

Список литературы

1. Dreizler R.M., Gross E.K.V. Density Functional Theory. Berlin: Springer, 1990. 304 s.
2. Mallocci G., Cappellini G., Mulas G., Mattoni A. Electronic and Optical Properties of families of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: a Systematic (Time-Dependent) Density Functional Theory Study // Chemical Physics. 2011. 384. S. 19–27.
3. Доломатов М.Ю., Мукаева Г.Р. Способ определения потенциалов ионизации и сродства к электрону атомов и молекул методом электронной спектроскопии // Прикладная спектроскопия. 1992. Т. 56. № 4. С. 570–574.
4. Dolomatov M.Y., Shulyakovskaya D.O., Mukaeva G.R., Jarmuhametova G.U., Latypov K.F. Simple Characteristics Estimation Methods of Material and Molecule Electronic Structure // Journal of Materials Science and Engineering. 2012. В 2 (4). S. 261–268.
5. Юдин Г.Л. Сила осциллятора // Физическая энциклопедия. М.: Большая российская энциклопедия, 1994. Т. 4. С. 495.
6. Клар Э. Полициклические углеводороды: пер. с англ. М., 1971. Т. 1, 2. 910 с.
7. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 2000. 630 с.

References

1. Dreizler R.M., Gross E.K.V. Density Functional Theory. Berlin: Springer, 1990. 304 s.
2. Mallocci G., Cappellini G., Mulas G., Mattoni A. Electronic and Optical Properties of families of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: a Systematic (Time-Dependent) Density Functional Theory Study // Chemical Physics. 2011. 384. S. 19–27.
3. Dolomatov M.Ju., Mukaeva G.R. Sposob opredelenija potencialov ionizacii i srodstva k jelektronu atomov i molekul metodom jelektronnoj spektroskopii // Prikladnaja spektroskopija. 1992. Т. 56. № 4. P. 570–574.
4. Dolomatov M.Y., Shulyakovskaya D.O., Mukaeva G.R., Jarmuhametova G.U., Latypov K.F. Simple Characteristics Estimation Methods of Material and Molecule Electronic Structure // Journal of Materials Science and Engineering. 2012. В 2(4). S. 261–268.
5. Judin G.L. Sila oscilljatora // Fizicheskaja jenciklopedija. М.: Bol'shaja rossijskaja jenciklopedija, 1994. Т. 4. S. 495.
6. Klar Je. Policiklicheskie uglevodorody: per. s angl. М., 1971. Т. 1, 2. 910 s.
7. Bahvalov N.S. Chislennye metody. М.: Nauka, 2000. 630 s.

ОБ АВТОРАХ

Абдрахманов Вали Хызырович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет»,
e-mail: awali@inbox.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Алексеев Виктор Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
e-mail: vik120212@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Андрианов Артур Валерьевич

инженер-конструктор, Акционерное общество «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», e-mail: otde124d@nkbmius.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Артюшенко Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет»,
e-mail: artuschenko@mail.ru, г. Королев, Российская Федерация

Важаев Константин Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: vazhdaevk@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Воловач Владимир Иванович

доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Информационный и электронный сервис», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса»,
e-mail: ssunrise@mail.ru, г. Тольятти, Российская Федерация

Воронков Григорий Сергеевич

старший преподаватель кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
e-mail: Voronkov.GS@net.ugatu.su, г. Уфа, Российская Федерация

Диденко Евгений Евгеньевич

аспирант кафедры электропривода, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», e-mail: didenko_ee@mail.ru, г. Липецк, Российская Федерация

Доломатов Михаил Юрьевич

доктор химических наук, профессор кафедры «Управление и сервис в технических системах», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
e-mail: dolomatov@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Зайнуллин Айрат Радикович

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

Зикий Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», 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: otde124d@nkbmius.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Ковалева Элла Александровна

кандидат химических наук, доцент кафедры «Математика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: kovaleva-ugntu@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Конев Александр Александрович

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: KonesevSG@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Конесев Сергей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: KonesevSG@yandex.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

Кузнецов Игорь Васильевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: zkn2002@inbox.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Мещеряков Виктор Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», e-mail: didenko_ee@mail.ru, г. Липецк, Российская Федерация

Мизгирева Вероника Вячеславовна

студент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: nikamiz95@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Мулюков Айдар Рифович

магистрант кафедры «Управление и сервис в технических системах» Института экономики и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: rin.yarullin@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Мухамадиев Айдар Асхатович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
e-mail: aidar80@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Мухаметшин Андрей Валерьевич

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
e-mail: mukhametshinav@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Николаев Антон Владимирович

аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
e-mail: paskalnew1@ Rambler.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Паймурзина Наталья Халитовна

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

Пентегов Игорь Владимирович

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела электротермии, Институт электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины,
e-mail: elmag@paton.kiev.ua, г. Киев, Украина

Петрова Ирина Юрьевна

доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и моделирования, Государственное автономное образовательное учреждение Астраханской области высшего образования «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет», e-mail: cad@ausu.ru, г. Астрахань, Российская Федерация

Плёткин Антон Павлович

кандидат технических наук, ассистент кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»,
e-mail: pljonkin@mail.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

Рымар Сергей Владимирович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела электротермии, Институт электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, e-mail: cantata@voliacable.com, г. Киев, Украина

Салихов Ренат Баязитович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: salikhovrb@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

Ураксеев Марат Абдуллович

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
e-mail: uma1941@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Фаррахов Рузиль Галиевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»,
e-mail: frg1982@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Федосов Артем Васильевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
e-mail: pbot@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Шабанов Виталий Алексеевич

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Щербакова Эвелина Дмитриевна

студент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
e-mail: ewe.lina@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Юсупов Рамис Зирякович

аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
e-mail: YusupovRZ@bk.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Янтирякова Алина Робертовна

магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: pbot@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Яруллин Ринат Бариевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Управление и сервис в технических системах» Института экономики и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: rin.yarullin@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

ABOUT AUTHORS

Abdrakhmanov Vali Kh.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: awali@inbox.ru, Ufa, Russian Federation

Alekseev Viktor Yu.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: vik120212@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Andrianov Artur V.

Design Engineer, Joint Stock Company «Taganrog Scientific-Research Institute of Communication», e-mail: otel24d@nkbmius.ru, Taganrog, Russian Federation

Artyushenko Vladimir M.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Information Technology and Control Systems Chair, State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow Region «University of Technology», e-mail: artuschenko@mail.ru, Korolev, Russian Federation

Didenko Evgeny E.

Post-Graduate Student of Electric Drive Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lipetsk State Technical University», e-mail: didenko_ee@mail.ru, Lipetsk, Russian Federation

Dolomatov Michail Yu.

Dr. Sci. Chem., Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: dolomatov@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Farrakhov Ruzil G.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: frg1982@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Fedosov Artem V.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: pbot@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Konesev Sergey G.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: KonesevSG@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Konev Aleksandr A.

Student of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: KonesevSG@yandex.ru, Ufa, 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

Kovaleva Ella A.

Cand. Sci. Chem., Assistant Professor of Mathematics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: kovaleva-ugntu@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Kuznetsov Igor V.

Dr. Sci. Tech., Professor of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: zkn2002@inbox.ru, Ufa, Russian Federation

Mecherykov Viktor N.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Electric Drive Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lipetsk State Technical University»,
e-mail: didenko_ee@mail.ru, Lipetsk, Russian Federation

Mizgireva Veronika V.

Student of Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University»,
e-mail: nikamiz95@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Muhametshin Andrey V.

Post-Graduate Student of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: mukhametshinav@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Mukhamadiev Aydar A.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: aidar80@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Muliukov Aydar R.

Master of Management and Service in the Technical Systems Chair, Institute of Economics and Service, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: rin.yarullin@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Nikolaev Anton V.

Post-Graduate Student of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University»,
e-mail: paskalnew1@rambler.ru, Ufa, Russian Federation

Paymurzina Natalia Kh.

Post-Graduate Student of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: paimurzina@inbox.ru, Ufa, Russian Federation

Pentegov Igor V.

Dr. Sci. Tech., Professor, Leading Researcher of Electroheat Department, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: elmag@paton.kiev.ua, Kiev, Ukraine

Petrova Irina Yu.

Dr. Sci. Tech., Professor of Computer-Aided Design and Simulation Chair, State Autonomous Educational Institution of Higher Education Astrakhan Region «State University of Architecture and Civil Engineering», e-mail: cad@aucu.ru, Astrakhan, Russian Federation

Pljonkin Anton P.

Cand. Sci. Tech., Assistant of Information Security of Telecommunication Systems Chair, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: pljonkin@mail.ru, Taganrog, Russian Federation.

Rymar Sergey V.

Dr. Sci. Tech., Senior Researcher, Leading Researcher Electroheat Department, the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,
e-mail: cantata@voliacable.com, Kiev, Ukraine

Salikhov Renat B.

Dr. Sci. Phys.-Math., Professor, Head of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: salikhovrb@ya.ru, Ufa, Russian Federation

Shabanov Vitaliy A.

Cand. Sci. Tech., Professor, Head of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: ShabanovVA1@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Shcherbakova Evelina D.

Student of Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University»,
e-mail: ewe.lina@yandex.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

Urakseev Marat A.

Dr. Sci. Tech., Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University»,
e-mail: uma1941@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Vazhdaev Konstantin V.

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Assistant Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: vazhdaevk@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Volovach Vladimir I.

Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Information and Electronic Service Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga Region State University of Service», e-mail: ssunrise@mail.ru, Togliatti, Russian Federation

Voronkov Grigoriy S.

Senior Lecturer of Telecommunication Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University»,
e-mail: Voronkov.GS@net.ugatu.su, Ufa, Russian Federation

Yantiryakova Alina R.

Master Student of Industrial Safety and Labor Protection Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University»,
e-mail: pbot@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Yarullin Rinat B.

Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Institute of Economics and Service, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: rin.yarullin@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

Yusupov Ramis Z.

Post-Graduate Student of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: YusupovRZ@bk.ru, Ufa, Russian Federation

Zainullin Ayrat R.

Post-Graduate Student of Telecommunication systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University»,
e-mail: zainullin.a@list.ru, Ufa, Russian Federation

Zikiy Anatoliy N.

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher, Associate Professor of Information Security of Telecommunication Systems Chair, 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 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.



Одиннадцатая межрегиональная специализированная выставка

ГАЗ. НЕФТЬ. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – КРАЙНЕМУ СЕВЕРУ

22–23 марта 2017 года

г. Новый Уренгой, Деловой центр «ЯМАЛ», ул. Юбилейная, 5

Выставка проводится в рамках

Новоуренгойского газового форума «Газ. Нефть. Новые технологии – Крайнему Северу»

Организатор форума:

Администрация г. Новый Уренгой

Оператор выставки:

ООО «Выставочная компания Сибэкспосервис»

Выставка «ГАЗ. НЕФТЬ. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – КРАЙНЕМУ СЕВЕРУ» одним емким названием выражает потребности региона, профилирующей отраслью которого считается топливная промышленность. Всего на Ямале 79 месторождений, и каждое из них нуждается в современном оборудовании, технологиях. Немаловажную роль играют инвестиционные программы и проекты. Все это отражают экспозиции, которые предлагает выставка газ, проводимая как межрегиональное специализированное мероприятие. Без передовых идей, демонстрируемых на выставке, невозможно развитие промышленных отраслей в перспективе.

Выставка «ГАЗ. НЕФТЬ. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – КРАЙНЕМУ СЕВЕРУ» охватывает все базовые разделы, связанные с ресурсами, их добычей и переработкой. В программе выставки предусмотрены:

- Экспозиции. Темы разделов отличаются разнообразием, но все они подчинены перспективным идеям по разработке и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Поэтому в приоритете презентации методов и оборудования, IT-решений и технологий, систем автоматизации и контроля. Все они ориентированы на добывающую отрасль и предлагают только лучшие перспективные решения.
- Деловая программа. Перед добывающими предприятиями ставятся множественные задачи – от повышения эффективности и продуктивности добычи до решения проблем импортозамещения. Тематические конференции, круглые столы и семинары находят оптимальные пути развития по всем направлениям.
- Сотрудничество и развитие. Ямал, благодаря активной добыче полезных ископаемых и газа, стал опорной точкой многих производственных процессов. Добываемые здесь ресурсы необходимы для работы большинства регионов РФ. Прямое общение на выставке между заинтересованными сторонами способствует заключению договоров и контрактов.

В прошлом году выставка собрала около 80 предприятий. Среди постоянных участников: ООО Завод «Газпромаш», ООО «Промснабкомплект», ООО «Униор Профешнл Тулз», «Воронежский механический завод» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. Хруничева», ОАО «ГМС Нефтемаш», ЗАО «ПГО «Тюменьгеология», ООО «Стэлс», ООО «Яргазарматура», ООО «КРОНЕ Инжиниринг», ООО НПФ «Политехника», ГК «РИЗУР», ООО «ВЕГА ИНСТРУМЕНТС», ООО ТД «ВЭЛАН», ООО «ПРИВОДЫ АУМА», Представительство общества «РОЗЕ Системтехник ГмБХ», ООО «Торговый дом «Арматурный завод», ЗАО «ТРАСТИНТЕК», ЗАО «ДС Контролз», ООО НПО «Фундаментстройаркос». Среди впервые посетивших Новый Уренгой: ООО «Таурис Энерджи», ООО «НМЗ-Компрессорное оборудование», ЗАО НПП СЭТ, РМ Рейл Рузхиммаш, ООО «Компас-Р», ООО «ВИП Измерение», ООО «РосСервис», ООО «УРАЛСПЕЦАРМАТУРА», ООО «Эрис КИП», ООО «МЗЛ-инжиниринг», ООО «Арматурный Завод», ООО «Когалымский завод химреагентов», ООО «РИАТ», ГК UNIVERSUM и др.

Среди посетителей присутствовали представители: Администрации Тазовского района ЯНАО, ООО «Газпром добыча Надым», ООО «Газпром переработка», ООО «Газпром бурение», АО «Роспан интернейшнл», ОАО «ТомскНИПИнефть», ООО «Уренгойдорстрой», СК ПетроАльянс, УФ ПАО «ВНИПИгаздобыча», ОАО «НК «ЯНГпур», ООО «Арктикгаз», Научно-исследовательский центр экологической безопасности, ЗАО «Нефтех», ООО «Бергнен» (г. Екатеринбург), ООО «РосЭнергоХолдинг» (г. Пермь), ООО «УралСоль» (г. Березники), НПП ЗАО «FST», ОАО «Сейсмотехника (г. Гомель, Беларусь) и других предприятий.

В рамках выставки проходили конференции, семинары, презентации, проводился конкурс на золотую медаль «Полярная сова».

Предприниматели, которые хотят заявить о себе и развиваться, крупные компании, желающие подтвердить свой высокий статус, и все, кто хочет быть в центре событий топливно-энергетического комплекса региона, приглашаем Вас принять участие в выставке!

Будем рады видеть вас среди участников и посетителей выставки!

Руководитель выставочного проекта – Колесникова Елена

Телефон: (383) 335-63-50

E-mail: Elena.K@ses.net.ru

<http://ses.net.ru>