

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

№ 2, т. 12, 2016

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

Учредитель

Министерство образования и науки РФ

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

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных 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 университет экономики и сервиса» (Россия, г. Уфа)



Зам. главного редактора:

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

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



Члены редакционной коллегии:

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

ГБОУ ВО МО «Технологический университет» (Россия, г. Москва)



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

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



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

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



В.Г. Крымский – д-р техн. наук, проф.

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



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

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



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

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



Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф.

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



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

национального технического университета (Белоруссия, г. Минск)



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

«Уфимский государственный

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



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

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



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

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



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

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



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

Черниговского государственного технологического университета (Украина, г. Чернигов)



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

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



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

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



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

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



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

Технического университета (Болгария, г. Варна)



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

сотр. Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины

(Украина, г. Киев)



Б. Брудник – д-р техн. наук, вед. научн. сотр. Тель-Авивского университета (Израиль, г. Тель-Авив)



Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.С. Некрасова

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

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

© Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2016

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

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 23.05.2016 г. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,01. Тираж 1000 экз. Заказ № 134.

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

Материалы приводятся в авторской редакции.

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

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND SERVICE



№ 2, v. 12, 2016

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

Founder:

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

The journal is included in the «List of 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 university of economics and service (Russia, Ufa)



Deputy editor-in-chief:

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



Members of an editorial board:

V.M. Artyushenko – Dr. Sci.Tech., prof. of SBEI HE MR University of technology (Russia, Moscow)



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

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

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

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

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

© Ufa State University of Economics and Service, 2016

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

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

Signed for printing 23.05.2016 r. Format 60×84 1/8. Offset printing. 12,01 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order № 134.

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>Козловский В. Н., Петровский С. В., Новикова А. П.</i> Электротехнический и информационно-диагностический комплекс оценки параметров функционирования автономного транспортного объекта	5
<i>Вавилов В. Е., Бекузин В. И., Айгузина В. В.</i> Сравнение различных методов снижения влияния высших гармоник для магнитоэлектрического генератора.....	11
<i>Шабанов В. А., Юсупов Р. З., Алексеев В. Ю.</i> Устройство адаптивного автоматического включения резерва на нефтеперекачивающих станциях.....	16
<i>Авдзейко В. И., Карнышев В. И., Мещеряков Р. В.</i> Прогнозирование направлений развития силовой электроники на основе временных рядов по данным Международной патентной классификации.....	23
<i>Карабельская И. В., Абызбаев И. И., Ахметов И. В.</i> Обобщенная формула Грина интегрального представления решения.....	29
<i>Решетняк С. Н.</i> Перспективы применения пространственно-векторной модуляции в системе электроприводов пластинчатого питателя.....	35
<i>Мельничук О. В., Фетисов В. С.</i> Особенности заряда и разряда литиевых аккумуляторных батарей и современные технические средства управления этими процессами.....	41
<i>Шапиро С. В., Саенко А. Г.</i> Теория озонатора с осесимметричными высоковольтными электродами.....	49

Информационные комплексы и системы

<i>Павлов С. В., Павлов А. С., Сайдуганов А. Р., Кунаккужина Н. Ф.</i> Информационно-вычислительная система построения графов инженерных сетей на основе картографической информации.....	54
<i>Павлова А. С.</i> Стандартизация технологических объектов многосвязного регулирования.....	60
<i>Хакимов Д. В., Киселев С. К.</i> Оптимизация структуры комплексов бортового оборудования летательных аппаратов на основе оптимизации функциональной структуры на ранних стадиях проектирования.....	65

Метрология и информационно-измерительные устройства

<i>Важдаев К. В., Абдрахманов В. Х., Салихов Р. Б.</i> Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления.....	70
<i>Мухамадиев А. А., Фаррахов Р. Г.</i> Калибровка акустооптического монохроматора с электронным управлением.....	75
<i>Ураксеев М. А., Левина Т. М., Бажанова Т. В.</i> Алгоритм работы цифрового устройства интегрирования в измерительном комплексе контроля электрического тока и магнитного поля.....	80
<i>Тимофеев А. О., Ясоев В. Х.</i> Анализ корреляции между скважинной динамограммой и энергией, потребляемой электродвигателем станка-качалки.....	85

Наноэлектроника и квантовые информационные системы

<i>Латыпов К. Ф., Доломатов М. Ю.</i> Полуэмпирическая оценка энергии потенциалов ионизации металлов по интегральным коэффициентам отражения электромагнитного излучения.....	90
---	----

Об авторах

CONTENT

Electrical facilities and systems

<i>Kozlovskiy V. N., Petrovskiy S. V., Novikova A. P.</i> Electrotechnical and information-diagnostic complex for evaluation of parameters of functioning of autonomous transport object	5
<i>Vavilov V. Ye., Bekuzin V. I., Aiguzina V. V.</i> Comparison of different methods reduce the impact of higher harmonics for magnetoelectric generator.....	11
<i>Shabanov V. A., Yusupov R. Z., Alekseev V. Yu.</i> Device for adaptive automatic to reserve source on oil pumping stations.....	16
<i>Avdzejko V. I., Karnyshev V. I., Meshcheryakov R. V.</i> Forecasting of power electronics development directions based on International patent classification time series.....	23
<i>Karabelskaya I. V., Abyzbaev I. I., Akhmetov I. V.</i> Generalized Green's formula integral representation for solution.....	29
<i>Reshetnyak S. N.</i> The prospects for application of space vector modulation in the motor drive system of the feeder plate.....	35
<i>Melnichuk O. V., Fetisov V. S.</i> Some features of charging and discharging of lithium rechargeable batteries and corresponding up-to-date technologies of control.....	41
<i>Shapiro S. V., Saenko A. G.</i> Theory ozonator with axially symmetrical high-voltage electrodes.....	49

Data processing facilities and systems

<i>Pavlov S. V., Pavlov A. S., Sayduganov A. R., Kunakkuzhina N. F.</i> Information-computation system for engineering networks graph development using cartographic information.....	54
<i>Pavlova A. S.</i> Standardization of technological objects of the multicoupling regulation.....	60
<i>Khakimov D. V., Kiselev S. K.</i> Structure optimization the onboard equipment of the aircraft based on the optimization of the functional structure early in the design.....	65

Metrology and information-measuring devices

<i>Vazhdaev K. V., Abdrakhmanov V. Kh., Salikhov R. B.</i> Intelligent system of living areas on the basis of information-measuring control systems.....	70
<i>Mukhamadiev A. A., Farrakhov R. G.</i> Calibration of the acousto-optic monochromator with electronic control.....	75
<i>Urakseev M. A., Levina T. M., Bazhanova T. V.</i> Algorithm of the digital integrating device in the measuring system for control of the electric current and magnetic field.....	80
<i>Timofeev A. O., Yasoveev V. Kh.</i> An analysis of the correlation between the downhole dynamometer card and the energy consumed by the motor of the pumping unit.....	85

Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Latypov K. F., Dolomatov M. Yu.</i> Semiempirical assessment energy metals ionization potentials on integral coefficient of reflection of electromagnetic radiation.....	90
---	----

About the authors



Козловский В. Н.
Kozlovskiy V. N.

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Теоретическая и общая
электротехника»,
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический
университет»,
г. Самара, Российская Федерация



Петровский С. В.
Petrovskiy S. V.

ведущий инженер кафедры
«Электрические станции»,
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический
университет»,
г. Самара, Российская Федерация



Новикова А. П.
Novikova A. P.

ассистент кафедры «Теоретическая
и общая электротехника»,
Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования,
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический
университет»,
г. Самара, Российская Федерация

УДК 629.331

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ И ИНФОРМАЦИОННО-ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ОБЪЕКТА

Представленная работа посвящена актуальной в настоящее время проблеме, связанной с развитием интеллектуальных электротехнических и информационных комплексов обеспечения эффективности эксплуатации автотранспортных средств. В статье представлены результаты разработки концепции и определяющих ее моделей по оценке параметров функционирования системы зажигания электрооборудования автомобилей. Идея работы состоит в создании бортовой электротехнической интеллектуальной системы определения параметров функционирования системы зажигания в установленных границах с точки зрения обеспечения требуемой электромагнитной совместимости.

Наличие микропроцессорных систем и интеллектуальных датчиков внутри системы управления двигателем внутреннего сгорания, в том числе в системе зажигания и внутри других устройств современных автомобилей, создаёт благоприятную среду для построения интеллектуально-информационных диагностических систем на их основе.

Функционал интеллектуально-измерительной диагностической системы состоит в выработке экспертной оценки, на основе которой принимается решение выполнения действия по изменению уровня электромагнитного возмущения, причем действие обеспечивается для достижения изначально поставленной цели (выработка управления). Системой прогнозируется значение параметра результата действия, которая сопоставляется с реальными рабочими параметрами, тем самым образуется обратная связь для корректировки экспертной оценки или управления.

Диагностическая система, разработанная в ходе данной работы, представляет собой демонстрационный прототип, показывающий целесообразность и реализуемость предложенного подхода к контролю над соблюдением требований по электромагнитной совместимости электрооборудования автомобиля.

В настоящем исследовании диагностические данные обрабатываются с помощью подхода, основанного на алгоритмах классификации, осуществляющихся программой ВЕКА для интеллектуального анализа данных (версии 3.6.8.), и с помощью вычислительного эксперимента, основанного на методе опорных векторов, реализованного в ENCOG Workbench (версия 3.1).

Ключевые слова: качество, надежность, автомобиль, электрооборудование, система зажигания, электротехнический информационно-диагностический комплекс.

ELECTROTECHNICAL AND INFORMATION-DIAGNOSTIC COMPLEX FOR EVALUATION OF PARAMETERS OF FUNCTIONING OF AUTONOMOUS TRANSPORT OBJECT

The present work is devoted to actual, at the present time, the problems associated with the development of intelligent electrical and information systems the operational efficiency of vehicles. The article presents the results of

concept development and defining of its models in the estimation of parameters of functioning of the ignition system of the electrical cars. The idea is to create intelligent on-Board electrical system of determining the parameters of functioning of the ignition system within the set boundaries from the point of view of providing the required electromagnetic compatibility.

The presence of microprocessor systems and smart sensors inside of the control system of an internal combustion engine, including the ignition system and other devices inside a modern car, creates a favourable environment for building intelligent information diagnostic systems based on them.

The functionality of intellectually-measuring diagnostic system is to provide expert assessment on the basis of which the decision to change the level of electromagnetic disturbances, and works to achieve their original goals (output control). The predicted system parameter value of the result of the actions that are mapped to real operating parameters. Thus is formed a feedback for correction of the expert assessment or management.

Diagnostic system developed during this work represents a demonstration prototype showing the feasibility and feasibility of the proposed approach to monitoring compliance with requirements for electromagnetic compatibility of electrical equipment of the car.

In the present study, the diagnostic data are handled by using approaches based on classification algorithms, carried out the program of the CENTURY for mining (version 3.6.8.), and with the help of computational experiment using a support vector machine, implemented in ENCOG Workbench (version 3.1).

Key words: quality, reliability, car, electrical equipment, ignition system, electrical information and diagnostic complex.

Анализ тенденций развития комплекса электрооборудования современных автотранспортных средств показывает, что требования к качеству функционирования сложных технических устройств, составляющих его элементную базу, в значительной степени растут, при этом все более актуальной становится задача обеспечения требуемого уровня электромагнитной совместимости в единой технической среде автомобиля с повышением уровня соответствующей безопасности для человека и окружающей среды [1, 2].

Наиболее существенный вклад в генерирование широкополосных электромагнитных помех (ЭМП) вносит система зажигания, именно поэтому разработка и внедрение системы диагностики отклонений в работе системы зажигания является важной научно-технической задачей [3, 4, 5].

Сегодня качественную диагностику системы зажигания с точки зрения определения параметров ЭМП, а также анализ изменения соответствующих показателей в динамике можно провести только в специализированных технических центрах. К сожалению, предприятия фирменного автосервиса зачастую обладают соответствующими компетенциями, и далеко не на всех из них есть необходимое измерительное оборудование.

С другой стороны, в настоящее время благодаря развитию электротехнических и электронных систем управления на автомобильном транспорте появляются возможности создания бортовых систем по проверке параметров электромагнитной совместимости (ЭМС). Функционирование бортовых диагностических систем, осуществляющих проверку ЭМС, может базироваться на математических моделях, переведенных в программные коды контроллера электронной системы управления двигателем, что позволяет повысить надёжность и быстродействие диагностических процедур [1].

Для постановки задачи по повышению надёжности и быстродействия диагностики системы зажигания необходимо разработать концептуальную модель, а также математическую и имитационные модели, реализующие исследуемые процессы, провести их экспериментальные исследования на различных частотах для определения уровня электромагнитных помех.

Наличие микропроцессорных систем и интеллектуальных датчиков внутри системы управления двигателя внутреннего сгорания (ДВС), в том числе в системе зажигания и внутри других устройств современных автомобилей, создаёт благоприятную среду



Рисунок 1. Структурная схема интеллектуальной системы диагностики системы зажигания

для построения интеллектуально-информационных диагностических систем (ИИС).

Именно поэтому представленная работа сфокусирована на разработке ИИС для диагностики уровня ЭМП от систем зажигания. На рисунке 1 представлена структурная схема разрабатываемой ИИС.

Функционал интеллектуально-измерительной диагностической системы состоит в выработке экспертной оценки, на основе которой принимается решение к действию по изменению уровня электромагнитного возмущения (ЭМВ), причем действие обеспечивается для достижения поставленной изначальной цели (выработка управления). Системой прогнозируется значение параметра результата действия, которые сопоставляются с реальными рабочими параметрами, тем самым образуется обратная связь для корректировки экспертной оценки или управления [6].

Основным блоком ИИС (рисунок 1) является бортовая система контроля (БСК), которая на основании текущих сведений об окружающей среде, например, по уровню ЭМП и другим параметрам объекта управления, осуществляет экспертную оценку. Полученная оценка преобразуется ИИС в физический сигнал, который поступает на исполнительные устройства. Объект управления, получая сигнал от исполнительных устройств, осуществляет требуемое действие, результаты которого поступают в БСК по цепи обратной связи, где они сравниваются с прогнозируемыми результатами. Если поставленная цель достигается, то управление подкрепляется динамической экспертной системой; в противном случае происходит коррекция управления.

Таким образом, БСК представляет собой комплексное образование, способное оценивать состояние объекта измерения и среды, сопоставлять параметры желаемого и реального результатов действия, принимать решение и вырабатывать в соответствии с ним управление, способствующее достижению поставленной цели. Для этого БСК должна обладать запасом знаний, хранящихся в базе данных и быть ассоциируемой с ИИС, как показано на рисунке 1.

Необходимо отметить, что этапы создания интеллектуальных систем не являются четко очерченными и подробно регламентированными, поэтому между этими этапами трудно провести временную и содержательную границу.

Диагностическая ИИС, разработанная в ходе данной работы, представляет собой демонстрационный прототип, показывающий целесообразность и реализуемость предложенного подхода к контролю над соблюдением требований по ЭМС электрооборудования автомобиля.

В настоящем исследовании диагностические данные обрабатываются с помощью подхода, основанного на алгоритмах классификации, осуществляющихся программой ВЕКА для интеллектуального анализа данных (версии 3.6.8.), и с помощью вычислительного эксперимента, использующего метод опорных векторов, реализованный в ENCOG Workbench (версия 3.1).

1) ВЕКА

Среда Waikato для приобретения знаний обеспечивает удобство и легкий доступ к методам машинного обучения [7]. Программа ВЕКА получила широкое распространение в решении научных и научно-ориентированных задач как универсальный инструмент для анализа данных.

Три алгоритма из этой программы были использованы в данном исследовании:

Zero-R: базовый алгоритм классификации, который определяет основной класс данных для большинства случаев и, как правило, используется в качестве основы для сравнения классификаторов.

One-R: другой алгоритм классификации, который является более сложным. Он определяет набор правил (по одному на каждый признак) и выбирает правило с наименьшей ошибкой прогноза классификации.

J-48: выполненный в ВЕКА алгоритм C4.5. дерева принятия решений, разработанный Джоном Квинланом. Алгоритм строит деревья решений для классификации из выборки данных с использованием нисходящего подхода. Признак с самым высоким показателем нормирования данных используется для принятия решения о классификации.

2) ENCOG

ENCOG также является средой разработки программ машинного обучения, предложенной Дж. Хитон, содержащей различные классы для создания широкого спектра алгоритмов обработки данных, а также поддержки операций для нормализации данных.

Базируясь на функциональных схемах работы интеллектуальных датчиков, приведённых на рисунке 2, можно предложить следующую структуру интеллектуальных блоков системы диагностики уровня электромагнитного возмущения (ЭМВ).

Основным блоком ИИС является интеллектуальный датчик (ИД), который на основании текущих сведений об окружающей среде и состоянии объекта управления (системы зажигания ДВС) осуществляет оценку комплексных характеристик диагностируемой системы. Полученная оценка преобразуется устройством выработки управления (ЭБУ) в физический сигнал и поступает на вход системы зажигания, которое является исполнительным устройством.

Таким образом, диагностическая ИИС представляет собой комплексное образование, способное оценивать состояние объекта диагностики и среды, сопоставлять параметры желаемого и реального результатов действия объекта, принимать решение и вырабатывать в соответствии с ним управление, способствующее достижению поставленной цели [8].

По этой причине ИИС должна обладать возможностью в процессе своего функционирования сохранять и приобретать диагностические знания, которые нацелены на решение наиболее важной задачи любой диагностической системы обнаружения и устранения неисправностей (ОУН), для решения которой используют описанные подходы, при этом данные знания обеспечивают базу для подходов к математическому моделированию (ММ), в то время как алгоритмиче-



Рисунок 2. Интеллектуальный датчик диагностики уровня ЭМВ от системы зажигания

ские знания особенно полезны для реализации диагностики на основе данных (ДД подход).

Внутри вышеуказанных подходов находят всё более широкое применение методы искусственного интеллекта, основанные на математических моделях обнаружения и устранения неисправностей, поэтому интеллектуальный подход, выраженный ИИС, все чаще используется для решения сложных проблем в различных технических областях, в том числе в автомобильной диагностике [9].

Имеются несколько причин для интеграции искусственного интеллекта в выявление, анализ и прогно-

зирование электромагнитных помех в различных условиях эксплуатации транспортного средства. Для систематизации методов искусственного интеллекта в данной работе предложена концептуальная модель (рисунок 3), которая адаптирует к процессу ОУН многоуровневую схему, заимствованную из структуры интеллектуального анализа данных [6].

Каждый уровень или слой этой схемы предназначен для определённых задач обработки данных, начиная от низшего уровня сбора диагностических данных, затем обработка и анализ полученных данных и до высшего уровня интерпретации данных с исполь-

		Выполняемые операции	Используемые методы	Примеры применений
ВЫСОКИЙ	ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ	Построение базы знаний	Прогностическое техническое обслуживание	Проверка электромагнитной совместимости
		Интерпретация данных	Оценка допущений	Диагностика неисправностей
Уровень абстракции (степень использования искусственного интеллекта)	АНАЛИЗ ДАННЫХ	Классификационные модели	Машинное обучение + Вычислительный интеллект	ИНС + метод опорных векторов
		Прогнозирующие модели, базирующиеся на данных	Модели, основанные на правилах, и регрессионные модели	Дерево принятия решений
		ОБРАБОТКА ДАННЫХ	Определение характерных особенностей	Определение резко отклоняющихся значений
	Проверка гипотез		Наличие аномальных помех	
НИЗКИЙ	СБОР ДАННЫХ	Нормализация диапазона и визуализация данных	Статистические методы	Распределение, средний уровень и аномальные значения шума
			Мониторинг уровня шума и помех	Радиопомехи от свечи зажигания
		Источник диагностических данных		

Рисунок 3. Концептуальная модель диагностики электромагнитного возмущения от системы зажигания (закрашенные блоки концептуальной модели были реализованы в ходе данной исследовательской работы)

зованием либо существующих, либо приобретенных знаний.

Слой с наименьшим уровнем абстракции (тем самым не использующий методы искусственного интеллекта) соответствует сбору диагностических данных по ЭМП, включая их визуальное представление и подготовку для дальнейшего анализа. Второй слой осуществляет обработку полученных данных (такую, например, как определение резко выделяющихся значений, исключение пропущенных значений и тому подобное) с определением их характерных особенностей. Основной функцией второго слоя является выделение наиболее важных входных переменных, незаменимых при построении диагностических моделей с хорошими возможностями обобщения.

Остальные слои предлагаемой концептуальной модели работают на более высоком уровне абстракции, что позволяет применять в них методы искусственного интеллекта. В частности, третий слой отвечает за создание, оценку и корректировку (при необходимости) моделей, основанных на используемых диагностических данных. В этой концептуальной модели особая роль отводится методу искусственных нейронных сетей (ИНС) и методу опорных векторов (МОВ), которые имеют большое значение в диагностике уровня ЭМП. Задачей последнего слоя является интерпретация диагностических данных в результате обобщения полученных моделей и углубления знаний о принципах обнаружения и устранения неисправностей в объектах и системах, проходящих диагностику. Последний слой как раз и является интеллектуально-информационной системой для диагностики ЭМП от системы зажигания. Покажем работу концептуальной модели диагностики на примере идентификации уровня электромагнитных помех [9].

На рисунке 4 представлены процессы, реализуемые разработанной диагностической системой при идентификации уровня электромагнитных помех. В этом смысле основную обеспокоенность вызывает нежелательный шум, создаваемый автомобильными электрическими системами, в частности, системой зажигания автомобиля, которая вносит негативную составляющую в работу других систем и электрооборудования в радиусе 100 м от автомобиля.

В [6] представлен сравнительный анализ данных о ЭМП от системы зажигания, полученных эмпирически и с помощью математического моделирования на основе адаптированной модели Майра. Несмотря на приемлемое соответствие эмпирических и моделируемых значений, погрешность выбранной математической модели варьировалась в пределах 6 – 18 %, что, безусловно, оставляет желать лучшего.

Поэтому первым проведенным экспериментом по использованию диагностических ИИС для выявления повышенного уровня помех было исследование, имеющее те же исходные данные (экспериментальная кривая на рисунке 4), но целью которого было построение вместо математической модели «умного» датчика, способного автоматически определять, когда поступающие диагностические данные указывают на неприемлемый уровень ЭМП.

Для реализации эксперимента был выделен частотный диапазон в пределах от 1 до 10 МГц. В выделенном диапазоне были выбраны значения, характеризующие уровень электромагнитного шума, соответствующие и несоответствующие требованиям по ЭМС (обучающие данные на рисунке 4).

Основной целью использования ИНС является обеспечение автоматизированного обнаружения недопустимо высокого уровня радиопомех без априорного знания минимального соотношения (порогового значения) сигнал — шум на различных частотах. Настроив ИНС на наборе обучающих пар (80 значений), соотносящих уровень ЭМП с удовлетворением требований ЭМС в выбранном частотном диапазоне, можно ожидать, что для текущих значений шума на интересующих нас частотах метод ИНС будет способен идентифицировать, являются они удовлетворительными или нет. Правильность идентификации повышенного уровня шума показана на рисунке 4, из которого видно, что для тестируемых данных (20 значений) факт превышения допустимого уровня ЭМП был определен правильно в 18 случаях (плюсы на рисунке 4), а ошибочно — только для двух тестовых значений. Следует также отметить, что неправильная идентификация уровня ЭМП была осуществлена для значений ЭМП, находящихся в непосредственной близости к порогу допустимости, где и моделируемые

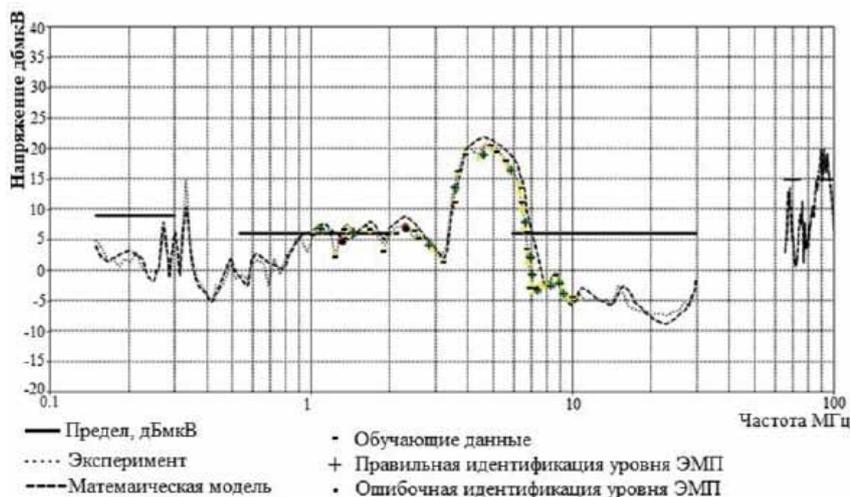


Рисунок 4. Выявление уровня ЭМП

значения шума не всегда оказывались по ту же сторону порогового значения, что и экспериментальные данные. Таким образом, можно утверждать, что интеллектуальный датчик на основе ИНС способен

с достаточно высокой точностью определить превышение допустимого уровня ЭМП в заданном частотном диапазоне [10].

Список литературы

1. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. — М.: Мир, 1990. — 238 с.
2. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции: пер. с англ. — М.: Издательский дом «Технологии», 2004. — 540 с.
3. Петровский С.В. Математическое моделирование процессов дугообразования в системе зажигания автомобиля // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». — 2009. — № 2 (24). — С. 199-204.
4. Петровский С.В., Николаев П.А. Электромагнитная совместимость автомобильного генератора напряжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2014. — № 5. — С. 32-34.
5. Петровский С.В., Николаев П.А. Моделирование электромагнитных помех при работе системы зажигания автомобиля // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. молодежн. науч.-техн. конф. — Томск: ТПУ, 2014. — Т. 1. — С. 355-359.
6. Петровский С.В. Интеллектуально-измерительная система для идентификации и классификации радиопомех от системы зажигания автомобиля // Измерения в современном мире — 2015: сб. тр. Пятой междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: СПГПУ, 2015. — С. 89-99.
7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БВХ-Петербург, 2005. — 736 с.
8. Petrovski S., Bouchet F., Petrovski A. Data-Driven Modeling of Electromagnetic Interferences in Motor Vehicles // INISTA — 2013: IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications. — Albena, Bulgaria, 2013. — ISBN 978-1-4799-0659-8. — DOI: 10.1109/INISTA.2013.6577658. — P. 1-7.
9. Petrovski S., Rattadilok P., Petrovski A. Anomaly Monitoring Framework Based on Intelligent Data Analysis // IDEAL — 2013: Proceedings of the 14th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning. — October, 2013. — Hefei, China. — Springer Global, Lecture Notes in Computer Science. — Vol. 8206. — P. 134-141. — ISBN 978-3-642-41277-6. — DOI: 10.1007/978-3-642-41278-3_17.
10. Petrovski A., Rattadilok P., Petrovski A. Designing a Context-Aware Cyber Physical System for Detecting Security Threats in Motor Vehicles // SIN'15: Proceedings of the 8th International Conference on Security of Information and Networks. — Sochi, Russia, 2015. — P. 267-270. — ISBN 978-1-4503-3453-2. — DOI: 10.1145/2799979.2800029.

References

1. Barns Dzh. Elektronnoe konstruirovaniye: metody bor'by s pomekhami. — M.: Mir, 1990. — 238 s.
2. Ul'yams T. EMS dlya razrabotchikov produktsii: per. s angl. — M.: Izdatel'skii dom «Tekhnologii», 2004. — 540 s.
3. Petrovskii S.V. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov dugoobrazovaniya v sisteme zazhiganiya avtomobilya // Vestnik SamGTU. Seriya «Tekhnicheskie nauki». — 2009. — № 2 (24). — S. 199-204.
4. Petrovskii S.V., Nikolaev P.A. Elektromagnitnaya sovmestimost' avtomobil'nogo generatora napryazheniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. — 2014. — № 5. — S. 32-34.
5. Petrovskii S.V., Nikolaev P.A. Modelirovaniye elektromagnitnykh pomekh pri rabote sistemy zazhiganiya avtomobilya // Elektroenergetika glazami molodezhi: nauch. tr. V Mezhdunar. molodezhn. nauch.-tekhn. konf. — Tomsk: TPU, 2014. — T. 1. — S. 355-359.
6. Petrovskii S.V. Intellektual'no-izmeritel'naya sistema dlya identifikatsii i klassifikatsii radiopomekh ot sistemy zazhiganiya avtomobilya // Izmereniya v sovremennom mire — 2015: sb. tr. Pyatoi mezhdunar. nauch.-prakt. konf. — SPb.: SPGPU, 2015. — S. 89-99.
7. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH. — SPb.: BVKh-Peterburg, 2005. — 736 s.
8. Petrovski S., Bouchet F., Petrovski A. Data-Driven Modeling of Electromagnetic Interferences in Motor Vehicles // INISTA — 2013: IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications. — Albena, Bulgaria, 2013. — ISBN 978-1-4799-0659-8. — DOI: 10.1109/INISTA.2013.6577658. — R. 1-7.
9. Petrovski S., Rattadilok P., Petrovski A. Anomaly Monitoring Framework Based on Intelligent Data Analysis // IDEAL — 2013: Proceedings of the 14th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning. — October, 2013. — Hefei, China. — Springer Global, Lecture Notes in Computer Science. — Vol. 8206. — P. 134-141. — ISBN 978-3-642-41277-6. — DOI: 10.1007/978-3-642-41278-3_17.
10. Petrovski A., Rattadilok P., Petrovski A. Designing a Context-Aware Cyber Physical System for Detecting Security Threats in Motor Vehicles // SIN'15: Proceedings of the 8th International Conference on Security of Information and Networks. — Sochi, Russia, 2015. — R. 267-270. — ISBN 978-1-4503-3453-2. — DOI: 10.1145/2799979.2800029.



Вавилов В. Е.
Vavilov V. Ye.
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
«Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Бекузин В. И.
Bequizin V. I.
магистрант кафедры
«Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Айгузина В. В.
Aiguzina V. V.
студентка кафедры
«Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 321.31

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ДЛЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Одним из основных требований к магнитоэлектрическим генераторам в системах электроснабжения автономных объектов является обеспечение синусоидальности формы кривой напряжения. Для снижения влияния высших гармоник и, как следствие, обеспечения синусоидальности формы кривой напряжения применяют различные методы. В статье приведены преимущества и недостатки основных методов (скос пазов, укорочение обмотки). Проведена качественная оценка эффективности применяемых для магнитоэлектрических генераторов метода скоса пазов статора и метода фиктивных пазов статора. Для оценки синусоидальности формы кривой напряжения магнитоэлектрического генератора использовался коэффициент нелинейных искажений.

Для метода скоса пазов статора с помощью программного комплекса *Ansoft Maxwell* построены зависимости коэффициента нелинейных искажений и значения ЭДС от величины скоса, определена величина скоса, при которой наблюдается наименьший коэффициент нелинейных искажений.

Для метода использования фиктивного паза статора определены оптимальные параметры фиктивного паза, при которых наблюдается наиболее заметное снижение высших гармоник.

Рассмотрена функция зависимости магнитной индукции от длины средней линии воздушного зазора магнитоэлектрического генератора без фиктивного паза и магнитоэлектрического генератора с фиктивным пазом. При численной оценке уменьшения высших гармоник определены функции зависимости магнитной индукции от средней линии воздушного зазора в спектр распределения высших гармоник для магнитоэлектрического генератора без фиктивного паза и для магнитоэлектрического генератора с фиктивным пазом.

Проведенные исследования показывают эффективность совместного применения скоса пазов и фиктивных пазов для уменьшения влияния высших гармоник на выходные параметры магнитоэлектрического генератора.

Ключевые слова: высшие гармоники, магнитоэлектрический генератор, скос пазов, фиктивный паз, коэффициент нелинейных искажений.

COMPARISON OF DIFFERENT METHODS REDUCE THE IMPACT OF HIGHER HARMONICS FOR MAGNETOELECTRIC GENERATOR

One of the basic requirements for a magneto-generator in the power supply systems of autonomous objects is to provide a sinusoidal voltage waveform. To reduce the influence of the higher harmonics and as a consequence a sinusoidal voltage waveform using various methods. The article presents the advantages and disadvantages of the main methods (bevel slots, winding shortening). Qualitative assessment of the effectiveness of magnetolectric generators used for the method of the bevel grooves of the stator and the method of fictitious stator slots. To estimate the sinusoidal voltage waveform generator used magnetolectric THD.

For the method of the bevel grooves of the stator by means of software *Ansoft Maxwell* built according THD and EMF on the value of the bevel, bevel determined the value at which there is the lowest THD.

For the method of using a fictitious stator slot defined optimal parameters of the dummy slot, in which there is the most noticeable decrease in higher harmonics.

Consider the function of magnetic induction depending on the length of the midline of the magnetoelectric generator air gap without a dummy slot and magnetoelectric generator with a dummy slot. In the numerical evaluation reduce harmonic functions defined dependence of the magnetic induction from the midline of the air gap in the spectrum allocation for the higher harmonics of the magneto electric generator without a dummy slot for magnetoelectric generator with a dummy slot.

Studies have shown the effectiveness of the joint application of the bevel grooves and dummy grooves to reduce the impact of higher harmonics on the output parameters of the magnetoelectric generator.

Key words: higher harmonics, magnetoelectric generator, skew width, dummy slot, total harmonic distortions.

Повышение энерговооруженности автономных объектов (АО) (авиационных и космических летательных аппаратов (ЛА), наземных передвижных АО и морских АО) является актуальным направлением развития и совершенствования АО, которое позволяет расширение их функциональных возможностей и повышение их управляемости. Все это влечет за собой повышение тактико-технических характеристик и топливной эффективности АО.

Одними из основных задач в данном направлении являются повышение надежности и увеличение мощности первичной системы электроснабжения АО при минимизации ее массогабаритных показателей.

Из анализа работ [1 – 6] установлено, что решением данной задачи может являться построение системы электроснабжения (СЭС) АО на базе бесконтактного магнитоэлектрического генератора (МЭГ), который обладает максимальными надежностью и коэффициентом полезного действия (КПД) при минимальной удельной массе. Кроме того, к достоинствам СЭС АО с МЭГ относится возможность работы МЭГ в двигательном режиме и обеспечение тем самым либо запуска теплового двигателя, либо выполнение функции систем навигации при использовании его в составе электромеханического аккумулятора [7].

В работе [8] показано, что применение высокооборотного МЭГ в качестве электромеханического аккумулятора в непилотируемых космических ЛА позволяет совместить систему навигации и систему электроснабжения, значительно повысить эффективность и расширить функциональные возможности непилотируемых космических ЛА.

Таблица 1. Номинальные данные МЭГ

Наименование	Обозначение	Значение
Номинальная отдаваемая (полезная) мощность, кВт	P_2	100
Количество фаз статора	m_1	3
Число пар полюсов	p	4
Частота напряжения или тока статора, Гц	f_1	4000
Напряжение обмотки статора, В	U_1	200
Частота вращения, об./мин	n_1	60000
Коэффициент мощности	$\cos(\varphi)$	0,9
Активная длина, мм	L	240
Количество пазов	z	36
Внешний диаметр статора, мм	D_1	160
Внутренний диаметр статора, мм	d_1	62
Тип паза статора	бутылочной формы	
Внешний диаметр ротора	D_2	60
Внутренний диаметр ротора	d_2	35
Тип магнитной системы (выбор данной магнитной системы обусловлен низким коэффициентом нелинейных искажений [1])		

тируемых космических ЛА. В работах [9, 10] показаны возможности применения высокооборотных МЭГ при создании космического буксира. Эффективность и перспективы МЭГ для авиационных пилотируемых и непилотируемых ЛА показаны в работе [11].

При этом одним из основных требований, согласно ГОСТ Р 54073-2010, определяющим возможность применения МЭГ в СЭС АО, является обеспечение синусоидальности формы кривой напряжения.

Для численной оценки синусоидальности формы кривой напряжения МЭГ используется коэффициент нелинейных искажений (*Total Harmonic Distortions (THD)*). *THD* – это показатель, который характеризует степень отличия формы напряжения МЭГ от синусоидальной и определяется в общем виде:

$$THD = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots + A_n^2}}{A_1} \cdot 100 \% \quad (1)$$

где A_n — амплитуда n -ой гармоники напряжения.

Чем меньше *THD*, тем эффективнее МЭГ при прочих равных параметрах, поэтому для уменьшения коэффициента нелинейных искажений обычно применяют несколько методов, таких как: скос пазов, укорочение шага обмотки и увеличение числа пазов на полюс и фазу. Так, в работе [1] представлена конструкция электрического генератора со скосом пазов на одно зубцовое деление, при этом пространственные гармоники уменьшаются, т.к. каждый проводник по длине располагается в разных магнитных условиях. В работе [2] приведен метод уменьшения высших гармоник путем увеличения числа пазов на полюс и фазу. При применении данного метода элек-

тродвижущая сила (ЭДС) основной гармоники уменьшается, кривая распределения магнитной индукции становится более синусоидальной. Однако значительное увеличение числа пазов на полюс и фазу приводит к снижению прочности зубцов, а также к их насыщению. Кроме того, недостатками данного метода являются увеличение объема изоляции и усложнение обмоточных работ, из-за чего размеры и масса возрастают. В работе [3] применяют технологию фиктивного паза совместно со скосом пазов, при этом THD уменьшается вплоть до 0,96 %. В работе [4] представлено устранение наиболее значительных по величине 3, 5, 7, 9 гармоник путем укорочения шага обмотки статора. Однако при укороченном шаге происходит снижение производимой мощности, поскольку недоиспользуется магнитный поток полюса, как следствие, увеличиваются массогабаритные показатели генератора. Этим обуславливается малая эффективность данного метода.

Задача данной работы — качественная оценка эффективности применения методов уменьшения влияния высших гармоник для МЭГ.

При проведении оценки рассматривался МЭГ, номинальные данные которого приведены в таблице 1.

Метод скоса пазов статора

Оценим эффективность применения метода скоса пазов статора, который характеризуется низким коэффициентом нелинейных искажений. На рисунке 1 приведена функция зависимости THD от относительной величины скоса пазов ($b'_{ск}$) для рассматриваемого МЭГ. Определение THD проводилось с помощью программного комплекса *Ansoft Maxwell*.

Из рисунке 1 видно, что при максимальном относительном скосе ($b'_{ск}=1,8$) THD снижается до 0,11 %. Однако скос пазов делается на одно зубцовое деление, т.к. период колебаний поля соответствует перемещению ротора на один зубцовый шаг. Иными словами, минимум $THD = 1,13$ при $b'_{ск} = 1$.

Также при скосе пазов наблюдается снижение ЭДС (рисунок 2), индуцируемое в ряде последовательных точек по длине проводника, которые будут сдвинуты по фазе относительно друг друга.

Из рисунка 2 видно, что при максимальном скосе ($b'_{ск}=1,8$) ЭДС снижается до 326 В (снижение на 6 %),

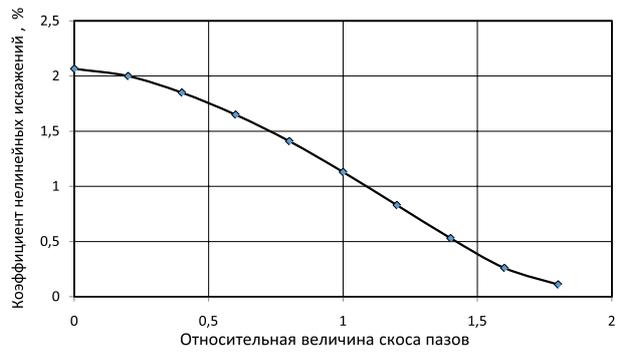


Рисунок 1. Функция зависимости коэффициента нелинейных искажений от относительной величины скоса пазов

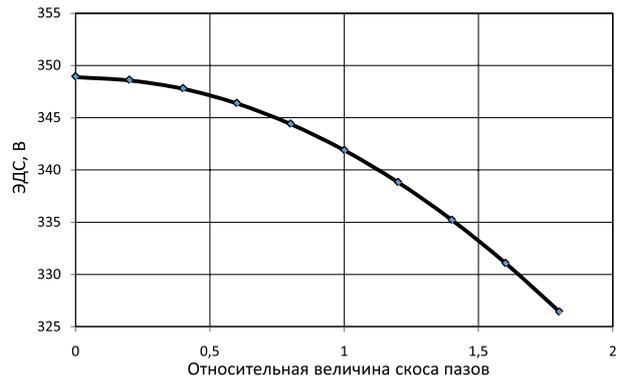


Рисунок 2. Функция зависимости ЭДС от относительной величины скоса пазов

при $b'_{ск}=1$ наблюдается снижение до 341 В (снижение на 2,1 %).

Метод фиктивных пазов на статоре

Рассмотрим эффективность применения метода фиктивных пазов на статоре. Данный метод позволяет решить проблемы увеличения объема изоляции, усложнения обмоточных работ, уменьшения массы и габаритов. Основной трудностью при его использовании является выбор оптимальных размеров фиктивного паза. Поскольку максимум магнитного потока в зубце магнитопровода статора МЭГ приходится на высоту, не превышающую ширину зубца, высоту фиктивного паза выбираем равной ширине зубца.

Исходя из условий механической прочности и исключая перенасыщение зубцов, ширину фиктивного паза принимаем 1/3 от ширины зубца, острые кромки срезаются.

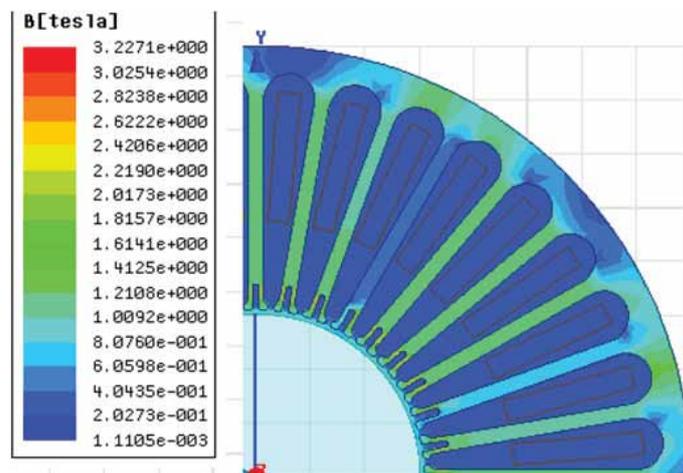


Рисунок 3. Распределение магнитной индукции МЭГ с фиктивными пазами

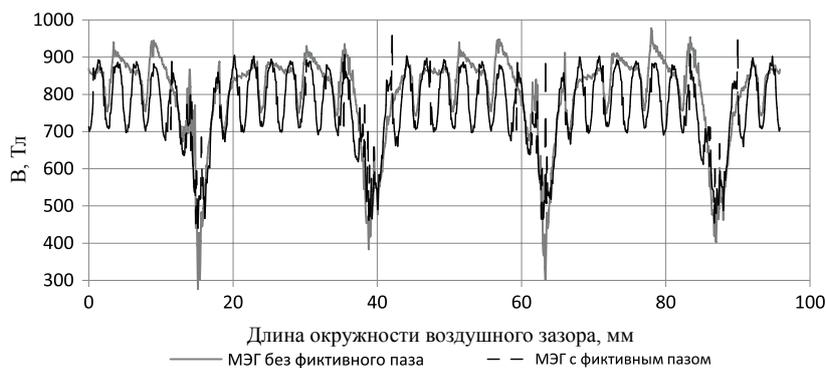


Рисунок 4. Функции зависимости магнитной индукции от длины средней линии воздушного зазора

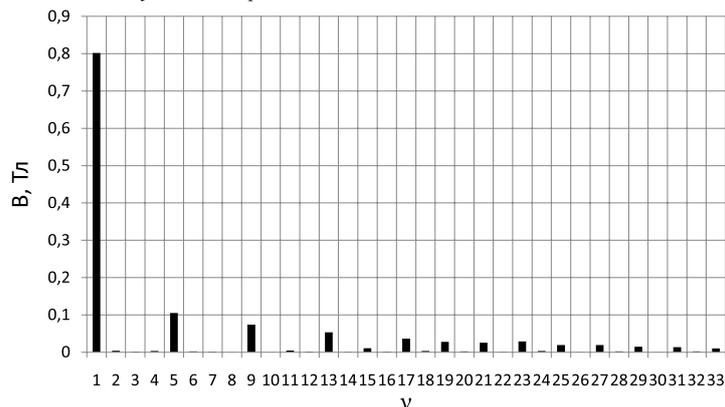


Рисунок 5. Спектр распределения высших гармоник для МЭГ без фиктивного паза

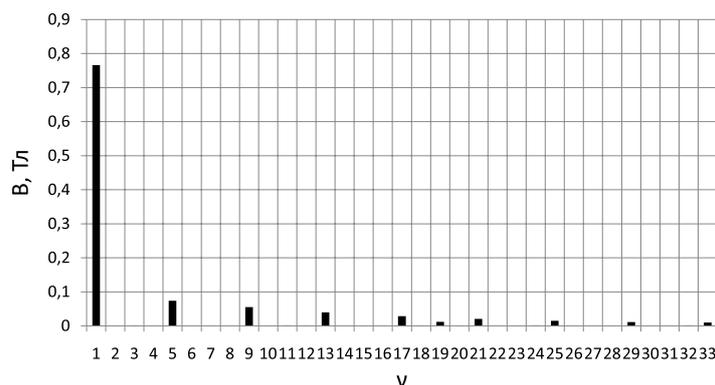


Рисунок 6. Спектр распределения высших гармоник для МЭГ с фиктивным пазом

Рассмотрим распределение магнитной индукции МЭГ с фиктивными пазами (рисунок 3).

Из рисунка 3 видно, что перенасыщение магнитопровода не наблюдается. Для объективной картины распределения магнитного поля МЭГ рассмотрим функцию зависимости магнитной индукции от длины средней линии воздушного зазора МЭГ без фиктивного паза и МЭГ с фиктивным пазом (рисунок 4).

Из рисунка 4 видно, что распределение магнитной индукции в воздушном зазоре становится более синусоидальным, уменьшаются всплески магнитной индукции. Для численной оценки уменьшения высших гармоник МЭГ разложим функции зависимости магнитной индукции от средней линии воздушного зазора в спектр распределения высших гармоник, рисунок 5 — для МЭГ без фиктивного паза и рисунок 6 — для МЭГ с фиктивным пазом.

Из рисунков 5 и 6 видно, что у МЭГ с фиктивным пазом амплитуда спектров высших гармоник снижена.

Для МЭГ без фиктивного паза THD равен 2,05 %, для МЭГ с фиктивным пазом — 1,58 %, то есть видно

явное уменьшение нелинейных искажений от применения фиктивного паза.

Заключение

Проведенные исследования показывают эффективность применения скоса пазов и фиктивных пазов для уменьшения влияния высших гармоник.

Дальнейшие исследования этих двух методов как в отдельности, так и при применении их одновременно позволят заметно снизить THD , то есть уменьшить потери, повысить энергоэффективность.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании МЭГ.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ.
Проект 16-38-00005.*

Список литературы

1. Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Applications. — URL: <http://free-energy-info.co.uk/P25.pdf> (accessed 05.11.2015).
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. — М.: Энергия, 1980. — 495 с.
3. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1984. — 431 с.
4. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. — М.: Высшая школа, 1990. — 415 с.
5. Пospelov Л.И. Конструкции авиационных электрических машин / Под ред. А.Ф. Федосеева. — М.: Энергоиздат, 1982. — 320 с.
6. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. — М.: Энергия, 1974. — 840 с.
7. Пат. 137162 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 К 21/14. Электрический генератор на постоянных магнитах / Г.Ф. Афанасьев, Л.Р. Закиров, Л. Ш. Биктимиров. — № 2013136449/07; заявл. 02.08.2013; опубл. 27.01.2014.
8. Пат. 137164 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 К 21/26. Генератор на постоянных магнитах / Г.Ф. Афанасьев, Л.Р. Закиров, Д.В. Рябов. — № 2013136451/07; заявл. 02.08.2013; опубл. 27.01.2014.
9. Заявка на изобретение № 98104402 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 К 21/12. Генератор переменного тока, имеющий ротор с постоянными магнитами / Натаниель Лоренс Линдсли. — № 98104402/09; заявл. 18.03.1998; опубл. 10.02.2000.
10. Бертинов А.И. Авиационные электрические генераторы переменного тока. — М.: Оборонгиз, 1959. — 594 с.
11. Cavagnino A., Li Z., Tenconi A., Vaschetto S. Integrated Generator for More Electric Engine: Design and Testing of a Scaled-Size Prototype // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2013. — Vol. 49. — № 5. — P. 2034-2043.

References

1. Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Applications. — URL: <http://free-energy-info.co.uk/P25.pdf> (accessed 05.11.2015).
2. Kopylov I.P. Proektirovanie elektricheskikh mashin. — M.: Energiya, 1980. — 495 s.
3. Gol'dberg O.D. Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov. — M.: Vysshaya shkola, 1984. — 431 s.
4. But D.A. Beskontaktnye elektricheskije mashiny. — M.: Vysshaya shkola, 1990. — 415 s.
5. Pospelov L.I. Konstruktsii aviatsionnykh elektricheskikh mashin / Pod red. A.F. Fedoseeva. — M.: Energoizdat, 1982. — 320 s.
6. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskije mashiny. — M.: Energiya, 1974. — 840 s.
7. Pat. 137162 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁷ H 02 K 21/14. Elektricheskii generator na postoyannykh magnitakh / G.F. Afanas'ev, L.R. Zakirov, L.Sh. Biktimirov. — № 2013136449/07; zayavl. 02.08.2013; opubl. 27.01.2014.
8. Pat. 137164 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁷ H 02 K 21/26. Generator na postoyannykh magnitakh / G.F. Afanas'ev, L.R. Zakirov, D.V. Ryabov. — № 2013136451/07; zayavl. 02.08.2013; opubl. 27.01.2014.
9. Zayavka na izobretenie № 98104402 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁷ H 02 K 21/12. Generator peremennogo toka, imeyushchii rotor s postoyannymi magnitami / Nataniel' Lorens Lindsli. — № 98104402/09; zayavl. 18.03.1998; opubl. 10.02.2000.
10. Bertinov A.I. Aviatsionnye elektricheskije generatory peremennogo toka. — M.: Oborongiz, 1959. — 594 s.
11. Cavagnino A., Li Z., Tenconi A., Vaschetto S. Integrated Generator for More Electric Engine: Design and Testing of a Scaled-Size Prototype // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2013. — Vol. 49. — № 5. — P. 2034-2043.



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



Юсупов Р. З.
Yusupov R. Z.

аспирант кафедры
«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

УДК 621.313

УСТРОЙСТВО АДАПТИВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА НА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ

Технологический процесс перекачки нефти предъявляет жесткие требования в отношении его бесперебойности, которая во многом зависит от надежности электроснабжения. Нефтеперекачивающие станции (НПС) относятся к первой категории по надежности электроснабжения и получают питание от двух взаимно резервирующих независимых источников питания. Для восстановления электроснабжения потребителей, подключенных к потерявшей питание секции шин, применяются устройства автоматического включения резерва (АВР).

В статье рассматривается новый подход к выполнению устройств автоматического включения резерва для нефтеперекачивающих станций с принципиально новой функцией – функцией адаптивности.

Применяющиеся в настоящее время устройства АВР с ожиданием снижения напряжения имеют жесткую логику действия и фиксированные уставки срабатывания, которые определяются по предельным режимам работы электрической сети и технологического процесса. При использовании таких устройств АВР может иметь место большое (до нескольких секунд) время перерыва электроснабжения, что может вызывать глубокие посадки напряжения в электрической сети и опасные ударные волны давления в магистральных нефтепроводах.

Предложено устройство адаптивного АВР, которое имеет гибкую логику действия и перестраиваемые уставки срабатывания. Это позволяет учесть фактический режим работы предприятия и энергосистемы, оптимизировать работу АВР и обеспечить бесперебойность технологического процесса при кратковременных нарушениях электроснабжения.

Предложены алгоритмы действия адаптивного АВР. Рассмотрена реализация адаптивного АВР с выбором алгоритма классического АВР или АВР с ускорением технологического АВР. Показано, что устройство адаптивного АВР позволяет обеспечить бесперебойность технологического процесса перекачки нефти при потере питания от одного из источников без изменения схемы электроснабжения и существенных финансовых затрат, в отличие от дорогостоящих тиристорных АВР.

Статья полезна ученым и производителям, занимающимся вопросами повышения надежности технологического процесса перекачки нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам при нарушении электроснабжения.

Ключевые слова: нефтеперекачивающая станция, нарушение электроснабжения, бесперебойность процесса перекачки нефти, самозапуск электродвигателей, адаптивное автоматическое включение резерва.

DEVICE FOR ADAPTIVE AUTOMATIC TO RESERVE SOURCE ON OIL PUMPING STATIONS

The technological process of pumping oil has strict requirements for its continuity, which largely depends on the reliability of power supply. Pumping stations belong to the first category of reliability of power supply and are powered by two independent mutually reserving power sources. To restore the power supply to consumers connected to the bus lost power section, apply the device automatically switches.

The article discusses a new approach to the automatic transfer switch devices for pumping stations with a fundamentally new feature - a function of adaptability.

Currently used ARS devices with voltage reduction expectations are rigid logic of action and fixed pickup, which are determined by the limiting operating modes of electric networks and technological process. When using such devices ARS may be a large (up to several seconds) during power interruption, which can cause deep planting line voltage and dangerous shock waves of pressure in the main oil pipelines.

A device adaptive ARS, which has a flexible and reconfigurable logic action pick-up setting. This makes it possible to take into account the actual operation of the enterprise and the power system, to optimise the ARS and to ensure continuity of the process at the short-term power failure.

Algorithms for adaptive action ARS. We consider the implementation of the ARS with an adaptive selection algorithm of classic ARS or ARS with acceleration technology. It is shown that the adaptive device enables the ARS process uninterrupted pumping oil loss from one of the power sources without changing the power supply circuits, and significant financial cost, unlike costly thyristor ARS.

Article useful to scientists and production workers, concerned with improving the reliability of the process pump oil and oil products through pipelines during a power failure.

Key words: oil pumping station, interruption of power supply, uninterrupted process of pumping oil, self-starting motor, adaptive automatic to reserve source.

Нефтеперекачивающие станции (НПС) относятся к первой категории по требованиям к надежности электроснабжения и получают питание от двух независимых источников. Основным потребителем электроэнергии на НПС являются электродвигатели магистральных насосных агрегатов. Для привода магистральных насосов широко применяются синхронные электродвигатели (СД), единичная мощность которых достигает 8 МВт. В случае потери питания от одного из источников электроснабжения восстановление напряжения на потерявшей питание секции шин происходит переключением ее на другой источник. Такое переключение обеспечивается устройством автоматического включения резерва (АВР) [1].

Наличие на НПС крупных СД существенно влияет на работу релейной защиты и автоматики. Такое влияние обусловлено тем, что при потере питания от одного из источников СД переходят в генераторный режим и могут длительно поддерживать напряжение на потерявшей питание секции шин распределительного устройства. При восстановлении напряжения питания его фаза может не совпадать с изменяющейся фазой электродвижущей силы (ЭДС) СД. Такое восстановление напряжения питания называют несинхронным включением. Оно сопровождается броском тока включения, который может быть опасным для СД [2, 3].

Снизить ток включения до безопасных значений можно либо путем ожидания снижения ЭДС СД (остаточного напряжения на шинах), либо включением секционного выключателя в момент времени, когда фазы ЭДС двигателя и напряжения сети совпадают или отличаются на такую небольшую величину, при которой ток включения безопасен для электродвигателя. Такое включение называют синхронным. Наибольшее распространение на НПС получили устройства АВР с ожиданием снижения остаточного напряжения [2, 3]. Недостатком АВР с ожиданием снижения напряжения (назовем их традиционными) является большое, до нескольких секунд, время переключения электроснабжения.

С начала 2000-х годов на НПС стали применяться тиристорные АВР (ТАВР), в которых используется принцип синхронного включения [4]. Достоинством

ТАВР является высокое быстродействие. Если за время выявления режима потери питания угол расхождения по фазе между ЭДС двигателей и напряжением сети остается меньше допустимого значения (сохраняется условие синхронизма), то время срабатывания ТАВР может быть менее 0,2 с [4]. Такое быстродействие позволяет выполнять переключение СД на резервный источник питания без существенных бросков тока и ограничения мощности электродвигателей, участвующих в самозапуске. Недостатками ТАВР являются: относительно высокая стоимость устройства, недостаточная термическая стойкость тиристорных ключей, недостаточно высокая стойкость силовых тиристоров к перенапряжениям в сети. Поэтому параллельно силовому тиристорному коммутатору на НПС подключается вакуумный секционный выключатель, на котором устанавливается АВР в традиционном исполнении. Следовательно, установка ТАВР не освобождает от использования в полной мере традиционного АВР. В связи с этим в настоящее время продолжает оставаться актуальной проблема совершенствования устройств традиционных АВР с ожиданием снижения остаточного напряжения. Основное внимание при совершенствовании таких АВР уделяется увеличению снижения времени действия и повышению чувствительности пусковых органов, а также повышению надежности и быстродействия коммутационной аппаратуры.

В статье рассматривается новый подход к выполнению устройств АВР для НПС с принципиально новой функцией — функцией адаптивности. Необходимость в адаптивных устройствах АВР продиктована следующими недостатками традиционных АВР.

1. Уставки срабатывания и логика действия традиционных устройств АВР определяются для предельных режимов работы сети и потребителя. Это приводит к неоптимальной работе АВР в промежуточных, не предельных режимах.

2. Алгоритм действия традиционных устройств АВР не учитывает влияние перерыва питания и последующего самозапуска электродвигателей на переходные процессы в нефтепроводе. Это может привести к нарушению технологического процесса даже при

успешном срабатывании АВР. Рассмотрим подробнее отмеченные недостатки.

При расчете уставок срабатывания устройств АВР параметры питающей электрической системы (ЭС) учитываются для двух предельных режимов работы: минимального и максимального. Из всех возможных режимов работы НПС также учитываются только два режима: максимальный, когда включены все электродвигатели магистральных насосов, и минимальный, когда в работе один магистральный насос. По результатам расчетов предельных режимов используются минимальные напряжения для выбора уставки срабатывания пускового органа АВР (защиты минимального напряжения) и максимальные токи включения для оценки допустимости АВР по току включения и выбора уставки срабатывания исполнительного органа АВР по величине остаточного напряжения.

Действительный режим работы ЭС и НПС чаще всего отличается и от минимального, и от максимального. При этом фактические токи включения в электродвигателях, токи самозапуска в питающей сети и остаточные напряжения на потерявшей питание секции шин могут отличаться от их значений в предельных режимах. Однако применяемые в настоящее время устройства АВР не учитывают отличие параметров фактического режима от предельных значений и действуют с уставками и логикой срабатывания, заданных для предельных режимов. В результате, вследствие жестко заданных параметров срабатывания и жесткой логики действия, традиционные АВР могут либо срабатывать с существенным замедлением, либо безосновательно запрещать работу АВР и самозапуск электродвигателей.

При нарушении электроснабжения, одновременно с выбегом электродвигателей, снижается скорость вращения магистральных насосов. При этом растет давление в трубопроводе на входе НПС с потерявшими питание электродвигателями [5, 6]. Повышение давления продолжается до срабатывания АВР и включения секционного выключателя. Анализ взаимосвязи времени срабатывания АВР и характера переходных процессов в трубопроводе показывает, что для каждого режима работы трубопровода существует свое оптимальное время срабатывания АВР. При этом волна повышенного давления при торможении магистральных насосов вследствие потери питания компенсируется волной пониженного давления от самозапуска насосных агрегатов при срабатывании АВР [7, 8, 9]. Алгоритм срабатывания традиционных устройств АВР не учитывает ни изменение, ни скорость изменения давления в трубопроводе. При значительном времени срабатывания АВР это может привести к отключению магистральных насосов или всей НПС по давлению средствами технологической автоматики. В результате, несмотря на срабатывание АВР и восстановление нормального электроснабжения, может нарушиться бесперебойность технологического процесса перекачки нефти или нефтепродукта по магистральному трубопроводу.

Для исключения указанных недостатков устройства АВР должны иметь перестраиваемые уставки и

гибкий алгоритм срабатывания в зависимости от параметров текущего режима работы ЭС и НПС. Такое устройство АВР будет обладать адаптивными свойствами и для каждого режима работы питающей сети и НПС будет «выбирать» оптимальные уставки срабатывания и оптимальный алгоритм действия. Для выполнения адаптивного устройства АВР необходимо знать фактические, а не предельные параметры питающей электрической сети в режиме реального времени. Необходимо также знать фактический режим работы НПС (число работающих магистральных насосов и степень их загрузки) и характер изменения параметров перекачки (давления). При выполнении устройств АВР на микропроцессорной основе, для придания адаптивных свойств, выполняются расчеты параметров питающей электрической сети и уставок срабатывания АВР для фактических, а не предельных режимов работы ЭС и НПС. При этом появляется возможность прогнозирования допустимости и успешности самозапуска и выбора оптимального алгоритма АВР до наступления аварийного события в реальном режиме работы ЭС и НПС.

Рассмотрим особенности действия адаптивного АВР на примере типовой схемы электроснабжения НПС, приведенной на рисунке 1. На НПС установлены четыре электродвигателя Д1, Д2, Д3 и Д4 привода магистральных насосов, по два на каждой секции шин. Рассмотрим режим, когда на первой секции шин 1СШ распределительного устройства работают два электродвигателя Д1 и Д2, на второй секции шин 2СШ работает один электродвигатель Д3, а Д4 находится в резерве.

При потере питания от источника И1 на 1СШ электродвигатели Д1 и Д2 теряют питание и переходят в

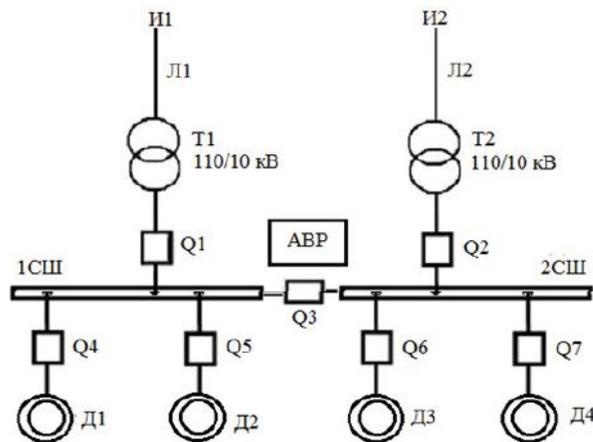


Рисунок 1. Схема электроснабжения НПС

режим выбега. Режим потери питания выявляется либо защитой от потери питания с пуском по частоте, либо защитой минимального напряжения, которые действуют на отключение вводного выключателя Q1. После отключения вводного выключателя остаточное напряжение на 1СШ будет определяться ЭДС двигателей Д1 и Д2, перешедших в генераторный режим. При снижении остаточного напряжения, до уставки по остаточному напряжению, срабатывает устройство АВР, включается секционный выключатель Q3, и электродвигатели Д1 и Д2 оказываются в режиме

самозапуска. На многих НПС при минимальном режиме ЭС одновременный самозапуск двух электродвигателей на одной секции шин невозможен. Но при режиме ЭС, когда ее сопротивление меньше чем в минимальном режиме, самозапуск двух электродвигателей может быть успешен. Однако традиционные устройства АВР не имеют возможности изменять логику работы (адаптироваться) в зависимости от режимов работы ЭС, и предприятия работают по заранее заданному алгоритму. Поэтому в рассматриваемом примере при использовании традиционных устройств АВР, независимо от режима ЭС, будет запрет включения секционного выключателя и реализован поочередный пуск двигателей Д1 и Д2. Это приводит к замедлению включения электродвигателей и насосных агрегатов и к замедлению восстановления технологического процесса.

Система управления адаптивным устройством АВР выяснит, что в данном режиме работы питающей сети одновременный самозапуск двух электродвигателей будет успешным, и вместо запрета АВР и поочередного пуска электродвигателей разрешает работу АВР и производит включение секционного выключателя.

На рисунке 2 приведена схема подключения адаптивного АВР [10]. Система управления адаптивным АВР представляет микропроцессорное устройство, в памяти которого находятся параметры схемы электропитания магистральных насосов, набор возможных режимов работы НПС по состоянию коммутационных аппаратов и набор возможных алгоритмов действия (набор логических функций). Устройство интегрировано с традиционным АВР и автоматизированной системой управления технологическими процессами (АСУТП) предприятия. Внедрение устройства не требует изменений в схеме электроснабжения НПС и существенных капитальных вложений.

Упрощенная логика работы устройства при использовании двух алгоритмов: алгоритма АВР с включением секционного выключателя и алгоритма

ускорения технологическим АВР, представлена в виде блок-схемы на рисунке 3.

Устройство осуществляет непрерывный мониторинг информации, поступающей от трансформаторов тока (ТА) вводов, напряжения (TV) на секциях шин и АСУТП. В расчетном блоке 1 в режиме реального времени до наступления режима потери питания определяются эквивалентные параметры питающей электрической сети (эквивалентная ЭДС и эквивалентное комплексное сопротивление [11]).

При потере питания и отключении выключателя ввода защитой от потери питания (ЗПП), либо с пуском по частоте, либо с пуском по напряжению расчетные блоки 2, 3 и 4 по алгоритмам, предложенным в [7, 12 – 15]:

- определяют безопасную величину остаточного напряжения на потерявшей питание секции шин (уставку срабатывания АВР по напряжению), при котором можно выполнять пуск исполнительной части АВР и включать секционный выключатель Q3;

- выполняют расчет выбега электродвигателей и прогнозируют время снижения ТСН, за которое остаточное напряжение на потерявшей питание секции шин снизится до безопасного значения;

- определяют время формирования фронта волны ТФФ, за которое давление волны в трубопроводе на входе НПС в переходном режиме может увеличиться до такого значения, что сумма волны давления и рабочего (стационарного) давления достигнет уставки срабатывания защиты трубопровода по давлению на выходе предыдущей НПС.

Логический блок 1, сравнивая времена ТСН и ТФФ, выбирает либо пуск АВР и включение секционного выключателя с последующим самозапуском электродвигателей, потерявших питания, либо отказ от АВР по снижению напряжения.

При этом производится немедленное (без выдержки времени) отключение одного из электродвигателей с включением технологического АВР. После пуска технологического резерва разрешается работа АВР сек-

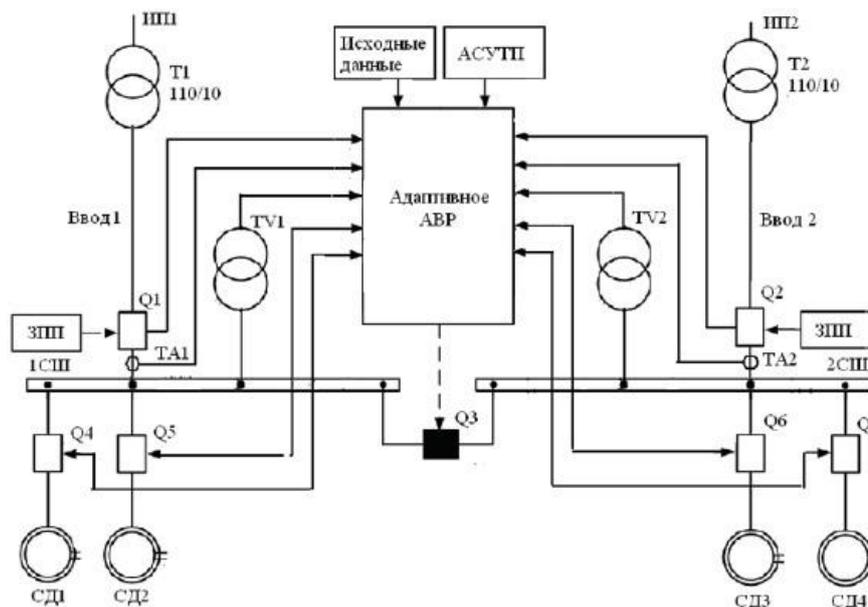


Рисунок 2. Схема подключения адаптивного АВР

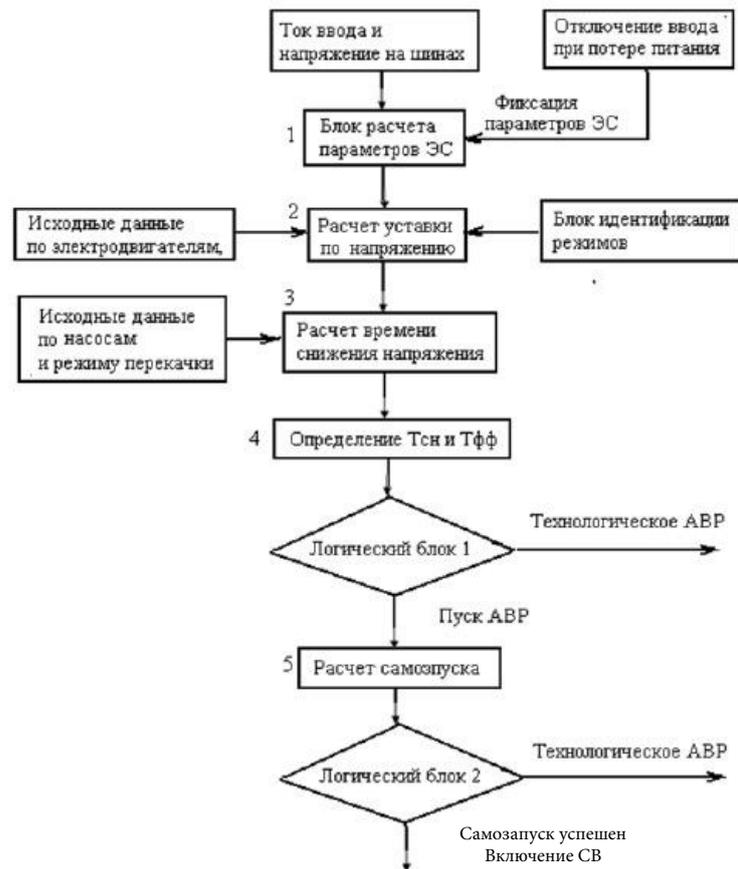


Рисунок 3. Пример логики действия адаптивного АВР

ционного выключателя с самозапуском оставшихся неотключёнными электродвигателей.

Если в логическом блоке 1 выбран алгоритм «пуск АВР», то расчетный блок 5 определяет (прогнозирует) посадку напряжения при включении секционного выключателя и производит расчет процесса самозапуска электродвигателей, потерявших питание, с целью прогнозирования его успешности или не успешности; прогнозирует допустимость самозапуска по времени разгона электродвигателей и допустимой температуре нагрева обмоток; выполняет расчет фронта снижения волны давления в трубопроводе на входе НПС при самозапуске; определяет время превышения ТФВ, в течение которого давление на выходе предыдущей НПС может превышать время срабатывания защиты трубопровода по давлению.

Логический блок 2 адаптивного АВР сравнивает расчетные параметры самозапуска с предельно допустимыми, оценивает опасность отключения насосов или НПС технологическими защитами по давлению и прогнозирует сохранение бесперебойности технологического процесса перекачки. Если расчетные параметры самозапуска не превышают предельно допустимых значений и нет опасности отключения насосов по давлению, то формируется прогноз «самозапуск успешен» и выполняется включение секционного выключателя СВ, в противном случае формируется прогноз «самозапуск неуспешен» и адаптивное АВР выдает команду на запрет включения СВ. При этом АВР действует на отключение электродвигателя одного из магистральных насосов и включение технологического резерва.

В блоке «Прием данных из АСУТП» осуществляется прием технологических параметров, в том числе давление на входе и на выходе НПС.

В блоке «Идентификация режима» производится выбор режима работы НПС из карты режимов. Каждому режиму присваивается собственный код, который состоит из комбинации кодов выключателей. Выключатели могут быть в 2-х состояниях — включен (код «1») или выключен (код «0»). В зависимости от состояния и количества выключателей в схеме создаются коды режимов. При семи выключателях (два вводных, один секционный и четыре выключателя электродвигателей) с двумя возможными состояниями может быть 128 возможных режимов, из которых в базе данных (карте режимов) оставляются только технологически разрешенные режимы.

В логических блоках решается задача выбора оптимального алгоритма действия адаптивного АВР. В рассмотренном выше примере был рассмотрен алгоритм с выбором двух вариантов: пуск АВР с включением секционного выключателя или технологическое АВР с включением резервного насосного агрегата. В общем случае алгоритмов работы АВР может быть несколько:

- включение СВ (классический алгоритм);
- поочередный пуск двух и более электродвигателей;
- ускорение технологического АВР;
- ускорение автоматики повторного включения (АПВ).

Классический алгоритм АВР включением СВ используется, когда в результате выполненных в адап-

тивном АВР расчетов прогнозируются успешность самозапуска и сохранение бесперебойности технологического режима без использования поочередного пуска или ускорения технологического АВР.

Поочередный пуск можно использовать, когда одновременный самозапуск двух и более электродвигателей на одной секции шин может оказаться неуспешным.

Ускорение технологического АВР используется в двух случаях:

1) в случае, когда расчетное время перерыва питания оказывается больше расчетного времени формирования фронта волны давления в трубопроводе, в целях снижения её амплитуды. При этом, по факту потери питания производится ускоренный (без выдержки времени) пуск резервного МНА, подключенного к секции шин, не терявшей питание;

2) при потере питания секции шин с двумя подключенными к ней электродвигателями магистральных насосов, когда одновременный самозапуск невозможен при всех режимах работы ЭС. В таком случае целесообразно не дожидаясь включения СВ произвести пуск резервного МНА и уже после его пуска осуществить АВР включением секционного выключателя с самозапуском одного из электродвигателей, потерявших питание [16].

Ускорение АПВ целесообразно применять в случае, когда перерыв электроснабжения от одного из источников меньше времени срабатывания АВР. Восстановление питания, в таком случае, осуществляется возвратом к нормальной схеме электроснабжения включением выключателя ввода [17].

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. — 7-е изд. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007. — 552 с.
2. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — С. 3-101.
3. Слодарж М.И. Режим работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. — М.: Энергия, 1977. — С. 8-130, 191-212.
4. Аптекарь Д.И., Муратбаев Э.Х. Управление аварийной ситуацией для снижения потерь при добыче нефти // Нефтяное хозяйство. — 2010. — № 5. — С. 124-126.
5. Коршак А.А., Нечваль А.М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. для вузов. — Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. — 571 с.
6. Зайцев Л.А. Регулирование режимов работы магистральных нефтепроводов. — М.: Недра, 1982. — 240 с.
7. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Кабаргина О.В., Юсупов Р.З. Электротехнические средства снижения волн давления в магистральных нефтепроводах при нарушении электроснабжения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2010. — Вып. 1 (79). — С. 77-83.

Выводы

1. Применяющиеся в настоящее время устройства АВР с ожиданием снижения напряжения имеют жесткую логику действия и фиксированные уставки срабатывания, которые определяются по предельным режимам работы электрической сети и технологического процесса. При использовании таких устройств АВР может иметь место большое (до нескольких секунд) время перерыва электроснабжения, что может вызывать глубокие посадки напряжения в электрической сети и опасные ударные волны давления в магистральных нефтепроводах.

2. Предложено устройство адаптивного АВР, которое имеет гибкую логику действия и перестраиваемые уставки срабатывания. Это позволяет учесть фактический режим работы предприятия и энергосистемы, оптимизировать работу АВР и обеспечить бесперебойность технологического процесса при кратковременных нарушениях электроснабжения.

3. Предложены алгоритмы действия адаптивного АВР. Рассмотрена реализация адаптивного АВР с выбором алгоритма классического АВР или АВР с ускорением технологического АВР. Показано, что устройство адаптивного АВР позволяет обеспечить бесперебойность технологического процесса перекачки нефти при потере питания от одного из источников без изменения схемы электроснабжения и существенных финансовых затрат в отличие от дорогостоящих тиристорных АВР.

8. Захаров Н.П., Тажигулов А.М. К вопросу повышения надежности и эффективности эксплуатации насосной станции // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2007. — Вып. 4 (70). — С. 80-83.

9. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Калимгулов А.Р., Ревель-Муроз П.А. Анализ результатов приближенной оценки снижения цикличности нагружения при использовании частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на эксплуатируемых нефтепроводах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. — Вып. 1 (103). — С. 64-75.

10. Пат. 2563629 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 J 9/00. Устройство адаптивного автоматического включения резерва / В.А. Шабанов, В.Ю. Алексеев, Р.З. Юсупов, С.Е. Клименко. — 2014118424/07; заявл. 06.05.2014; опубл. 20.09.2015. БИ № 26.

11. Файбисович В.А. Определение параметров электрических систем (Новые методы экспериментального определения). — М.: Энергоиздат, 1982. — С. 67-86.

12. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Калимгулов А.Р., Юсупов Р.З. Особенности схем электроснабжения НПС и их учет при анализе успешности самозапуска ЭД МНА // Молодежь и наука. Третье тысяче-

летие: сб. матер. Всеросс. науч. конф. — Красноярск, 2008. — С. 11-17.

13. Юсупов Р.З., Шабанов В.А. Расчет токов самозапуска электродвигателей без преобразования схемы замещения к эквивалентной форме // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всеросс. науч.-техн. конф. — Уфа: УГНТУ, 2009. — С. 251-256.

14. Алексеев В.Ю., Юсупов Р.З., Шабанов В.А., Пашкин В.В. О допустимой кратности тока включения синхронных электродвигателей нефтеперекачивающих станций // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всеросс. науч.-техн. конф. — Уфа: УГНТУ, 2009. — С. 257-261.

15. Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Юсупов Р.З. Выбег насосных агрегатов при наличии противодействия // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всеросс. науч.-техн. конф. — Уфа: УГНТУ, 2009. — С. 10-17.

16. Пат. 2496210 Российская Федерация, МПК⁷ H 02 J 9/06. Устройство защиты от потери питания на подстанциях предприятий с технологическим резервированием / В.А. Шабанов, В.Ю. Алексеев, Р.З. Юсупов. — 2012126437/07; заявл. 25.06.2012; опубл. 20.10.2013. БИ № 29.

17. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Клименко С.Е., Юсупов Р.З. Ускорение действия автоматического повторного включения на НПС при нарушениях в системе электроснабжения // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всеросс. науч.-техн. конф. — Уфа: УГНТУ, 2009. — С. 154-158.

References

1. Pravila ustroistva elektroustanovok. — 7-e izd. — M.: Izd-vo NTs ENAS, 2007. — 552 s.

2. Golodnov Yu.M. Samozapusk elektrodvigatelei. 2-e izd., pererab. i dop. — M.: Energoatomizdat, 1985. — S. 3-101.

3. Slodarzh M.I. Rezhim raboty, releinaya zashchita i avtomatika sinkhronnykh elektrodvigatelei. — M.: Energiya, 1977. — S. 8-130, 191-212.

4. Aptekar' D.I., Muratbakeev E.Kh. Upravlenie avariinoy situatsiei dlya snizheniya poter' pri dobyche nefiti // Neftyanoe khozyaistvo. — 2010. — № 5. — S. 124-126.

5. Korshak A.A., Nechval' A.M. Truboprovodnyi transport nefiti, nefteproduktov i gaza: ucheb. dlya vuzov. — Ufa: OOO «DizainPoligrafServis», 2001. — 571 s.

6. Zaitsev L.A. Regulirovanie rezhimov raboty magistral'nykh nefteprovodov. — M.: Nedra, 1982. — 240 s.

7. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Kabargina O.V., Yusupov R.Z. Elektrotekhnicheskie sredstva snizheniya voln davleniya v magistral'nykh nefteprovodakh pri narushenii elektrosnabzheniya // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. — 2010. — Vyp. 1 (79). — S. 77- 83.

8. Zakharov N.P., Tazhigulov A.M. K voprosu povysheniya nadezhnosti i effektivnosti ekspluatatsii nasosnoi stantsii // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. - 2007. - Vyp. 4 (70). — S. 80-83.

9. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Kalimkulov A.R., Revel'-Muroz P.A. Analiz rezul'tatov priblizhennoi otsenki snizheniya tsiklichnosti nagruzheniya pri ispol'zovanii chastotno-reguliruemogo elektroprivoda magistral'nykh nasosov na ekspluatiruemyykh nefteprovodakh // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. 2016. — Vyp. 1 (103). — S. 64-75.

10. Pat. 2563629 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁷ N 02 J 9/00. Ustroistvo adaptivnogo avtomaticheskogo vklyucheniya rezerva / V.A. Shabanov, V.Yu. Alekseev, R.Z. Yusupov, S.E. Klimenko. — 2014118424/07; zayavl. 06.05.2014; opubl. 20.09.2015. BI № 26.

11. Faibisovich V.A. Opredelenie parametrov elektricheskikh sistem (Novye metody eksperimental'nogo opredeleniya). — M.: Energoizdat, 1982. — S. 67-86.

12. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Kalimkulov A.R., Yusupov R.Z. Osobennosti skhem elektrosnabzheniya NPS i ikh uchet pri analize uspeshnosti samozapuska ED MNA // Molodezh' i nauka. Tret'e tsysyacheletie: sb. mater. Vseross. nauch. konf. — Krasnoyarsk, 2008. — S. 11-17.

13. Yusupov R.Z., Shabanov V.A. Raschet tokov samozapuska elektrodvigatelei bez preobrazovaniya skhemy zameshcheniya k ekvivalentnoi forme // Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii: sb. nauch. tr. II Vseross. nauch.-tekhn. konf. — Ufa: UGNTU, 2009. — S. 251-256.

14. Alekseev V.Yu., Yusupov R.Z., Shabanov V.A., Pashkin V.V. O dopustimoi kratnosti toka vklyucheniya sinkhronnykh elektrodvigatelei nefteperekachivayushchikh stantsii // Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii: sb. nauch. tr. II Vseross. nauch.-tekhn. konf. — Ufa: UGNTU, 2009. — S. 257-261.

15. Shabanov V.A., Kabargina O.V., Yusupov R.Z. Vybeg nasosnykh agregatov pri nalichii protivodavleniya // Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii: sb. nauch. tr. II Vseross. nauch.-tekhn. konf. — Ufa: UGNTU, 2009. — S. 10-17.

16. Pat. 2496210 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁷ N 02 J 9/06. Ustroistvo zashchity ot poteri pitaniya na podstantsiyakh predpriyatii s tekhnologicheskim rezervirovaniem / V.A. Shabanov, V.Yu. Alekseev, R.Z. Yusupov. — 2012126437/07; zayavl. 25.06.2012; opubl. 20.10.2013. BI № 29.

17. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Klimenko S.E., Yusupov R.Z. Uskorenie deistviya avtomaticheskogo povtornogo vklyucheniya na NPS pri narusheniyakh v sisteme elektrosnabzheniya // Elektrotekhnologii, elektroprivod i elektrooborudovanie predpriyatii: sb. nauch. tr. II Vseross. nauch.-tekhn. konf. — Ufa: UGNTU, 2009. — S. 154-158.



Авдзейко В. И.
Avdzejko V. I.

кандидат технических наук,
заместитель начальника научного
управления,
ФГБОУ ВО «Томский
государственный университет
систем управления и
радиоэлектроники»,
г. Томск, Российская Федерация



Карнышев В. И.
Karnyshev V. I.

кандидат технических наук,
начальник патентно-
информационного отдела,
ФГБОУ ВО «Томский
государственный университет
систем управления и
радиоэлектроники»,
г. Томск, Российская Федерация



Мещеряков Р. В.
Meshcheryakov R. V.

доктор технических наук, профессор,
директор Департамента по науке и
инновациям, проректор по научной
работе и инновациям, ФГБОУ
ВО «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники»,
г. Томск, Российская Федерация

УДК 338.27, 311.2

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПО ДАННЫМ МЕЖДУНАРОДНОЙ ПАТЕНТНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Для выявления перспективных направлений развития конкретных тематик исследований в области технических отраслей науки предлагается использовать метод патентного анализа. Перспективность и достоверность этого метода объясняются свойством патентной информации опережать по времени реализацию научно-технических достижений в производстве.

Эффективность патентного метода прогнозирования подкрепляется постоянным увеличением количества подаваемых заявок и выдаваемых патентов практически во всех патентных ведомствах мира.

Одним из известных подходов к патентному анализу является использование баз данных патентов на основе Международной патентной классификации (МПК), которая позволяет осуществлять эффективный поиск и классификацию любого технического решения, относящегося к изобретению, в соответствии с индексами или ключевыми словами. Анализ временных рядов для одиночной подгруппы МПК или их совокупностей позволяет дать оценку тренда развития конкретного технологического направления.

Возможности предлагаемого подхода к патентному анализу были опробованы на примере процесса преобразования энергии переменного тока на входе в энергию переменного тока на выходе.

В соответствии с МПК данный вид преобразования может производиться двумя способами: без промежуточного преобразования в постоянный ток и с промежуточным преобразованием в постоянный ток.

Проведенный анализ показал, что преобразование энергии переменного тока на входе в энергию переменного тока на выходе целесообразно проектировать без промежуточного либо с промежуточным преобразованием в переменный ток только с помощью статических преобразователей, при этом статические преобразователи должны быть выполнены только на полупроводниковых приборах, а именно на тиристорах или транзисторах. Очевидное преимущество в соответствии с трендом изменения количества выданных патентов имеют схемы статических преобразователей на тиристорах с промежуточным и без промежуточного преобразования в постоянный ток.

Ключевые слова: перспективные технические направления, патентный анализ, временные ряды, международная патентная классификация, патенты США.

FORECASTING OF POWER ELECTRONICS DEVELOPMENT DIRECTIONS BASED ON INTERNATIONAL PATENT CLASSIFICATION TIME SERIES

The method of patent analysis is used to identify perspective areas of specific research topics in technical branches of science. Patent information is ahead of implementation of scientific and technological achievements in production, it makes this method promising and accurate. The effectiveness of this method of forecasting is supported by a constant increase of applications and granted patents in almost all the patent offices around the world.

One of the known approaches to the patent analysis is the use of patent databases based on the International Patent Classification (IPC), which allows efficient searching and classification of any technical solution relating to the

invention, in accordance with the index or keyword. The analysis of time series for a single IPC subgroup or aggregates allows to evaluate the trend in the development of specific technological areas.

The capabilities of the proposed approach to patent analysis have been tested on input AC — output AC power conversion. In accordance with the IPC this type of conversion can be done in two ways: without intermediate conversion to DC and with intermediate conversion to DC.

The analysis shows that the conversion of input AC to output AC is rational to design without any intermediate DC conversion or with intermediate conversion to AC only via static converters. Thus, static converters should be performed only on semiconductor devices, namely, thyristors or transistors. The obvious advantage in accordance with the number of patents granted are static converters on thyristors with an intermediate and without intermediate conversion to DC.

Key words: perspective technological directions, patent analysis, time series, International Patent Classification, US patents.

Патентный анализ

Успешность и эффективность инновационного развития науки и техники на национальном, отраслевом и корпоративном уровнях во многом зависят от выбора направлений технологического развития, который, в свою очередь, определяется на основе применения методов технологического прогнозирования (ТП). Эти методы реализуются в виде двух подходов: исследовательского и нормативного. Исследовательский подход к ТП позволяет оценивать состояние конкретной технологии в будущем с учётом предполагаемой скорости технического прогресса, а нормативный, наоборот, задаёт темп и количественные показатели развития уровня технологии, которые необходимы для обеспечения заданных показателей в конце периода прогнозирования. Методы прогнозирования делятся на интуитивные и формализованные. Интуитивные методы используют суждения и оценки экспертов, а формализованные методы основаны на построении модели прогнозирования, позволяющей давать количественную оценку будущим значениям. В данной статье рассматривается исследовательский подход, позволяющий выявлять перспективные направления технологического развития на корпоративном уровне с использованием временных рядов, формируемых на основе Международной патентной классификации (МПК).

Технологии прогнозирования позволяют выявлять направления, темп технологического развития и продолжительность жизни технологий [1], и поэтому являются важным условием развития компаний.

В последние десятилетия широкое применение получили методы прогнозирования, основанные на использовании свойства научно-технической информации опережать реализацию научно-технических достижений. К таким методам, в частности, относится анализ патентной и публикационной информации.

С конца XX века зарубежные исследователи начали применять патентные данные для прогнозирования развития в конкретных отраслях и технологиях [2]. В ряде публикаций [3, 4, 5] показано, как с помощью патентной статистики можно выявлять инновационные изменения в технологических процессах, патентные данные являются полезным инструментом прогнозирования при принятии решений в государственном, отраслевом и других секторах экономики,

а изучение существующих тенденций позволяет предсказать изменения, которые произойдут в будущем.

Известны работы [6, 7], в которых проводится интеллектуальный анализ текстов патентов (наименования, рефераты) в большом количестве, что обеспечивает более достоверные прогнозы развития конкретных направлений по сравнению с работами, основанными на использовании метода Delphi. На основе результатов патентного анализа появляется возможность определения приоритетных направлений развития, а, значит, выявления технологических ниш и обеспечения максимального экономического эффекта [8], а также технологического прогнозирования, поскольку рост (особенно носящий взрывной характер) числа патентов может служить индикатором появления новых направлений в технике, которые не могут быть обнаружены другими методами.

Поскольку патентная информация является общедоступной и представляет собой источник подробных технологических знаний, её использование для прогнозирования тенденций технологического развития началось ещё в XX веке. Эффективность патентного метода прогнозирования подкрепляется постоянным увеличением количества подаваемых заявок и выдаваемых патентов практически во всех патентных ведомствах мира.

Одним из известных подходов [9] к патентному анализу является использование баз данных патентов на основе Международной патентной классификации, которая позволяет осуществлять эффективный поиск и классификацию любого технического решения, относящегося к изобретению, в соответствии с индексами или ключевыми словами.

Одним из вариантов использования МПК является формирование временных рядов с количеством выданных патентов за определённый период для конкретных подгрупп Международной патентной классификации [10]. Анализ временных рядов для одиночной подгруппы МПК или их совокупностей позволяет дать оценку тренда развития конкретного технологического направления.

Несмотря на большое количество существующих в мире ресурсов, содержащих патентную документацию, наиболее значимым, с точки зрения широты охвата и доступности полнотекстовых описаний патентов, является база данных Патентного ведомства США. Для проведения патентного анализа с исполь-

зованием МПК авторами данной статьи разработано программное обеспечение, формирующее в автоматическом режиме временные ряды с количеством выданных патентов США, были получены выборки числа патентов по всем 65687 основным группам и подгруппам МПК¹⁴ за период с 1976 по 2014 гг. с числом патентов, не равным нулю.

Сформированная совокупность выборок позволяет проводить анализ для любого конкретного технологического направления, соответствующего конкретной подгруппе или нескольким подгруппам МПК.

Анализ способов построения преобразователей энергии переменного тока на входе в переменный ток на выходе (АС/АС)

Возможности предлагаемого подхода к патентному анализу были опробованы на примере следующих основных групп и подгрупп МПК Н 02 М 5/00: преобразование энергии переменного тока на входе (АС) в энергию переменного тока на выходе (АС), например для изменения напряжения, частоты или числа фаз.

В соответствии с МПК данный вид преобразования может производиться двумя способами: без промежуточного преобразования (БПП) в постоянный ток (Н 02 М 5/02 — Н 02 М 5/38) и с промежуточным преобразованием (СПП) в постоянный ток (Н 02 М 5/40 — Н 02 М 5/48).

На рисунке 1 представлена динамика выдачи патентов США на устройства и способы преобразования вида АС/АС для этих способов. В целом с 1976 года по 2006 год количество патентов на преобразователи БПП превышало количество патентов на преобразователи с промежуточным преобразованием. Но с 2004 г. произошло резкое снижение количества патентов на преобразователи СПП с 67 до 4 ед. в 2006 г., а количество патентов, выданных на устройства с промежуточным преобразованием, неизменно росло, начиная с 2002 г., и в 2013 г. достигло 74 ед. Таким образом, можно сделать вывод о том, что АС/АС преобразование по схемам СПП является более перспективным.

Преобразование БПП может быть реализовано с помощью статических преобразователей (СП), динамических преобразователей (ДП), а также при их

сочетании. Анализ временных рядов показал, что на устройства, выполненные с помощью СП, было зарегистрировано 732 патента, на устройства с ДП — 10 патентов, а на комбинированные устройства — только 1 патент. Очевидно, что дальнейшее развитие могут получить только статические преобразователи без промежуточного преобразования.

Анализ количества патентов, выданных на устройства без ПП, выполненных на статических преобразователях, показал, что реальное применение нашли только СП, выполненные на газоразрядных, электронных или полупроводниковых приборах с управляющим электродом (Н 02 М 5/22 — Н 02 М 5/297). С 1976 по 2013 гг. на эти устройства было выдано 608 патентов. В подгруппах МПК Н 02 М 5/06, Н 02 М 5/08 зарегистрировано 26 патентов, в подгруппах Н 02 М 5/10 — Н 02 М 5/18 — 93 патента, а в Н 02 М 5/20 — всего 4 патента. За период с 2006 по 2013 гг. на СП с трансформаторами (Н 02 М 5/10 — Н 02 М 5/18) было выдано только 17 патентов, а на СП на газоразрядных, электронных или полупроводниковых приборах с управляющим электродом (Н 02 М 5/22 — Н 02 М 5/297) — 403 патента. Поэтому только это направление может быть признано перспективным.

В свою очередь, преобразователи без ПП в переменный ток с помощью СП на газоразрядных, электронных или полупроводниковых приборах с УЭ реально выполняются только на тиристорах — 416 патентов (Н 02 М 5/25 — Н 02 М 5/27) или на транзисторах — 165 ед. (Н 02 М 5/275 — Н 02 М 5/297).

Варианты реализации статических преобразователей на тиратронах или тиристорах с гашением, а также на триодах и транзисторах за периоды с 1976 по 2013 гг. и за последние годы с 2006 по 2013 гг. приведены в таблице 1.

В связи с тем, что тиратроны, газоразрядные, электронные лампы и триоды давно не используются в преобразовательной технике, на рисунке 2 показана динамика изменения количества патентов в конкретных подгруппах МПК, из чего следует, что количество патентов на тиристорные схемы растет, а на транзисторные, начиная с 2008 года, падает. Следовательно, в настоящее время, а возможно и в ближайшие несколько лет, преимущество останется за тиристорными преобразователями без ПП.

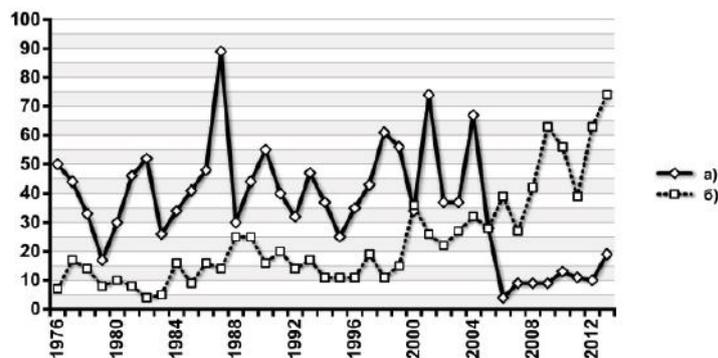


Рисунок 1. Распределение числа патентов США для случая преобразователей АС/АС без промежуточного (а) и с промежуточным (б) преобразованием в переменный ток

Таблица 1. Варианты реализации статических преобразователей

Вариант построения	Количество патентов (схемы с использованием тиратронов или тиристоров с гашением), ед.			Количество патентов (схемы с использованием триодов или транзисторов), ед.		
	подгруппа МПК	1976-2013	2006-2013	подгруппа МПК	1976-2013	2006-2013
только газоразрядные или электронные лампы	H 02 M 5/257	5	0	H 02 M 5/29	0	0
только полупроводниковые приборы	H 02 M 5/257	247	15	H 02 M 5/293	128	11
для преобразования частоты	H 02 M 5/27	159	8	H 02 M 5/297	27	2

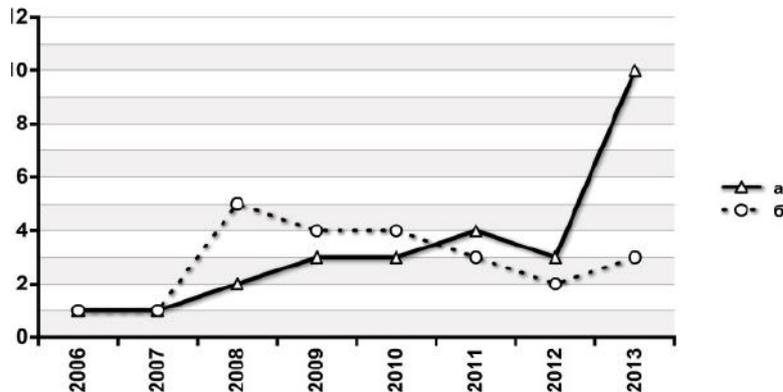


Рисунок 2. Распределение числа патентов США для случая статических преобразователей без ППИ на тиристорах (H 02 M 5/25 – H 02 M 5/27) (a) и транзисторах (H 02 M 5/275 – H 02 M 5/297) (б)

Аналогичный анализ был проведен для варианта построения преобразователей с промежуточным преобразованием в постоянный ток (H 02 M 5/40 — H 02 M 5/458), которые в соответствии с классификацией МПК могут быть реализованы с помощью статических преобразователей, с помощью динамических преобразователей (ДП) и при их сочетании. Схемы с промежуточным преобразованием (СПП) в постоянный ток с 1976 года по 2013 г., выполненные на СП, были защищены 843 патентами США, в то время как на ДП не выдано ни одного патента, а на преобразователи с сочетанием СП и ДП — всего один патент. Следовательно, перспективным направлением, которое будет развиваться и в дальнейшем, будет только разработка статических преобразователей (H 02 M 5/42 — H 02 M 5/458).

Статические преобразователи могут быть выполнены на тиратронах или тиристорах с гашением (H 02 M 5/443 — H 02 M 5/452) либо на триодах или транзисторах с непрерывным управлением (H 02 M 5/453 — H 02 M 5/458). В связи с тем, что с 1976 по 2013 год на электронные и газоразрядные преобразователи (H

02 M 5/447) был зарегистрирован только 1 патент, СП на тиристорах с промежуточным преобразованием будут в дальнейшем проектироваться с автоматическим управлением частотой или напряжением (H 02 M 5/451) либо с автоматическим управлением формой выходного сигнала (H 02 M 5/452) или на транзисторах (H 02 M 5/458). Так как на преобразователи с использованием электронных и газоразрядных ламп за последние 37 лет зарегистрирован только 1 патент, делаем вывод, что вторым направлением развития СП с промежуточным преобразованием будет создание транзисторного варианта.

На рисунке 3 показана динамика выдачи патентов на устройства СПП, выполненных с помощью СП на тиристорах (H 02 M 5/45) и на транзисторах (H 02 M 5/458). По сравнению с 2002 г. количество патентов на тиристорный вариант выросло с 4 патентов до 29 в 2013 г., а на транзисторный вариант, наоборот, снизилось с 17 до 8 ед., что подтверждает перспективность развития тиристорного варианта.

Проведенный анализ показал, что преобразование энергии переменного тока на входе в энергию пере-

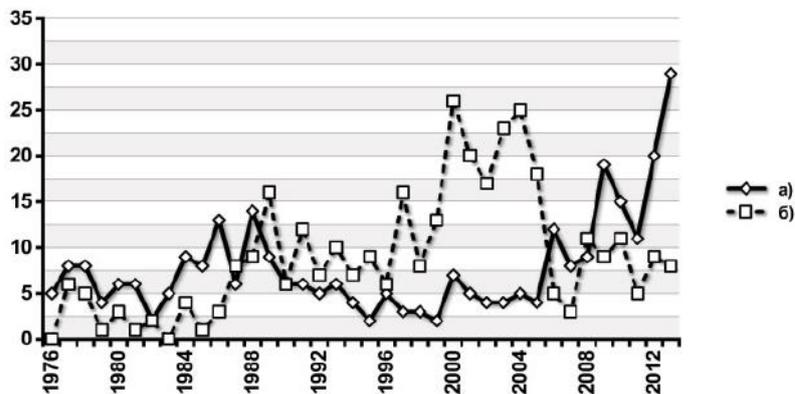


Рисунок 3. Распределение числа патентов США для случая преобразования AC/AC с помощью СП и с промежуточным преобразованием в переменный ток на тиристорах (H 02 M 5/45 — H 02 M 5/452) (a) и транзисторах (H 02M5/453 – H 02 M 5/458) (б)

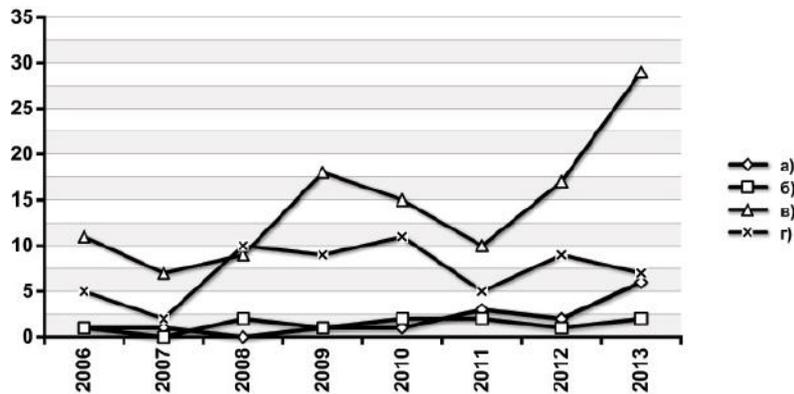


Рисунок 4. Распределение числа патентов США для случая преобразователей AC/AC на СП без промежуточного преобразования на тиристорах (H 02 M 5/257) (а), на транзисторах (H 02 M 5/293) (б), с промежуточным преобразованием на тиристорах (H 02 M 5/45 – H 02 M 5/452) (в) и на транзисторах (H 02 M 5/458) (г)

менного тока на выходе целесообразно проектировать без промежуточного либо с промежуточным преобразованием в переменный ток только с помощью статических преобразователей. При этом статические преобразователи должны быть выполнены только на полупроводниковых приборах, а именно на тиристорах или транзисторах.

На рисунке 4 показаны диаграммы изменения количества патентов, выданных на вариант выполнения статических преобразователей без промежуточного преобразования на тиристорах (H 02 M 5/257) и на транзисторах (H 02 M 5/293), а также с промежуточным преобразованием на тиристорах (H 02 M 5/45 — H 02 M 5/452) и транзисторах (H 02 M 5/458). Очевидное преимущество в соответствии с трендом изменения количества выданных патентов имеют схемы СП на тиристорах с промежуточным и без промежуточного преобразования в постоянный ток.

Заключение

Анализ временных рядов с изменением числа выданных патентов позволяет выявить перспективные схемные решения для реализации способов построения систем электропитания с выходом на постоян-

ном/переменном токе, работающих от сетей или источников постоянного/переменного тока, и сделать вывод о перспективах их развития в будущем.

Рассмотренный метод патентного анализа на основе временных рядов доказал возможность краткосрочного прогнозирования конкретных технологических направлений на основе использования баз данных патентов, классифицированных в соответствии с Международной патентной классификации. Для конкретной подгруппы МПК H 02 M 5/00 наиболее перспективными преобразователями AC/AC следует признать устройства, использующие тиристоры в схемах, как с промежуточным (H 02 M 5/45 — H 02 M 5/452), так и без промежуточного преобразования в постоянный ток (H 02 M 5/257).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00449 а.

Список литературы

1. Firat A.K., Woon W.L., Madnick St. Technological Forecasting // A Review. Working Paper CISL#2008-15. — 2008.
2. Dar-Zen Chen, Chang-Pin Lin, Mu-Hsuan Huang, Yi-Tung Chan. Technology Forecasting via Published Patent Applications and Patent Grants // Journal of Marine Science and Technology. — 2012. — Vol. 20, № 4. — P. 345-356.
3. Dehon C., B. Van Pottelsberghe. Implementing a Forecasting Strategy for PCT Applications at WIPO // Proceedings of the WIPO-OECD Workshop on Statistics in the Patent Field. — Geneva, Switzerland, 2003.
4. Liu S., Shyu J. Strategic Planning for Technology Development with Patent Analysis // International Journal of Technology Management. — 1997. — Vol. 13. — P. 661-680.

5. Pavitt K. Uses and Abuses of Patent Statistics // Handbook of Quantitative Studies of Science and Technology. — Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988.
6. Jun S., Park S., Jang D. Technology Forecasting using Matrix Map and Patent Clustering // Industrial Management & Data Systems. — 2012. — Vol. 112, № 5.
7. Fattori M., Pedrazzi G., Turra R. Text Mining Applied to Patent Mapping: a Practical Business Case // World Patent Information. — 2003. — Vol. 25. — P. 335-342.
8. Yoon B., Yoon C., Park Y. On the Development and Application of a Self-Organizing Feature Map-Based Patent Map // R&D Manage. — 2002. — № 32 (4). — P. 291-300.
9. Jun S. IPC Code Analysis of Patent Documents Using Association Rules and Maps-Patent Analysis of Database Technology // Communications in Computer and Information Science. — 2011. — Vol. 258. — P. 21-30.

10. Авдзейко В.И., Карнышев В.И., Мещеряков Р.В., Шелупанов А.А., Парнюк Л.В. Анализ динамики выдачи патентов для выявления перспективных направлений развития в области силовой электроники // Вестник Томского государственного университета. Экономика. — 2015. — № 394. — С. 159-169.

References

1. Firat A.K., Woon W.L., Madnick St. Technological Forecasting // A Review. Working Paper CISL#2008-15. — 2008.
2. Dar-Zen Chen, Chang-Pin Lin, Mu-Hsuan Huang, Yi-Tung Chan. Technology Forecasting via Published Patent Applications and Patent Grants // Journal of Marine Science and Technology. — 2012. - Vol. 20, № 4. — P. 345-356.
3. Dehon C., B. Van Pottelsberghe. Implementing a Forecasting Strategy for PCT Applications at WIPO // Proceedings of the WIPO-OECD Workshop on Statistics in the Patent Field. — Geneva, Switzerland, 2003.
4. Liu S., Shyu J. Strategic Planning for Technology Development with Patent Analysis // International Journal of Technology Management. — 1997. — Vol. 13. — P. 661-680.
5. Pavitt K. Uses and Abuses of Patent Statistics // Handbook of Quantitative Studies of Science and Technology. — Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988.
6. Jun S., Park S., Jang D. Technology Forecasting using Matrix Map and Patent Clustering // Industrial Management & Data Systems. — 2012. — Vol. 112, № 5.
7. Fattori M., Pedrazzi G., Turra R. Text Mining Applied to Patent Mapping: a Practical Business Case // World Patent Information. — 2003. — Vol. 25. — P. 335-342.
8. Yoon B., Yoon C., Park Y. On the Development and Application of a Self-Organizing Feature Map-Based Patent Map // R&D Manage. — 2002. — № 32 (4). — P. 291-300.
9. Jun S. IPC Code Analysis of Patent Documents Using Association Rules and Maps-Patent Analysis of Database Technology // Communications in Computer and Information Science. — 2011. — Vol. 258. — P. 21-30.
10. Avdzeiko V.I., Karnyshev V.I., Meshcheryakov R.V., Shelupanov A.A., Parnyuk L.V. Analiz dinamiki vydachi patentov dlya vyyavleniya perspektivnykh napravlenii razvitiya v oblasti silovoi elektroniki // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. — 2015. — № 394. — S. 159-169.



Карабельская И. В.
Karabel'skaya I. V.

аспирант кафедры «Физика»,
доцент кафедры «Информатика и
ИКТ», Федеральное государственное
образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Абызбаев И. И.
Abyzbaev I. I.

доктор технических наук, профессор
кафедры «Разработка и эксплуатация
нефтяных и нефтегазовых
месторождений», Федеральное
государственное образовательное
учреждение высшего образования
«Уфимский государственный
нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация



Ахметов И. В.
Akhmetov I. V.

кандидат физико-математических
наук, доцент кафедры «Информатика
и ИКТ», Федеральное государственное
образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 537.3-047.37

ОБОБЩЕННАЯ ФОРМУЛА ГРИНА ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ

Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложными и геометрическими параметрами имеют важное научно-техническое значение при геофизических поисках, научно-техническое и экономическое значение при геофизических поисках глубокозалегающих полезных ископаемых методом электроразведки, скважинной и межскважинной электроразведки на постоянном токе. Подобные электрические поля возникают также в электрохимических методах защиты и обработки металлов.

В статье сформулирована математическая модель краевой задачи, описывающей электрические поля с цилиндрическими неоднородностями, электродами и изоляторами, которая определяет функцию Грина в многосвязной области, учитывающей неоднородные краевые условия граничной задачи с двумя переменными x и y , в которой искомые функции находятся обратным преобразованием. Рассмотрены формула Грина для каждой области и алгоритм решения краевой обобщенной задачи; дано обобщенное интегральное представление Грина решения краевой задачи с учетом неоднородных краевых условий граничной задачи; дан вид упрощенного интегрального представления Грина, не содержащего неизвестных искомых функций и их производных по участкам границы многосвязной области.

Эффективность применения обобщенной формулы Грина интегрального представления решения позволяет создать автоматизированную систему научных исследований электрических полей, которую можно использовать в качестве подсистемы Системы автоматизированного проектирования электрохимических технологий, электрохимической защиты металлических сооружений от коррозии и для автоматизированной интерпретации геофизических методов поиска полезных ископаемых, основанных на постоянном электрическом поле.

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

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

Этот класс моделей охватывает достаточно широкий круг теоретических задач электрических и тепловых полей, имеющих важное практическое приложение.

Ключевые слова: математическая модель, исследования электрических полей постоянного тока, самосогласованная краевая задача, функция Грина, системы со сложными и геометрическими параметрами, обобщенная формула Грина интегрального представления решения.

GENERALIZED GREEN'S FORMULA INTEGRAL REPRESENTATION FOR SOLUTION

Research electric DC fields in systems with complex and geometric parameters are of great scientific and technological importance in the search for geophysical scientific, technological and economic importance in the search for deep-seated geophysical minerals by electrical, borehole and cross-well electrical DC. Similar electric fields also occur in electrochemical methods of protection and treatment of metals.

The paper formulated a mathematical model of a boundary value problem describing the electric field with cylindrical inhomogeneities electrodes and insulators. This boundary value problem determines the Green function in a multiply connected domain, taking into account inhomogeneous boundary conditions of the boundary value problem with two variables x and y , in which the unknown functions are the inverse transformation. We consider the Green's formula for each area, and an algorithm for solving the boundary value of the generalized problem. It summarizes the integral representation of the Green value problem given inhomogeneous boundary conditions of the boundary problem; is a view of a simplified representation of the Green's integral not containing unknown unknown functions and their derivatives on the boundary areas multiply. These features are included in this boundary problem, which determines the Green function.

The effectiveness of the generalized Green's formula the integral representation of the solution allows you to create automated research system (ARS) of the electric fields in complex systems by computational experiment based on the developed application packages. ARS electric fields can be used as a subsystem CAD electrochemical technologies, electrochemical protection of steel structures against corrosion and for automated interpretation of geophysical methods of mineral resources based on a constant electric field.

Currently, there is a tendency to create automated systems ARS research based on mathematical models of generalized, universal algorithms and packages RFP applications.

The desire to obtain reliable numerical analysis of using the limited resources of computing resources leads to the need to develop efficient algorithms. The main difficulty, being on the way, is three-dimensional and multiply the calculated areas of nonlinear mathematical models containing as initial data are smooth and discontinuous functions.

The difficulty of solving such problems in general makes it necessary to develop efficient algorithms for a particular class of problems. These algorithms are usually based on a combination of different computational methods.

In this paper we propose to develop, test on a computer, combined algorithms of numerical analysis of electric fields described by the three-dimensional self-consistent nonlinear boundary value problems in heterogeneous environments with cylindrical heterogeneous inclusions, insulators and electrodes.

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

Key words: mathematical model, the study of electric DC fields, self-consistent boundary value problem, Green's function, the system complex and geometric parameters, the generalized Green formula for the integral representation of the solution.

Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложными и геометрическими параметрами имеют важное научно-техническое значение при геофизических поисках, научно-техническое и экономическое значение при геофизических поисках глубокозалегающих полезных ископаемых методом электроразведки, скважинной и межскважинной электроразведки на постоянном токе. Подобные электрические поля возникают также в электрохимических методах защиты и обработки металлов [1 – 13].

Авторами сформулирована математическая модель краевой задачи, описывающей электрические поля с цилиндрическими неоднородностями, электродами и изоляторами. Эта краевая задача определяет функцию Грина в многосвязной области, учитывающей неоднородные краевые условия граничной задачи с двумя переменными x и y , в которой искомые функции находятся обратным преобразованием. Рассмотрены формула Грина для каждой области и алгоритм решения краевой обобщенной задачи; дано обобщенное интегральное представление Грина решения краевой задачи с учетом неоднородных краевых условий граничной задачи; дан вид упрощенного интегрального представления Грина, не содержащего неизвестные искомые функций и их производные по участкам границы многосвязной области. Эти функции включены в данную граничную задачу, которая определяет функцию Грина.

Эффективность применения обобщенной формулы Грина интегрального представления решения позволяет создать автоматизированную систему научных

исследований (АСНИ) электрических полей в сложных системах методом вычислительного эксперимента на основе разработанных пакетов прикладных программ. АСНИ электрических полей можно использовать в качестве подсистемы Системы автоматизированного проектирования электрохимических технологий, электрохимической защиты металлических сооружений от коррозии и для автоматизированной интерпретации геофизических методов поиска полезных ископаемых, основанных на постоянном электрическом поле.

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

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

Трудности решения таких задач в общем случае приводят к необходимости разработки экономичных алгоритмов для определенного класса задач. Эти алгоритмы, как правило, основаны на комбинировании различных вычислительных методов [10, 15, 16, 19, 20].

Авторами разработаны и апробированы на ЭВМ комбинированные алгоритмы численного анализа электрических полей, описываемых трехмерными нелинейными самосогласованными краевыми задачами в неоднородной среде с цилиндрическими неоднородными включениями, изоляторами и электродами. Этот класс моделей охватывает достаточно широкий круг теоретических задач электрических и тепловых полей, имеющих важные практические приложения [1 – 9, 11 – 14, 17, 18].

Пусть трехмерная электрохимическая система (ЭХС) – область интегрирования Ω состоит из M цилиндрических областей (сечение области Ω плоскостью $z = \text{const}$), имеет границы раздела сред γ ($i = 1, 2, \dots, M - 1$), N_i — точечных источников поля с интенсивностями I_{ij} ($j = 1, 2, \dots, N_i$), электродов с границами S_{ik} ($k = 1, 2, \dots, K_i$) и известными поляризационными зависимостями плотностями тока от разности потенциалов на границе электрод/проводящая среда, P_i — электродов с заданным распределением тока или электроизоляторов [1].

Рассмотрим краевую задачу:

$$LG_i = \frac{\partial^2 G_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G_i}{\partial y^2} - \alpha^2 G_i = -\delta(x-\xi)(y-\eta), \quad (x,y) \in \Omega_i, \quad (\xi, \eta) \in \Omega_i$$

$$G_i + C_{ik}(x,y)\sigma_i \frac{\partial G_i}{\partial n} \Big|_{S_{ik}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M_1 \leq M, \quad k = 1, 2, \dots, K_{li} \leq K_i$$

$$G_i - G_{i+1} \Big|_{\gamma_i} = 0, \quad \sigma_i \frac{\partial G_i}{\partial n} + \sigma_{i+1} \frac{\partial G_{i+1}}{\partial n} \Big|_{\gamma_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M_2 \leq M - 1$$

$$\frac{\partial G_i}{\partial n} \Big|_{l_{ip}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M_3 \leq M, \quad p = 1, 2, \dots, P_{li} \leq P_i$$

Задача (1) – (4) определяет в области $\bar{\Omega} = \sum_{i=1}^M \bar{\Omega}_i$

функцию Грина $G(x, y, \xi, \eta)$, которая учитывает некоторые однородные краевые условия задачи [1]:

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

$$\bar{u}_i + C_{ik}(x,y)\sigma_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial n} \Big|_{S_{ik}} = \bar{\varphi}_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, K_i, \quad i = 1, 2, \dots, M, (6)$$

$$\bar{u}_i - \bar{u}_{i+1} \Big|_{\gamma_i} = 0, \quad \sigma_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial n} + \sigma_{i+1} \frac{\partial \bar{u}_{i+1}}{\partial n} \Big|_{\gamma_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M - 1, (7)$$

$$\sigma_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial n} \Big|_{l_{ip}} = \bar{\psi}_{ip}(x,y,z), \quad p=1,2,\dots, P_i, \quad i = 1,2,\dots,M; \quad (x,y) \in \Omega. (8)$$

Будем предполагать, что решение этой задачи можно найти в аналитическом виде, например, методом интегральных преобразований [9, 14].

Рассмотрим формулу Грина для каждой области $\bar{\Omega}_i$:

$$\iint_{\bar{\Omega}_i} (uLv - vLu)d\Omega_i = \int (u \frac{\partial v}{\partial n} - v \frac{\partial u}{\partial n})dS_i, (9)$$

где $S_i = \bigcup_k S_{ik} + \bigcup_p l_{ip} + \gamma_i + \gamma_{i-1}$.

Подставив в формулу (9) вместо функции v функцию Грина $G_i(P,Q)$, определяемую в $\bar{\Omega}_i$ решением краевой задачи (1) – (4), получим обобщенное интегральное представление Грина решения краевой задачи (5) – (8) в области $\bar{\Omega}_i$:

$$\begin{aligned} -v_i \bar{u}_i(x,y) + \frac{1}{\sigma_i} \sum_{j=1}^{N_i} I_{ij} G_i(x,y,x_{ij},y_{ij}) = \\ = \sum_{k=1}^{K_{li}} \int_{S_{ik}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial n} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n}) dS_{ik} + \\ + \sum_{k=K_{li+1}}^{K_i} \int_{S_{ik}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial n} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n}) dS_{ik} + \\ + \sum_{p=1}^{P_{li}} \int_{l_{ip}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial n} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n}) dl_{ip} + \\ + \sum_{p=P_{li+1}}^{P_i} \int_{l_{ip}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial n} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n}) dl_{ip} + \\ + \int_{\gamma_{i-1}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial n} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n}) d\gamma_{i-1} + \\ + \int_{\gamma_i} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial n} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n}) d\gamma_i; \end{aligned} (10)$$

где $v_i=1$, если $(x,y) \in \Omega_i$, $v_i=1/2$, если $(x,y) \in S_i$, $v_i=0$, если $(x,y) \notin \Omega_i$.

При $i = 1$ в правой части (10) отсутствует пятый член суммы, а при $i = M$ отсутствует последний. Умножив обе части (10) на σ_i и просуммировав по i от 1 до M , получим интегральное представление решения задачи (5) – (8) в области $\bar{\Omega}$:

$$\begin{aligned} -\sum_{i=1}^M \sigma_i v_i \bar{u}_i(x,y) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} I_{ij} G_i(x,y,x_{ij},y_{ij}) = \\ = \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{k=1}^{K_{li}} \int_{S_{ik}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial n} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n}) dS_{ik} + \end{aligned}$$

продолжение формулы...

окончание формулы.

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=M_1+1}^M \sum_{k=1}^{K_{1i}} \int_{S_{ik}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dS_{ik} + \\
& + \sum_{i=1}^M \sum_{k=K_{1i+1}}^{K_i} \int_{S_{ik}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dS_{ik} + \\
& + \sum_{i=1}^{M_3} \sum_{p=1}^{P_{1i}} \int_{l_{ip}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dl_{ip} + \\
& + \sum_{i=M_3+1}^M \sum_{p=1}^{P_{1i}} \int_{l_{ip}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dl_{ip} + \\
& + \sum_{i=1}^M \sum_{p=P_{1i}+1}^{P_i} \int_{l_{ip}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dl_{ip} + \\
& + \sum_{i=2}^{M_2+1} \int_{\gamma_{i-1}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) d\gamma_{i-1} + \\
& + \sum_{i=1}^{M_2} \int_{\gamma_i} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) d\gamma_i + \\
& + \sum_{i=M_2+2}^M \int_{\gamma_{i-1}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) d\gamma_{i-1} + \\
& + \sum_{i=M_2+1}^{M-1} \int_{\gamma_i} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) d\gamma_i, \quad (11)
\end{aligned}$$

где $\frac{\partial G_i}{\partial N} = \sigma_i \frac{\partial G_i}{\partial n}$, $\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N} = \sigma_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial n}$, $\frac{\partial G_i}{\partial N} = \sigma_i \frac{\partial G_i}{\partial n}$.

Упростим выражение (11). Второй член левой части (11) — неизвестная функция, поэтому введем обозначения:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_j} I_{ij} G_i(x, y, x_{ij}, y_{ij}) = F_1(p), \quad P = (x, y). \quad (12)$$

Рассмотрим в (12) первую сумму справа. Из граничных условий (6) и (2) выразим $\partial G_i / \partial N$ и $\partial \bar{U}_i / \partial N$ через G_i , \bar{U}_i и $\bar{\varphi}_{ik}$ подставим полученные выражения в эту сумму и после некоторых преобразований получим:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{k=1}^{K_{1i}} \int_{S_{ik}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dS_{ik} = \\
& = - \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{k=1}^{K_{1i}} \int_{S_{ik}} \frac{G_i(P, Q) \bar{\varphi}_{ik}}{C_{ik}(Q)} dS_{ik} = F_2(p). \quad (13)
\end{aligned}$$

Четвертая сумма справа в (7) с учетом условий (8) и (4) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^{M_3} \sum_{p=1}^{P_{1i}} \int_{l_{ip}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dl_{ip} = \\
& = - \sum_{i=1}^{M_3} \sum_{p=1}^{P_{1i}} \int_{l_{ip}} G_i(P, Q) \varphi_{ip}(Q) dl_{ip} = F_3(p). \quad (14)
\end{aligned}$$

Рассмотрим седьмую и восьмую суммы.

Очевидно, что

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=2}^{M_2+1} \int_{\gamma_{i-1}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) d\gamma_{i-1} + \\
& + \sum_{i=1}^{M_2} \int_{\gamma_i} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) d\gamma_i = \\
& = \int_{\gamma_1} (\bar{U}_2 \frac{\partial G_2}{\partial N} - G_2 \frac{\partial \bar{U}_2}{\partial N}) d\gamma_1 + \\
& + \int_{\gamma_1} (\bar{U}_1 \frac{\partial G_1}{\partial N} - G_1 \frac{\partial \bar{U}_1}{\partial N}) d\gamma_1 + \dots + \\
& + \int_{\gamma_{M_2}} (U_{M_2+1} \frac{\partial G_{M_2+1}}{\partial N} - G_{M_2+1} \frac{\partial \bar{U}_{M_2+1}}{\partial N}) d\gamma_{M_2} + \\
& + \int_{\gamma_{M_2}} (\bar{U}_{M_2} \frac{\partial G_{M_2}}{\partial N} - G_{M_2} \frac{\partial \bar{U}_{M_2}}{\partial N}) d\gamma_{M_2} = 0, \quad (15)
\end{aligned}$$

что следует из условия (7) и (3).

Таким образом, с учетом (8) – (11) интегральное представление Грина упрощается и принимает вид:

$$\begin{aligned}
& - \sum_{i=1}^M \sigma_i \bar{U}_i = \sum_{i=M_1+1}^M \sum_{k=1}^{K_{1i}} \int_{S_{ik}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dS_{ik} + \\
& + \sum_{i=1}^M \sum_{k=K_{1i+1}}^{K_i} \int_{S_{ik}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dS_{ik} + \\
& + \sum_{i=M_3+1}^M \sum_{p=1}^{P_{1i}} \int_{l_{ip}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dl_{ip} + \\
& + \sum_{i=1}^M \sum_{p=P_{1i}+1}^{P_i} \int_{l_{ip}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) dl_{ip} + \\
& + \sum_{i=M_2+2}^M \int_{\gamma_{i-1}} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) d\gamma_{i-1} + \\
& + \sum_{i=M_2+1}^{M-1} \int_{\gamma_i} (\bar{U}_i \frac{\partial G_i}{\partial N} - G_i \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial N}) d\gamma_i + F(P), \quad (16)
\end{aligned}$$

где $F(P) = -F_1(P) + F_2(P) + F_3(P)$.

Интегральное представление (16) не содержит неизвестных искомым функций и их производных по участкам границы многосвязной области $\bar{\Omega}$, которые включены в граничную задачу (1) – (4), определяющую функцию Грина.

Замечание.

Если $M_1 = M$, $K_{1i} = K_i$, $M_2 = M$, $M_3 = M$, то решение задачи (5) – (8) находится в явном виде, которое, как нетрудно видеть, совпадает с решением, полученным по методу Грина.

Список литературы

1. Карабельская И.В. Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложными геометрическими параметрами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2015. — Т. 11. — № 1. — С. 45-51.
2. Карабельская И.В. Примеры расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2015. — Т. 11. — № 2. — С. 23-29.
3. Карабельская И.В. Методы расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии в неоднородных и клиновидных средах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2015. — Т. 11. — № 4. — С. 25-33.
4. Карабельская И.В., Абызбаев И.И., Ахметов И.В., Майский Р.А., Янченко С.В. Моделирование методов исследования скважин на основе обобщенной формулы Грина // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2016. — Вып. 2 (104). — С. 18-27.
5. Иванов В.Т., Болотнов А.М., Гадилова Ф.Г., Кильдибекова Г.Я., Кризский В.Н., Надергулов И.У., Карабельская И.В. Комплекс программно-алгоритмического обеспечения численных исследований электрических полей в некоторых сложных системах // Известия вузов: Электромеханика. — 1987. — № 11. — С. 21-26.
6. Иванов В.Т., Болотнов А.М., Гадилова Ф.Г., Кильдибекова Г.Я., Кризский В.Н., Надергулов И.У., Карабельская И.В. Комплекс программно-алгоритмического обеспечения численных исследований электрических полей в некоторых сложных системах // I Всесоюз. конф. по теоретической электро-технике: тез. докл. — Ташкент, 1987. — С. 34-35.
7. Болотнов А.М., Иванов В.Т., Кильдибекова Г.Я., Карабельская И.В. Методы расчета трехмерных краевых задач для эллиптических уравнений в многосвязных областях с цилиндрическими границами. — Деп. в ВИНТИ 4.12.86. № 8870. — В 86. — Уфа: БГУ, 1986. — 49 с.
8. Ураков А.Р., Карамов В.И., Карабельская И.В. Исследования автомодельных процессов нестационарной ЭХО // Современная электротехнология в машиностроении: сб. тр. Всеросс. науч.-техн. конф. — Тула, 1997. — С. 161-162.
9. Иванов В.Т., Гусев В.Г., Фокин А.Н. Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки. — М.: Машиностроение, 1986. — 211 с.
10. Андреев И.Н. Коррозия металлов и их защита. — Казань: Татарское кн. изд-во, 1979. — 120 с.
11. Заборовский А.И. Электроразведка. — М.: Гостехнефиздат, 1948.
12. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. — М.: Недра, 1981. — 334 с.
13. Козырин А.К. Электрическая корреляция разрезов скважин. — М.: Недра, 1985.
14. Иванов В.Т., Масютина М.С. Методы решения прямых и обратных задач электрокаротажа. — М.: Наука, 1983. — 143 с.
15. Иванов В.Т. Некоторые проблемы вычислительной математики применительно к расчетам электрических полей в электрохимических системах / Препринт докл. Президиуму БФАН СССР. — Уфа: БФАН СССР, 1983. — 39 с.
16. Самарский А.А. Проблемы применения вычислительной техники // Вестник АН СССР. — 1984. — № 11. — С. 17-29.
17. Иванов В.Т. // Теория информационных систем и систем управления с распределенными параметрами: тез. докл. Всесоюз. конф. — Уфа: БФАН СССР, 1976. — Ч. 1. — С. 19-20.
18. Иванов В.Т. Методы расчета трехмерных электрических полей в электролитах // Краевые задачи математической физики и их приложения. — Уфа: БФАН СССР, 1976. — С. 18-53.
19. Иванов В.Т., Глазов Н.П., Махмутов М.М. Расчет трехмерных электрических полей в неоднородной среде с протяженными тонкими цилиндрическими электродами // Электричество. — 1985. — № 6. — С. 48-52.
20. Самарский А.А. Введение в численные методы. — М.: Наука, 1982. — 271 с.

References

1. Karabel'skaya I.V. Issledovaniya elektricheskikh polei postoyannogo toka v sistemakh so slozhnymi geometricheskimi parametrami // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. — 2015. — T. 11. — № 1. — S. 45-51.
2. Karabel'skaya I.V. Primery rascheta elektricheskikh polei pri elektrokhimicheskoi zashchite truboprovodov ot korrozii // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. — 2015. — T. 11. — № 2. — S. 23-29.
3. Karabel'skaya I.V. Metody rascheta elektricheskikh polei pri elektrokhimicheskoi zashchite truboprovodov ot korrozii v neodnorodnykh i klinovidnykh sredakh // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. — 2015. — T. 11. — № 4. — S. 25-33.
4. Karabel'skaya I.V., Abyzbaev I.I., Akhmetov I.V., Maiskii R.A., Yanchenko S.V. Modelirovanie metodov issledovaniya skvazhin na osnove obobshchennoi formuly Grina // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov. — 2016. — Vyp. 2 (104). — S. 18-27.
5. Ivanov V.T., Bolotnov A.M., Gadilova F.G., Kil'dibekova G.Ya., Krizskii V.N., Nadergulov I.U., Karabel'skaya I.V. Kompleks programmno-algoritmicheskogo obespecheniya chislennykh issledovaniy elektricheskikh polei v nekotorykh slozhnykh sistemakh // Izvestiya vuzov: Elektromekhanika. — 1987. — № 11. — S. 21-26.
6. Ivanov V.T., Bolotnov A.M., Gadilova F.G., Kil'dibekova G.Ya., Krizskii V.N., Nadergulov I.U., Karabel'skaya I.V. Kompleks programmno-algoritmicheskogo obespecheniya chislennykh issledovaniy elektricheskikh polei v nekotorykh slozhnykh sistemakh // I Vsesoyuzn. konf. po teoreticheskoi elektrotekhnike: tez. dokl. — Tashkent, 1987. — S. 34-35.

7. Bolotnov A.M., Ivanov V.T., Kil'dibekova G.Ya., Karabel'skaya I.V. Metody rascheta trekhmernykh kraevykh zadach dlya ellipticheskikh uravnenii v mnogovyazykh oblastiakh s tsilindricheskimi granitsami. — Dep. v VINITI 4.12.86. № 8870. — V 86. — Ufa: BGU, 1986. — 49 s.
8. Urakov A.R., Karamov V.I., Karabel'skaya I.V. Issledovaniya avtomodel'nykh protsessov nestatsionarnoi EKHO // Sovremennaya elektrotekhnologiya v mashinostroenii: sb. trudov Vseross. nauch.-tekhn. konf. — Tula, 1997. — S. 161-162.
9. Ivanov V.T., Gusev V.G., Fokin A.N. Optimizatsiya elektricheskikh polei, kontrol' i avtomatizatsiya gal'vanoobrabotki. — M.: Mashinostroenie, 1986. — 211 s.
10. Andreev I.N. Korroziya metallov i ikh zashchita. — Kazan': Tatarskoe kn. izd-vo, 1979. — 120 s.
11. Zaborovskii A.I. Elektrorazvedka. — M.: Gostekhnefizdat, 1948.
12. Dakhnov V.N. Elektricheskie i magnitnye metody issledovaniya skvazhin. — M.: Nedra, 1981. — 334 s.
13. Kozyrin A.K. Elektricheskaya korrelyatsiya razrezov skvazhin. — M.: Nedra, 1985.
14. Ivanov V.T., Masyutina M.S. Metody resheniya pryamykh i obratnykh zadach elektrokartazha. — M.: Nauka, 1983. — 143 s.
15. Ivanov V.T. Nekotorye problemy vychislitel'noi matematiki primenitel'no k raschetam elektricheskikh polei v elektrokhimicheskikh sistemakh / Preprint dokl. Prezidiumu BFAN SSSR. — Ufa: BFAN SSSR, 1983. — 39 s.
16. Samarskii A.A. Problemy primeneniya vychislitel'noi tekhniki // Vestnik AN SSSR. — 1984. — № 11. — S. 17-29.
17. Ivanov V.T. // Teoriya informatsionnykh sistem i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami: tez. dokl. Vsesoyuzn. konf. — Ufa: BFAN SSSR, 1976. — Ch. 1. — S. 19-20.
18. Ivanov V.T. Metody rascheta trekhmernykh elektricheskikh polei v elektrolitakh // Kraevye zadachi matematicheskoi fiziki i ikh prilozheniya. — Ufa: BFAN SSSR, 1976. — S. 18-53.
19. Ivanov V.T., Glazov N.P., Makhmutov M.M. Raschet trekhmernykh elektricheskikh polei v neodnorodnoi srede s protyazhennymi tonkimi tsilindricheskimi elektrodami // Elektrichestvo. — 1985. — № 6. — S. 48-52.
20. Samarskii A.A. Vvedenie v chislennye metody. — M.: Nauka, 1982. — 271 s.



Решетняк С. Н.

Reshetnyak S. N.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

УДК 622:621.31

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЛАСТИНЧАТОГО ПИТАТЕЛЯ

Развитие современной экономики подразумевает внедрение современных средств и новейших технологий в процесс добычи и переработки полезного ископаемого. Новые технологии предусматривают повышенную энергоэффективность и дают возможность снизить потребление электроэнергии, что, в свою очередь, позволит снизить себестоимость добычи и переработки полезного ископаемого. Также следует отметить, что современные системы управления позволяют значительно снизить влияние человеческого фактора на принятие решения.

В процессе транспортировки полезного ископаемого значительное место занимают машины непрерывного действия, к которым можно отнести конвейерные линии различного назначения. Основным элементом по транспортировке полезного ископаемого в пределах обогатительной фабрики является пластинчатый питатель.

В представленной статье рассмотрены различные способы управления системой электропривода пластинчатого питателя обогатительной фабрики. Рассмотрены достоинства и недостатки системы управления электроприводом преобразователем частоты со скалярным и пространственно-векторным управлением, влияние работы системы электропривода с преобразователем частоты на питающую сеть, также рассмотрена технологическая цепочка обогатительной фабрики по переработке железной руды и определен круг систем электроприводов, необходимых для модернизации. Анализ систем электроприводов с различными способами управления позволяет сделать вывод, что при использовании пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции в значительной степени расширяется возможность ее использования для ряда машин и механизмов непрерывного действия.

Ключевые слова: питатель обогатительной фабрики, электропривод питателя, система управления, скалярное управление, векторное управление.

THE PROSPECTS FOR APPLICATION OF SPACE VECTOR MODULATION IN THE MOTOR DRIVE SYSTEM OF THE FEEDER PLATE

The development of the modern economy implies the introduction of modern means and latest technologies in the production process of mineral processing. New technologies provide increased efficiency and provide an opportunity to reduce electricity consumption. This in turn will reduce the cost of extraction and processing of minerals. It should also be noted that modern management systems can significantly reduce the influence of human factors on decision making.

In the process of transportation of minerals, a significant place is occupied by the machines of continuous action, which include conveyor line for various purposes. The main element for transportation of minerals within the concentrator is a rotary vane feeder.

The paper presents the various ways the management system of the drive plate of the feeder concentrator. The advantages and disadvantages of electric drive control system of the frequency converter with a scalar and space vector control, the impact of the system of the electric drive with frequency converter on the supply network. Also considered technological chain of processing plant for processing iron ore and identified a number of electric drives required for modernization. Analysis of systems of electric drives with different control methods leads to the conclusion that when using the space-vector pulse-width modulation greatly expands the possibility of its use for a number of cars and mechanisms of continuous action.

Key words: feeder concentrator, electric feeder, control system, scalar control, vector control.

В настоящее время большое внимание уделяется современным энергоэффективным технологиям, способным снизить себестоимость разведки, добычи и переработки полезных ископаемых [1, 2]. Разрабатываются инновационные сценарии исследования энергетической эффективности в рамках предприятий по добыче и переработке полезного ископаемого с использованием мультипликационных (энергоинформационных) моделей на базе нечеткой логики по всему технологическому циклу [3].

Энергоинформационная модель предприятия минерально-сырьевого комплекса на основе топологических матриц, содержащих необходимые сведения о техническом состоянии оборудования, позволит получить не только номинальные значения, а значения в режиме реального времени. Эту информацию можно использовать не только как числовые значения переменных, но также как и систему информационной поддержки управления жизненным циклом электро-технического комплекса элементов [4].

Помимо энергоинформационных моделей разрабатываются новые энергоэффективные режимы работы оборудования, которые позволяют повысить производительность и снизить удельные показатели электропотребления [5].

Развитие современных систем управления электроприводом позволяет значительно расширить область применения, в частности на пластинчатый питатель. Данное устройство представляет собой систему транспортировки горной массы для ее равномерной подачи в дробильный комплекс. В качестве транспортируемого материала могут выступать: руда, уголь, известняк, горячие заготовки, другое сырье, которое является питанием дробильного комплекса.

Первый подобный питатель был сконструирован в 1878 году и имел паровой двигатель. Устройство применялось при добыче золота Верхне-Амурской компанией (Россия). В дальнейшем подобные устройства с использованием электрических двигателей нашли широкое применение при добыче других полезных ископаемых.

Все пластинчатые питатели подразделяются на средние и тяжелые. Средние питатели позволяют транспортировать куски диаметрами не более 50 см, тяжелые питатели позволяют транспортировать сырье диаметрами до 120 см.

В качестве системы электропривода в большинстве случаев применяется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, включенный непосредственно в питающую линию, иногда применяются асинхронные многоскоростные электроприводы. Однако в последнее время система управления электроприводом значительно модернизируется за счет использования статических преобразователей частоты [6, 7].

Система «преобразователь частоты — асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) представляет собой двухзвенный преобразователь частоты, в качестве нагрузки которого выступает асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Использование данной системы позволяет получить возможность регулирования скорости движения пластинчатого питателя и,

как следствие, регулировать подачу руды в технологическую цепь обогатительной фабрики, а также значительно повысить точность управления системы электропривода на резкое изменение нагрузки на питателе.

Технологическая цепь обогатительной фабрики по переработке железной руды представлена на рисунке 1. Железная необогащенная сидерито-мартитовая руда подается из карьера на перегрузочный склад железнодорожным транспортом. Аглолуда с перегрузочного склада в приемный бункер обогатительной фабрики подается автосамосвалами. Из приемного бункера пластинчатым питателем 1-24-120 аглолуда подается на колосниковый грохот, где производится классификация материала по крупности. Надрешетный продукт грохота поступает в щековую дробилку. Дробленый и подрешетный продукты ленточным конвейером ЛК № 2 подаются в промежуточные бункера линий среднего дробления № 1 и № 2. Из промежуточных бункеров аглолуда пластинчатыми питателями 1-15-45 подается на грохот ГИТ-52М. Производительность пластинчатого питателя регулируется ступенчато, путем изменения частоты вращения 4-скоростных асинхронных электродвигателей. Подрешетный продукт грохота является готовым продуктом процесса переработки. Подрешетный продукт конвейерами ЛК № 10, ЛК № 26, ЛК № 27, ЛК № 28 подается на реверсивный катучий (передвижной) конвейер ЛК № 29. Надрешетный продукт грохота поступает в дробилки среднего дробления на домол. Согласно технологической цепи в процессе переработки принимают участие 12 пластинчатых питателей, поэтому модернизация их системы управления электроприводами за счет более современных систем управления является актуальной задачей.

В состав современных электромеханических систем горного оборудования входят статические полупроводниковые преобразователи, которые позволяют адаптировать режимы работы электромеханических систем под конкретные показатели энергоэффективности, а именно показатели максимального грузопотока, максимальной производительности, минимального потребления электрической энергии, снижения динамических нагрузок и т.д. Однако при работе статических преобразователей, к которым следует отнести преобразователь частоты (система электропривода: «преобразователь частоты — асинхронный двигатель») и управляемый выпрямитель (система электропривода: «управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока»), значительно повышается уровень высших гармоник в системе электроснабжения, что крайне негативно влияет на качество электрической сети предприятия. Вопросы повышения качества энергетических показателей на предприятиях минерально-сырьевого кластера являются достаточно актуальными в современных энергоэффективных системах электропривода горных машин и механизмов [8, 9].

Система управления электроприводами может быть выполнена с использованием двух методов частотного управления: скалярного и векторного. Наиболее распространены системы частотного управ-

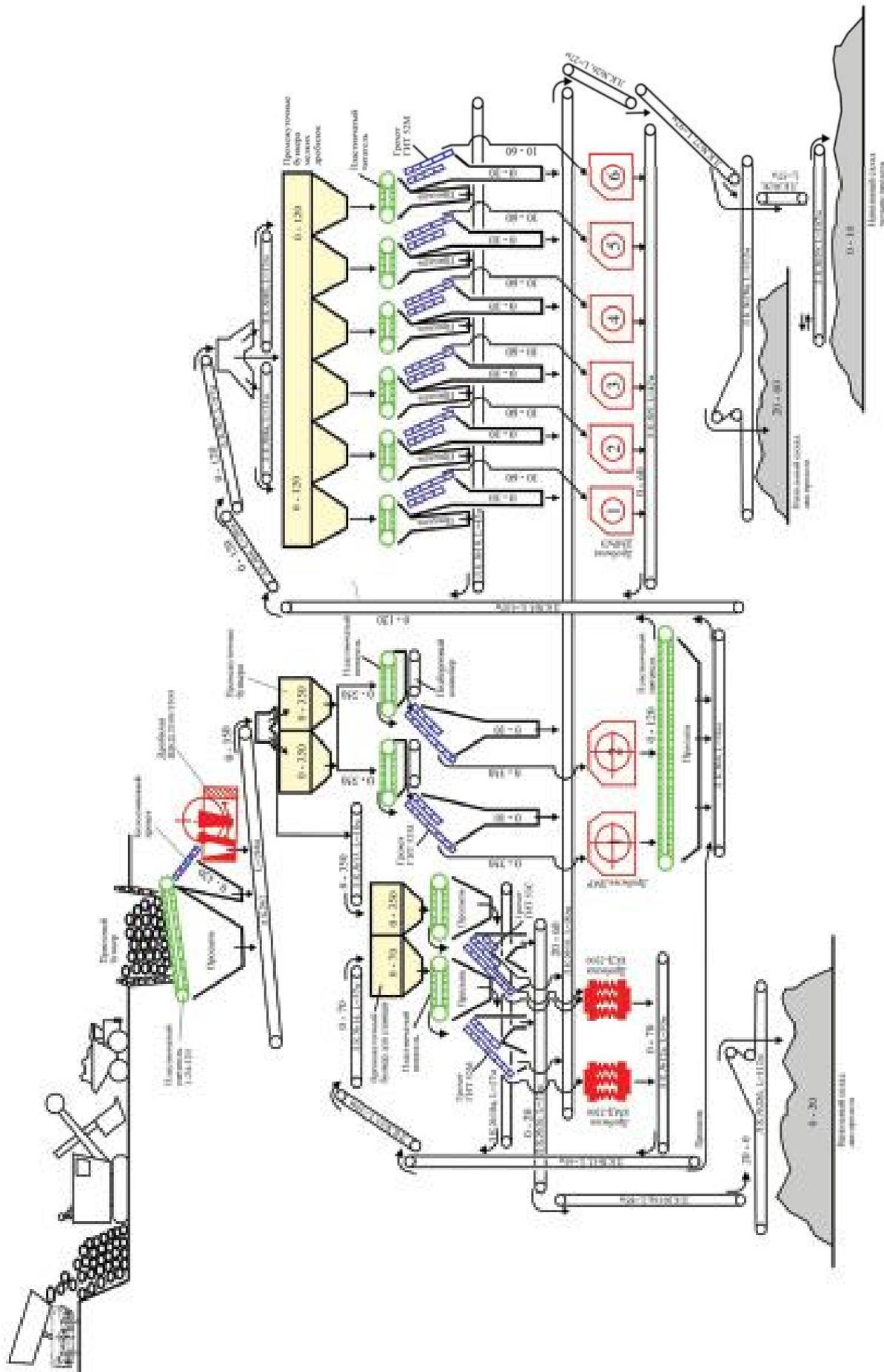


Рисунок 1. Технологическая схема переработки руды

ления электроприводами со скалярным управлением, благодаря чему обеспечивается постоянная перегрузочная способность асинхронного двигателя практически во всем диапазоне частот. Исключением является работа системы управления электроприводом на низких частотах, где возможно значительное снижение момента двигателя. Реализация этой схемы управления возможна при наличии в системе управления двух датчиков скорости и момента. Однако следует отметить, что скалярное управление асинхронным двигателем возможно только по одному из параметров: скорость или момент двигателя, по этой причине одновременное регулирование скорости и момента приводного двигателя невозможно, поэтому выбирается наиболее важный параметр в силу условий технологического процесса [10]. Функциональная схема

системы асинхронного электропривода со скалярным управлением представлена на рисунке 2.

Решение задачи возможно при использовании пространственно-векторного управления асинхронного электропривода. Функциональная схема системы асинхронного электропривода с пространственно-векторным управлением представлена на рисунке 3.

На начальном этапе производства асинхронных электроприводов с пространственно-векторным управлением использовались электродвигатели с встроенными датчиками потока, что значительно ограничивало их область применения [11].

Развитие теории систем управления электроприводами позволило создать систему управления, содержащую математическую модель электропривода,

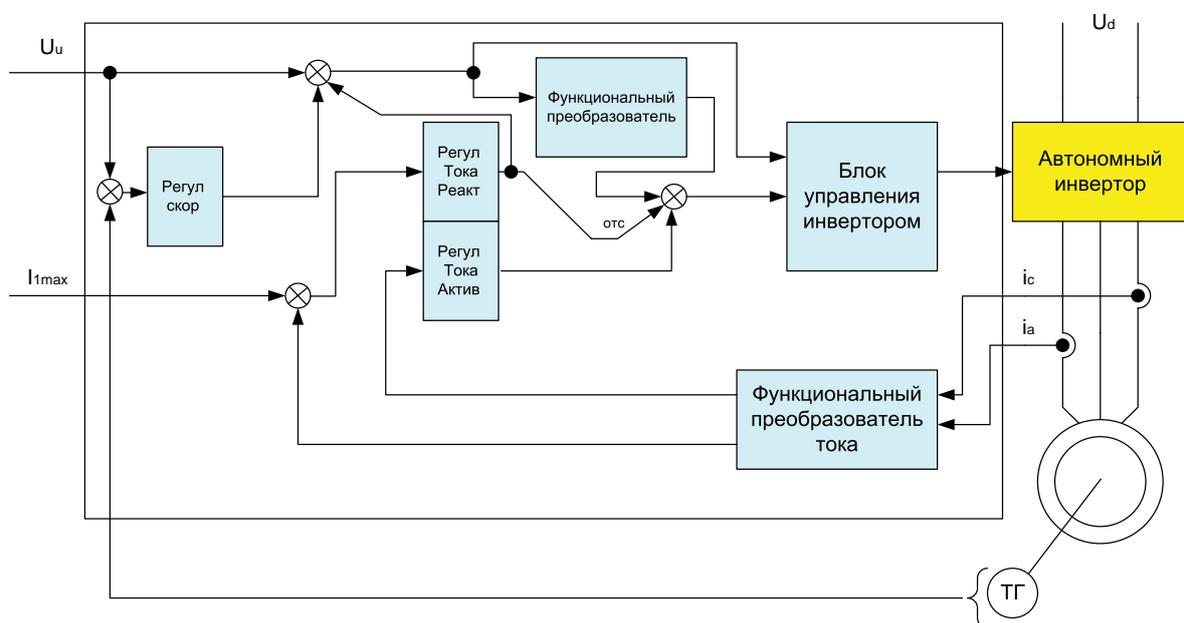


Рисунок 2. Функциональная схема системы асинхронного электропривода со скалярным управлением

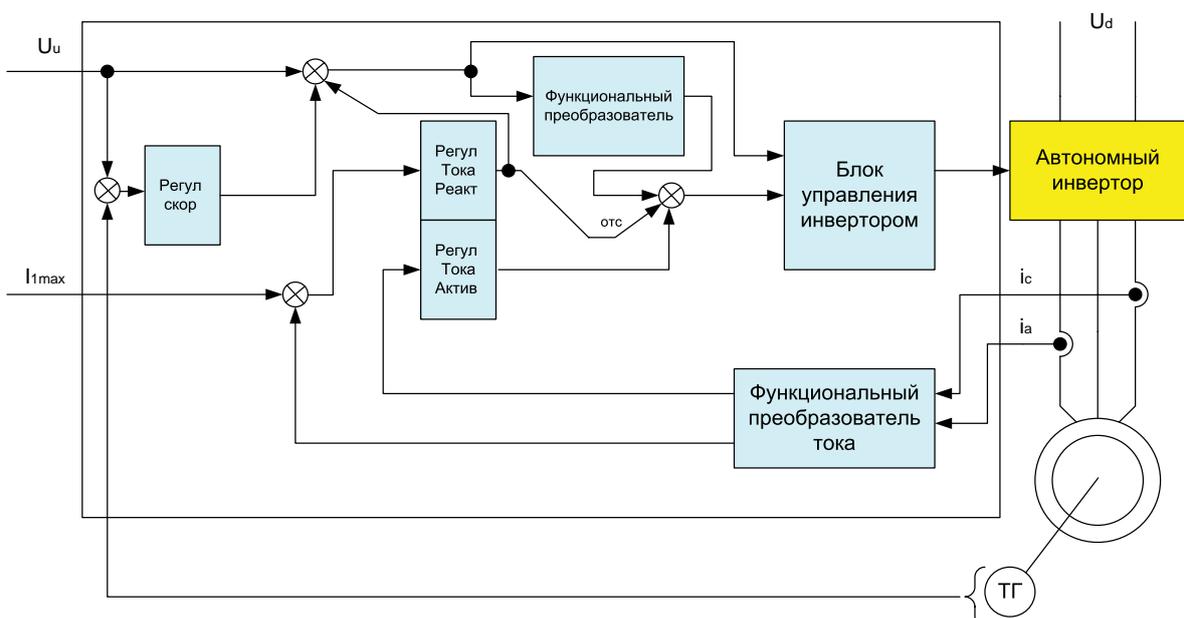


Рисунок 3. Функциональная схема системы асинхронного электропривода с пространственно-векторным управлением без датчика скорости

позволяющую производить вычисление скорости вращения и момента вала двигателя.

Исходными параметрами для вычисления являются значения токов фаз статора, получение этих данных не является трудной задачей. К сегодняшнему дню сформировано несколько систем пространственно-векторного управления с датчиком скорости и без него.

Стратегия построения пространственно-векторного управления базируется на векторном представлении совокупности выходных напряжений многофазного инвертора. Силовая система автономного инвертора напряжения содержит шесть ключей, каждый из которых может находиться в одном из двух состояний: включенном или выключенном. Каждая комбинация состояний ключей обеспечивает определенную совокупность линейных и фазных напряжений на выходе инвертора, т.е. определенный вектор выходных напряжений.

Алгоритм управления ключами автономного инвертора в режиме пространственно-векторной модуляции основан на формировании на каждом временном интервале требуемого положения вектора напряжения в пространстве. В импульсном источнике питания возможно формирование восьми состояний (положений) вектора напряжения, включая два нулевых, формируемых инвертором при замыкании нечетных и четных ключей [12].

Трехфазный электропривод АИН с ШИМ должен формировать мгновенные значения напряжений (средние за период несущей частоты) на трех фазах. Переключение каждого вентиля изменяет напряжения на всех фазах. Это осложняет разработку алгоритма

управления вентилями. Управление упрощается, если формировать не фазные напряжения (векторы фазных напряжений), а перейти к формированию пространственного (не временного) вектора, введенного в теории электрических машин.

Согласно этой теории, три симметричных фазных напряжения при отсутствии нулевого провода могут быть представлены одним пространственным вектором (space vector), однозначно определяющим эти напряжения. В литературе этот вектор называют также обобщенным вектором, результирующим вектором, коммутирующим вектором [12].

Традиционные методы ШИМ основаны на сравнении сигнала задания с сигналом пилообразного напряжения, в результате чего в обмотках АД формировалась последовательность прямоугольных импульсов, скважность которых изменялась в соответствии с сигналом задания. Однако из-за влияния электромагнитных процессов (прежде всего ЭДС вращения) характер изменения токов в обмотках не имеет однозначной связи с законом изменения сигнала управления и сильно зависит от режима работы АД.

Проведя анализ систем электроприводов с различными способами управления, делаем вывод, что при использовании пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции система электропривода отличается повышенной устойчивостью к возмущающим воздействиям, быстродействием, возможностью отсутствия датчика скорости, повышенным за счет снижения потерь из-за намагничивания и нагрева КПД двигателя, что в значительной степени расширяет возможности ее применения для ряда машин и механизмов.

Список литературы

1. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. Improving the energy performance of industrial enterprises // Miner's week — 2015: Reports of the XXIII international scientific conference. — 2015. — P. 570-573.
2. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. Energy efficient resonant mode of electromechanical system mining machines based on management structures with PID-controller // Miner's week — 2015: Reports of the XXIII international scientific conference. — 2015. — P. 608-612.
3. Lyakhomsky A.V., Perfil'eva E.N., Petrochenkov A.B. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises // Russian Electrical Engineering. — 2015. — Т. 86. — № 6. — P. 305-308.
4. Petrochenkov A.B. An information of industrial electrotechnical complexes // Russian Electrical Engineering. — 2015. — Т. 86. — № 6. — P. 692-696.
5. Фашиленко В.Н. Теория управляемого электромеханического резонанса. — Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. — Ч. 1. — 101 с.

6. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для вузов // Серия «Высшее профессиональное образование: Электротехника». — 2-е изд., стер. — М.: Академия, 2006. — 304 с.
7. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для вузов. — 2-е изд., стер. — М.: Академия, 2008. — 288 с.
8. Шевырëв Ю.В. Повышение качества электрической энергии в сетях с полупроводниковыми преобразователями // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 4. — С. 234-241.
9. Осипов О.И., Бабкин Е.А., Шевырëв Ю.В. Энергетические показатели электротехнического комплекса буровой установки // Вестник МЭИ. — 2010. — № 1. — С. 42-45.
10. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов. — М.: Академия, 2006. — 272 с.
11. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: учеб. пособие. — М.: Наука и техника, 2006. — 320 с.
12. Алексеев В.В., Вершимин В.И., Козярук А.Е., Язев В.Н. Выбор типа модели асинхронного двигателя

при компьютерном моделировании электро-механических процессов, протекающих в частотных электроприводах с алгоритмами скалярного и векторного управления. — URL: <http://www.online-electric.ru/confer.php>.

References

1. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. Improving the energy performance of industrial enterprises // Miner's week — 2015: Reports of the XXIII international scientific conference. — 2015. — P. 570-573.
2. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. Energy efficient resonant mode of electromechanical system mining machines based on management structures with PID-controller // Miner's week — 2015: Reports of the XXIII international scientific conference. — 2015. — P. 608-612.
3. Lyakhomsky A.V., Perfil'eva E.N., Petrochenkov A.B. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises // Russian Electrical Engineering. — 2015. — T. 86. — № 6. — P. 305-308.
4. Petrochenkov A.B. An information of industrial electrotechnical complexes // Russian Electrical Engineering. — 2015. — T. 86. — № 6. — P. 692-696.
5. Fashchilenko V.N. Teoriya upravlyаемого elektromekhanicheskogo rezonansa. — Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. — Ch. 1. — 101 s.
6. Terekhov V.M., Osipov O.I. Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik dlya vuzov // Seriya «Vysshee professional'noe obrazovanie: Elektrotehnika». — 2-e izd., ster. — M.: Akademiya, 2006. — 304 s.
7. Onishchenko G.B. Elektricheskii privod: uchebnik dlya vuzov. — 2-e izd., ster. — M.: Akademiya, 2008. — 288 s.
8. Shevyrev Yu.V. Povyshenie kachestva elektricheskoi energii v setyakh s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami // Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. — 2011. — № 4. — S. 234-241.
9. Osipov O.I., Babkin E.A., Shevyrev Yu.V. Energeticheskie pokazateli elektrotekhnicheskogo kompleksa burovoi ustanovki // Vestnik MEI. — 2010. — № 1. — S. 42-45.
10. Sokolovskii G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem: uchebnik dlya vuzov. — M.: Akademiya, 2006. — 272 s.
11. Petrushin V.S. Asinkhronnye dvigateli v regulirovanii elektroprivode: ucheb. posobie. — M.: Nauka i tekhnika, 2006. — 320 s.
12. Alekseev V.V., Vershimin V.I., Kozyaruk A.E., Yazev V.N. Vybor tipa modeli asinkhronnogo dvigatelya pri komp'yuternom modelirovanii elektromekhanicheskikh protsessov, protekayushchikh v chastotnykh elektroprivodakh s algoritмами skalyarnogo i vektornogo upravleniya. — URL: <http://www.online-electric.ru/confer.php>.



Мельничук О. В.
Melnichuk O. V.

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



Фетисов В. С.
Fetisov V. S.

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

УДК 621.355.9

ОСОБЕННОСТИ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЭТИМИ ПРОЦЕССАМИ

Статья представляет собой обзор методов и средств организации правильной работы литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторных батарей, обеспечивающих их эффективную работу и длительный срок службы.

Рассмотрен классический алгоритм зарядки отдельной ячейки такого аккумулятора, включающий в себя три последовательные фазы: предварительную зарядку малым током для случая, если ячейка претерпела до этого глубокий разряд; зарядку постоянным током до уровня 4,2 В и зарядку постоянным напряжением при убывающем до минимума токе.

Описаны различные устройства для работы с литиевыми аккумуляторами: защитные контроллеры, которые предохраняют аккумулятор от опасных режимов работы в течение всего жизненного цикла и которые обычно встраивают в корпус аккумулятора; контроллеры зарядки, которые могут иметь различные схемы и алгоритмы работы, в частности для работы с отключением нагрузки при зарядке или без отключения. Описаны соответствующие специализированные микросхемы.

Особое внимание уделено обеспечению процессов заряда-разряда многосекционных литиевых батарей, в которых ячейки соединены последовательно. В этом случае важно поддерживать одинаковый уровень заряда всех ячеек во всех режимах работы. Для этого предназначены специальные устройства, выполняющие балансировку ячеек. Балансировка может быть пассивной или активной.

Пассивная балансировка заключается в выравнивании напряжения ячеек посредством резисторных байпасных цепей, рассеивающих мощность. Отмечено, что такой метод лучше использовать в недорогих устройствах. Практически вся избыточная энергия от ячеек с большим зарядом рассеивается в виде тепла – это главный недостаток пассивного метода.

В активном методе балансировки для передачи энергии от более заряженных ячеек к менее заряженным используются реактивные элементы индуктивности, емкости или трансформаторы, потери энергии в которых незначительны. Поэтому активный метод гораздо более эффективен, нежели пассивный, однако при этом приходится использовать более дорогие компоненты.

В качестве примеров в статье приводятся описания применения конкретных типов микросхем различных производителей: Texas Instruments, Linear Technology, Maxim, STMicroelectronics и др.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, заряд, разряд, зарядное устройство, защитный контроллер, встраиваемый контроллер, пассивная балансировка, активная балансировка, многосекционная аккумуляторная батарея.

SOME FEATURES OF CHARGING AND DISCHARGING OF LITHIUM RECHARGEABLE BATTERIES AND CORRESPONDING UP-TO-DATE TECHNOLOGIES OF CONTROL

This paper is a review of methods and devices for arrangement of right operation of Li-ion or Li-polymer rechargeable batteries that provides additional duration and long life time of batteries.

The traditional algorithm of charging for single Li-ion cell is considered. Such algorithm includes 3 consecutive steps: preventive charging by small current if the cell was deeply discharged, charging by fixed current up to the level of the cell voltage 4.2 V, and charging by the fixed voltage at the descending current.

Various devices for the service of lithium batteries are described, such as PCM – embedded into the battery protection circuit module that protects a battery from dangerous operational modes during the whole life cycle; charging controllers that may be intended to provide the battery charging with connected or disconnected load. Corresponding specialized integrated circuits are described.

Specially the charging-discharging processes in multi cell batteries with series connection of cells are considered. It is important for such batteries to keep equal voltages of all cells in all modes of operation. Balancing of cells is implemented by special devices. Balancing may be passive or active.

Passive balancing is equalizing of cell voltages by means of shunt resistors dissipating active power. The main disadvantage of passive balancing is that dissipated energy transforms into useless heat. Such method is recommended for inexpensive devices.

Active balancing method is based on energy pumping from cells with redundant charge to cells with insufficient charge by means of reactive elements such as coils, capacitors, transformer. In such case no active energy losses. So active method is more effective than passive one though it requires to use more expensive components.

The paper contains many application examples for mentioned types of integrated circuits of such producers as Texas Instruments, Linear Technology, Maxim, STMicroelectronics and others.

Key words: rechargeable battery, Li-ion accumulator, charging, discharging, charging unit, protection circuit module, embedded controller, passive balancing, active balancing, multi cell battery.

Введение

В настоящее время очень широкое применение в различных областях техники находят аккумуляторы на основе лития [1, 2]. Различные типы таких аккумуляторов используются почти повсеместно – от сотовых телефонов и мобильной компьютерной техники до мощных источников питания транспортных средств, таких как электромобили, беспилотные летательные и подводные аппараты [3]. Наибольшее распространение получили так называемые литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы (это традиционно сложившиеся названия; хотя по сути все литиевые аккумуляторы являются литий-ионными, сейчас же под литий-ионными понимают обычно аккумуляторы ранних разработок с жидким или гелевым электролитом, другие названия связаны с материалом или исполнением электролита или электрода) [4]. Кроме двух названных типов известно большое количество и других аккумуляторов на основе лития (например, для применения на транспорте серийно выпускаются литий-железофосфатные аккумуляторы [5]), но именно эти два подкласса по масштабам их производства значительно превосходят все остальные и имеют много общего как по выходным параметрам, так и в процессах заряда и разряда. Поэтому далее под кратким названием «литиевые» будем подразумевать именно эти две разновидности, хотя многое из того, что предоставляет современная техника для обеспечения качественного заряда-разряда аккумуляторов, применимо и для других типов.

Преимущества литиевых аккумуляторов очевидны: они имеют большую удельную энергетическую емкость (150-250 Вт·ч/кг против 40-80 Вт·ч/кг у основных конкурентов – никель-кадмиевых или никель-металлогидридных аккумуляторов), выдерживают большие импульсные разрядные токи – 20-40С, обладают низким саморазрядом (1%/мес. против 20%/мес. у никель-кадмиевых). Серьезным преимуществом литиевых аккумуляторов является отсутствие «эффекта памяти», а также высокое значение электро-

движущей силы (ЭДС) единичной ячейки (3,6 В против 1,2 В у никель-кадмиевых).

Однако есть и некоторые технические проблемы, которыми сопровождается эксплуатация литиевых аккумуляторов. В первую очередь это относится к чувствительности этих аккумуляторов к глубокому разряду и чрезмерному перезаряду. Недопустим также перегрев или механические повреждения аккумуляторных ячеек. Невыполнение этих условий иногда приводит к возгоранию или взрыву аккумуляторов. Хотя в последние годы появились отдельные типы литиевых аккумуляторов, обладающих повышенной стойкостью к механическим повреждениям (например, литий-серные аккумуляторы [6]), они еще не выпускаются серийно, и проблема пока сохраняется.

Во многих случаях источники питания представляют собой не единичные аккумуляторные ячейки, а наборы таких ячеек (секций), соединенных последовательно в батарее, имеющие необходимое напряжение. В наибольших масштабах налажено массовое производство многосекционных батарей, имеющих от 2 до 6 секций. Для отдельных применений выпускаются многосекционные батареи, имеющие несколько десятков секций.

Особенности электрохимических процессов, протекающих в аккумуляторных ячейках, приводят к тому, что ячейки со временем начинают отличаться друг от друга по энергетической емкости и внутреннему сопротивлению, что приводит к разбалансу – неравномерному распределению напряжения по секциям. Впоследствии, если не принимать специальных мер, это может привести как минимум к снижению эффективности использования батареи (недоиспользования ее емкости), а в худшем случае к глубокому разряду или перезаряду отдельных секций, их перегреву и выходу из строя.

Для соблюдения безопасных режимов заряда и разряда аккумуляторных батарей (АКБ) необходимо снабжать их специальными электронными устройствами, обеспечивающими контроль и выравнивание

напряжений на отдельных секциях. Это особенно актуально для высокоэнергоемких батарей с емкостями ячеек более 5 А•ч.

Устройства контроля и управления процессами заряда-разряда в АКБ построены, как правило, на базе микроконтроллеров и специализированных микросхем. Эти устройства могут быть встроены в саму АКБ, либо во внешние сервисные блоки, например, в зарядные устройства. В автономных компьютерах управление зарядом-разрядом АКБ возлагается на специальную подсистему управления питанием.

1. Особенности процессов заряда-разряда отдельной ячейки литий-ионного аккумулятора. Специализированные встраиваемые контроллеры

Рассмотрим типовой алгоритм заряда ячейки литий-ионного аккумулятора (рисунок 1).

Условно весь процесс разбит на 3 фазы. Первая фаза, так называемый предварительный заряд, включается не всегда, а только в тех случаях, когда аккумулятор сильно разряжен. Если напряжение ячейки ниже 2,8 В, то ее нельзя сразу заряжать номинальным током заряда $I_{з,ном}$: это крайне отрицательно скажется на сроке службы аккумулятора. Поэтому ячейку заряжают сначала малым током примерно до 3,0 В, и только потом – номинальным током. Во второй фазе зарядное устройство работает как источник постоянного тока. При этом напряжение аккумулятора постепенно растет до 4,2 В. Аккумулятор на данный момент заряжен примерно на 70 % своей емкости. Чтобы зарядить ячейку до значений емкости, близких к 100 %, необходимо перейти к третьей фазе: здесь зарядное устройство работает как источник постоянного напряжения. На этом этапе к ячейке приложено постоянное напряжение 4,2 В, а зарядный ток уменьшается от максимума до некоторого заранее заданного минимального значения. В тот момент, когда значение тока уменьшается до этого предела, заряд батареи считается законченным и процесс завершается.

Рассмотренный алгоритм заряда реализован во многих микросхемах, предназначенных для зарядных устройств односекционных литиевых батарей. Для примера рассмотрим контроллер заряда STC4054 компании STMicroelectronics [7].

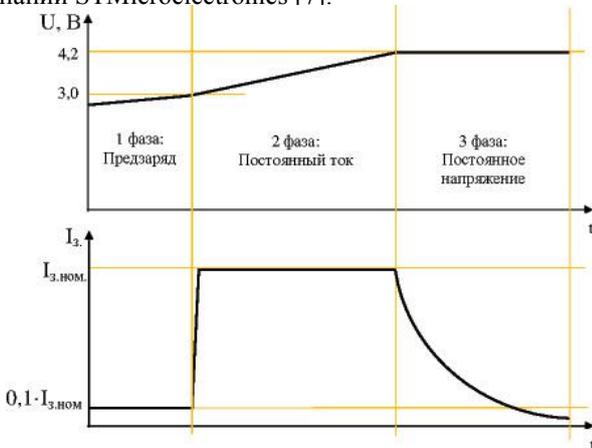


Рисунок 1. Типовой алгоритм заряда ячейки литий-ионного аккумулятора

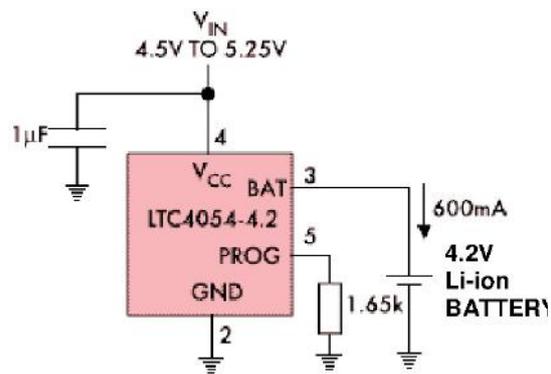


Рисунок 2. Схема включения STC4054

Микросхема STC4054 выполнена в миниатюрном корпусе типа TSOT23-5L. Это позволяет использовать ее в мобильных устройствах с достаточно жесткими требованиями по массе и габаритам. Схема включения STC4054 представлены на рисунке 2.

Как видим, для включения требуется минимальное количество внешних компонентов — не требуются даже внешние MOSFET-транзисторы, вся обвязка ограничивается фильтрующим конденсатором на входе, программирующим резистором (программирует максимальное значение тока заряда) и индикаторным светодиодом. Кроме уже описанного алгоритма микросхема выполняет защиту от перенапряжения и перегрева. Если значение входного напряжения превышает определенный предел (в частности, 7,2 В) или если температура корпуса превысит величину 120 °С, то зарядное устройство отключается, защищая себя и аккумулятор. Реализована также защита от низкого входного напряжения — если входное напряжение опустилось ниже определенного уровня, то зарядное устройство также отключится.

Устройства, подобные описанному, предназначены, в основном, для построения отдельных зарядных устройств для АКБ, которые на время зарядки отделены от нагрузки. Если же это не так, то часть зарядного тока будет утекать в нагрузку, что в первой фазе зарядки (если аккумулятор сильно разряжен) может замедлить процесс зарядки или вовсе сделать его невозможным. Для избежания таких проблем необходимо предусматривать в схемах зарядки ключевые элементы, которые разделяют пути протекания токов зарядки и нагрузки. Такая технология используется при построении микросхем контроллеров многими фирмами [8]. Например, компания Maxim называет такую технологию SPS — Smart Power Selector, которая используется в микросхемах MAX8844, MAX8819, MAX8877 и некоторых других. Фрагмент схемы SPS приведен на рисунке 3. Ее основное назначение — обеспечивать бесперебойное питание нагрузки. Транзистор VT1 или полностью открыт, или используется как линейный регулятор выходного напряжения V_{out} (например, 4,4 В), т.е. используется для прямого прохождения тока от источника V_{in} к нагрузке. Транзистор VT2 подключает к нагрузке аккумулятор. Если ток в нагрузке возрастает, и источник V_{in} не может его поддерживать, то с помощью VT2 ограничивается ток зарядки аккумулятора.

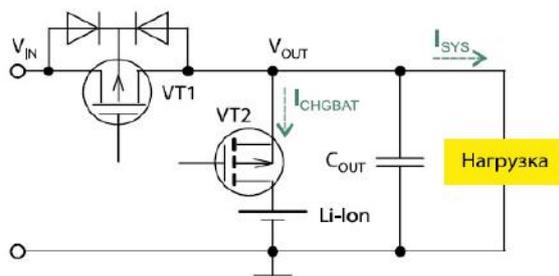


Рисунок 3. Структура для раздельного управления токами зарядки и нагрузки

Несколько иное назначение имеют так называемые защитные контроллеры (PCM-Protection Circuit Module, или PCB-Protection Circuit Board), миниатюрные платы которых встраивают непосредственно в корпус аккумулятора (рисунок 4).



Рисунок 4. Ячейка аккумулятора с защитным контроллером

Они также основаны на специализированных микросхемах. В качестве примера приведем микросхему DW01-P производства фирмы Fortune Semiconductor (Тайвань) [9] (рисунок 5).

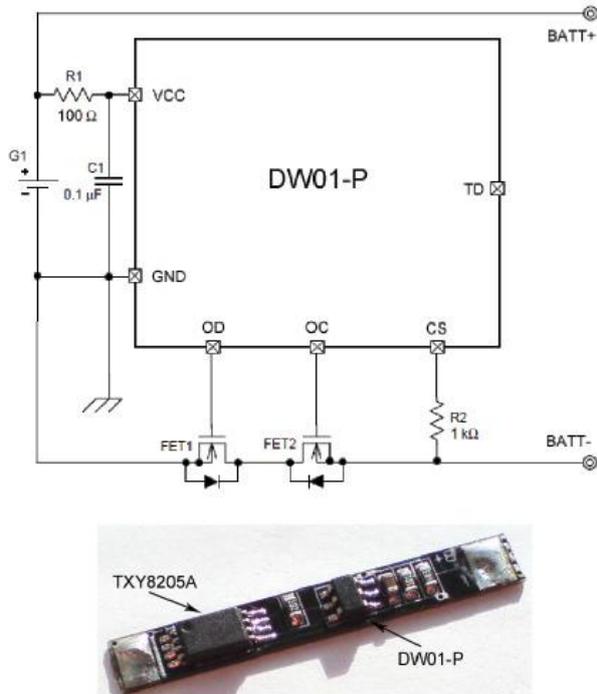


Рисунок 5. Схема включения м/с DW01-P и плата контроллера на ее основе

Микросхема с помощью двух внешних MOSFET-транзисторов производит контроль и управление в ситуациях перезаряда (OD-Overdischarge) и переза-

ряда (OC-Overcharge). Если напряжение на ячейке упадет ниже 2,5 В, то контроллер закрывает транзистор FET1 (но заряд при этом возможен через встроенный диод), а если оно будет выше 4,2 В, то закроется транзистор FET2 (но разряд при этом возможен через встроенный диод этого транзистора). Кроме того, контроллер закрывает FET1 при чрезмерном токе разряда. Величина тока разряда, а также наличие зарядного устройства определяется по падению напряжения на резисторе R2. Таким образом предотвращаются аварийные режимы работы. К клеммам BATT+, BATT- подключают нагрузку или зарядное устройство. Транзисторы FET1, FET2 входят в состав сборки TXY8205A [10].

Микросхемы PCM, подобные описанной, сейчас массово выпускают большое количество фирм. Причем среди них есть и контроллеры, предназначенные для защиты ячеек многосекционных батарей. Так, компания Seiko Instruments (Япония) выпускает целую линейку микросхем для PCM-контроллеров (S-8205, S-8253 и др.), ориентированных на различное количество секций [11]. От вышеописанных односекционных PCM-контроллеров они отличаются только более сложными входными цепями для мониторинга каждой секции аккумулятора, но реакция на аварийные режимы для любой секции одна — отключается (от зарядного источника или нагрузки) вся батарея целиком.

2. Обеспечение заряда-разряда многосекционных литиевых батарей

Производители литиевых АКБ обычно комплектуют батареи из специально подбираемых близких по параметрам ячеек. Однако небольшие отличия в параметрах отдельных ячеек остаются, со временем они увеличиваются.

Во многих защитных и зарядных контроллерах полный заряд АКБ определяется по суммарному напряжению всей батареи последовательно включенных ячеек. Поэтому напряжение заряда отдельных ячеек может находиться в широких пределах, однако оно не может превышать порогового значения напряжения, при котором включается защита от перезаряда (обычно 4,25 В). Однако в каком-нибудь слабом звене — ячейке с малой емкостью или большим внутренним сопротивлением — напряжение может быть выше, чем на остальных полностью заряженных ячейках. Высокое напряжение такой ячейки после завершения заряда говорит об ее ускоренной деградации. При разряде на нагрузку такая ячейка будет быстрее других терять напряжение. Таким образом, при заряде на слабой ячейке может сработать защита от перенапряжения, в то время как остальные ячейки батареи еще не будут заряжены полностью. Это приведет к недоиспользованию ресурсов АКБ. То есть дисбаланс ячеек уменьшает время работы устройств без подзарядки и срок службы батареи.

Существуют два метода балансировки батарей — пассивный и активный [12]. Пассивный метод осуществляется за счет подключения в нужные моменты времени разрядных резисторов, шунтирующих

ячейки, а активный — за счет перетоков энергии между ячейками через реактивные элементы.

Известны и другие технические решения. Например, зарядку можно производить от одного источника после перекоммутации ячеек с последовательной схемы на параллельную, в которой ток заряда каждой ячейки можно регулировать отдельно. Возможно также использование зарядного устройства с гальваническими развязанными выходами для заряда всех последовательно соединенных ячеек, при этом ячейки подключаются к своему источнику непосредственно или через управляемые ключи [13]. Однако такие решения не получили широкого распространения из-за относительной сложности реализации.

Пассивная балансировка

Этот метод балансировки заключается в выравнивании напряжения ячеек посредством резисторных байпасных цепей, рассеивающих мощность. Эти цепочки, параллельные ячейкам, могут быть интегрированы в корпус АКБ или помещаться во внешнем устройстве. Такой метод лучше использовать в недорогих устройствах. Практически вся избыточная энергия от ячеек с большим зарядом рассеивается в виде тепла — это главный недостаток пассивного метода, т.к. он сокращает время работы батарей без подзарядки.

Для реализации пассивного метода балансировки различными компаниями выпускается большое количество микросхем разных типов. Например, микросхема bq77PL900 от Texas Instruments [14], обеспечивающая зарядку с балансировкой и защиту АКБ с 5—10 последовательно включенными ячейками, широко используется в различных автономных устройствах. Сравнивая напряжение ячеек с установленными порогами, микросхема при необходимости включает режим балансировки. На рисунке 6 показан принцип действия. Если напряжение какой-либо ячейки превышает заданный порог, заряд прекращается, подключается соответствующая байпасная цепочка. Заряд не возобновляется до тех пор, пока напряжение ячейки не снизится ниже порогового.

Очевидно, что некоторая разница в напряжениях секций (ΔV_{END}) при описанном методе может остаться и после балансировки. Это вызвано конечным значением напряжения гистерезиса ΔV_{OVH} , которое обязательно имеет место при регулировке. Кроме того, возможна неполная балансировка из-за разности внутреннего сопротивления ячеек. Оно вносит свой вклад в разброс напряжений при заряде. Микросхема защиты не может определить, чем вызвана разбалансировка напряжений: разной емкостью ячеек или различием их внутренних сопротивлений. Поэтому при таком типе пассивной балансировки нет гарантии, что все ячейки окажутся на 100 % заряженными. Несколько лучший результат балансировки обеспечивает микросхема bq2084 той же фирмы. Чтобы минимизировать эффект разброса внутренних сопротивлений bq2084 осуществляет балансировку ближе к окончанию процесса заряда, когда величина зарядного тока невелика. Другое преимущество bq2084 — измерение и анализ напряжения всех ячеек, входящих в АКБ. Однако в любом случае этот метод применим лишь в режиме зарядки.

Микросхемы фирмы Texas Instruments семейства bq20zxx используют для определения уровня заряда свою особую технологию, названную Impedance Track, базирующуюся на определении напряжения и емкости ячейки. В этой технологии для каждой ячейки вычисляется заряд Q_{NEED} , необходимый для достижения полностью заряженного состояния, после чего находится разница ΔQ между Q_{NEED} всех ячеек. Затем микросхема включает силовые ключи, через которые происходит балансировка ячейки до состояния $\Delta Q=0$. Вследствие того, что разность внутренних сопротивлений ячеек не оказывает влияния на этот метод, он может применяться в любое время: и при зарядке, и при разрядке АКБ. При использовании технологии Impedance Track достигается более точная балансировка ячеек.

Активная балансировка

В активном методе балансировки для передачи энергии от более заряженных ячеек к менее заряженным используются индуктивности или емкости,

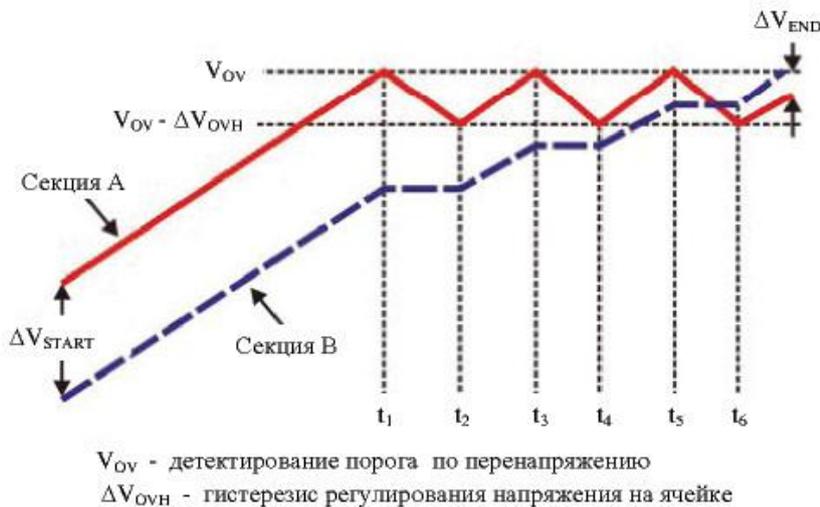


Рисунок 6. Действие пассивной балансировки

потери энергии в которых незначительны. Поэтому активный метод гораздо более эффективен, нежели пассивный. Однако при этом приходится использовать более дорогие компоненты — катушки индуктивности, трансформаторы, конденсаторы. Этот метод предпочтителен в случаях, когда требуется обеспечить максимальное время работы устройства без подзарядки.

В качестве примера микросхемы, реализующей активный метод балансировки, рассмотрим специализированный микроконтроллер от Texas Instruments bq78PL114, произведенный по фирменной технологии PowerPump, в которой применяются катушки индуктивности для передачи энергии. Технология PowerPump использует пару из n-канального и p-канального MOSFET-транзисторов и катушку индуктивности, которая расположена между парой секций АКБ. Схема показана на рисунке 7.

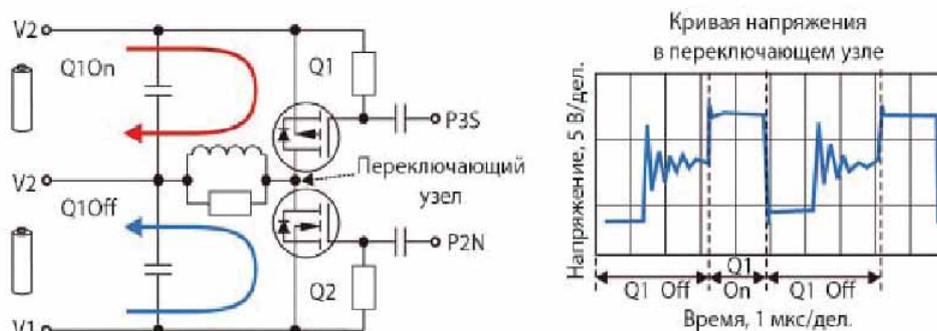


Рисунок 7. Перекачка энергии между секциями с помощью технологии PowerPump

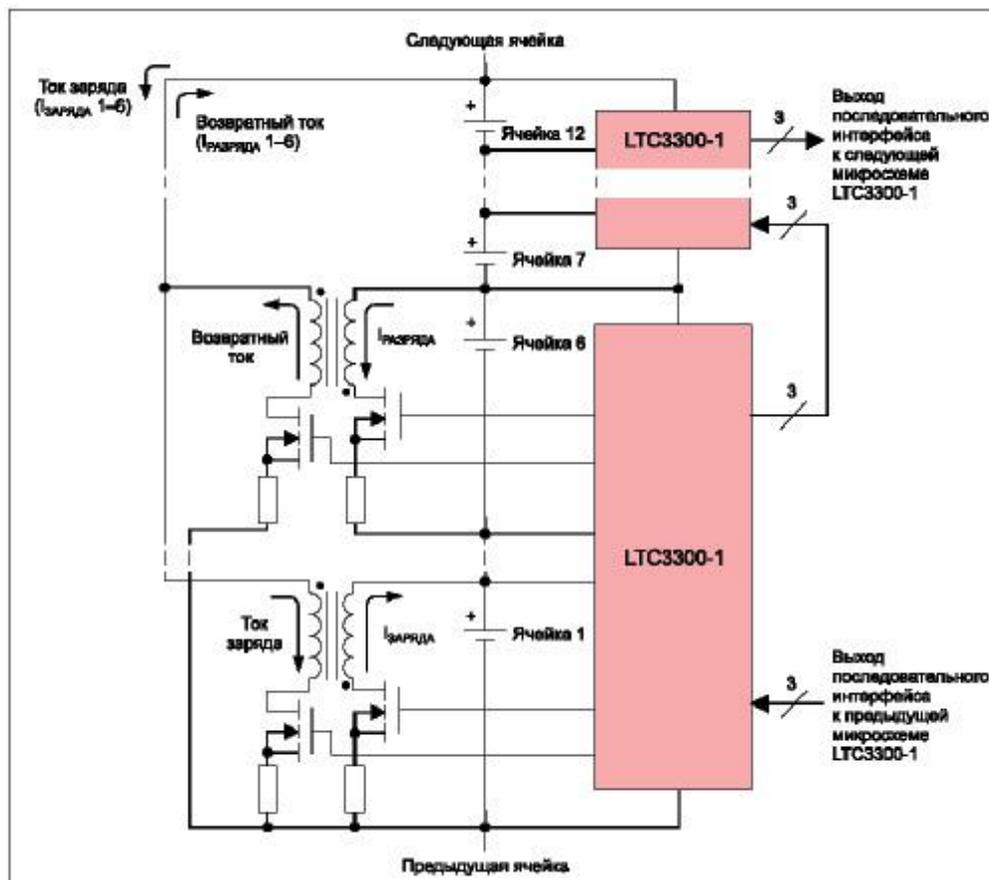


Рисунок 8. Схема включения LTC3300-1

MOSFET и катушка образуют промежуточную вольтдобавочную цепь. Если bq78PL114 определяет, что верхней секции нужно передать энергию в нижнюю, на выводе P3S появляется импульсный сигнал (частота 200 кГц, скважность 30 %), разрешающий эту передачу. Когда ключ Q1 открыт, энергия из верхней секции запасается в катушке. Когда ключ Q1 закрывается, энергия, запасенная в катушке, через обратный диод ключа Q2 поступает в нижнюю секцию. Потери энергии при этом незначительны.

При больших токах балансировки технология PowerPump гораздо более эффективна, чем обычная пассивная балансировка с внутренними байпасными ключами. Так, в случае балансировки АКБ ноутбука (токи балансировки 25—50 мА) можно достичь эффективности балансировки в 12—20 раз лучшей, чем при пассивном методе. При типичных значениях разбалансировки (менее чем 5 %) баланса можно

достичь за 1—2 цикла. Кроме того, технология PowerPump имеет и другие преимущества: балансировка может происходить при любом режиме работы — при заряде, разряде, на холостом ходу и даже тогда, когда секция, отдающая энергию, имеет меньшее напряжение, чем секция, получающая энергию.

В качестве другого примера современного решения для реализации активной балансировки рассмотрим микросхему LTC3300-1 фирмы Linear Technology [15] (рисунок 8). Ее особенность состоит в применении трансформаторов в качестве внешних перераспределяющих элементов. Она способна перераспределять энергию в батарее, содержащей до 6 последовательно соединенных ячеек литиевых аккумуляторов. При этом имеется возможность построения системы балансировки для высоковольтных батарей (с напряжением до 1000 В) на основе наращиваемого количества микросхем LTC3300-1, каждая из которых обслуживает свою группу ячеек. Применение этой микросхемы возможно как совместно с микросхемой контроля литиевых батарей LTC6803-1 этой же фирмы [16], так и с другими устройствами контроля, в том числе и спроектированными самим разработчиком батареи. Эта легкость наращивания системы обуслов-

лена наличием цифрового интерфейса управления, аппаратно совместимого с SPI, и простого протокола обмена информацией. Подбирая для каждого конкретного применения внешние компоненты с различными характеристиками можно соответствующим образом варьировать характеристики разрабатываемой системы балансировки. В частности, применив мощные MOSFET-транзисторы, можно повысить ток баланса до 10 А.

Заключение

Управление процессами заряда-разряда литиевых АКБ — довольно сложная и ответственная задача. Однако на сегодняшний день она во многом облегчена благодаря наличию на рынке большого количества разнообразных микросхем, модулей и готовых изделий, которые предназначены специально для решения указанной технической задачи.

Среди производителей специализированных интегральных микросхем для контроля и управления зарядом-разрядом литиевых АКБ заметно выделяются такие фирмы как Texas Instruments, Linear Technology, Maxim Integrated Products, STMicroelectronics, Seiko Instruments, NXP Semiconductors.

Список литературы

1. Learning the basics about batteries / Cadex Electronics Inc. — URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries.
2. Lithium Batteries: Science and Technology / ed. by G.-A. Nazri, G. Pistoia(s). — Springer, 2009.
3. Фетисов В.С., Тагиров М.И., Мухаметзянова А.И. Подзарядка электрических беспилотных летательных аппаратов: обзор существующих разработок и перспективных решений // *Авиакосмическое приборостроение*. — 2013. — № 11. — С. 7-26.
4. Кедринский И.А., Яковлев В.Г. Литий-ионные аккумуляторы. — Красноярск: Платина, 2002. — 268 с.
5. Rao M.C. Novel Cathode Materials for Rechargeable Batteries // *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Proceedings of National Conference on Advanced Technology Oriented Materials (ATOM-2014), 8-9th Dec., 2014, Rajahmundry. — Andhra Pradesh, India, 2014. — P. 11-13. — URL: http://www.ijsr.net/conf/ATOM2014/ATOM2014_03.pdf.
6. Kolosnitsyn V.S., Karaseva E.V. Lithium-Sulfur Batteries: Problems and Solutions // *Russian Journal of Electrochemistry*. — 2008. — Vol. 44. — No. 5. — P. 506-509. — URL: https://www.researchgate.net/publication/225512575_Lithium-sulfur_batteries_Problems_and_solutions.
7. Никитин А. Все для литиевых аккумуляторов: микросхемы STM для зарядных устройств и мониторинга батарей // *Новости электроники*. — 2013. — № 2. — С. 21-26. — URL: <http://www.compel.ru/lib/ne/2013/2/4-vse-dlya-litievyyih-akkumulyatorov-mikroshemyi-stm-dlya-zaryadnyih-ustroystv-i-monitoringa-batarey>.

8. Охрименко В. Интеллектуальные контроллеры зарядки аккумуляторов // *Электронные компоненты*. — 2011. — № 6. — С. 85-88.

9. DW01-P: One Cell Lithium-ion/Polymer Battery Protection IC. Техническая информация компании Fortune Semiconductor Corp. — 2014. — URL: http://www.ic-fortune.com/upload/Download/DW01-P-DS-15_EN.pdf.

10. Устройство и принцип работы защитного контроллера Li-ion/polymer аккумулятора. — URL: <http://go-radio.ru/sxema-kontrollera-litij-ionnogo-akkumulatora.html>.

11. Lithium-ion Rechargeable Battery Protection ICs. Техническая информация компании Seiko Instruments Inc. — 2016. — URL: <http://www.sii-ic.com/en/semicon/products/power-management-ic/lithium-ion-battery-protection-ic>.

12. Рыкованов А., Беляев С. Активные и пассивные системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // *Компоненты и технологии*. — 2014. — № 3. — С. 121-124.

13. Груздев А.И. Концепция построения систем контроля и управления высокоэнергоемких литиевых аккумуляторных батарей // *Электрохимическая энергетика*. — 2005. — Т. 5. — № 2. — С. 90-93.

14. Сихуа Вэн. Выравнивание параметров секций аккумулятора обеспечивает дополнительное время работы и увеличивает срок службы аккумуляторных батарей // *Компоненты ТИ: Бюллетень научно-технической информации*. — 2011. — Вып. 2 (30). — С. 44-48.

15. LTC3300-1. Datasheet. Техническая информация компании Linear Technology Corp. 2013. — URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/33001fb.pdf>.

16. LTC6803. Datasheet. Техническая информация компании Linear Technology Corp. 2011. — URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/680313fa.pdf>.

References

1. Learning the basics about batteries / Cadex Electronics Inc. — URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries.
2. Lithium Batteries: Science and Technology / ed. by G.-A. Nazri, G. Pistoia(s.). — Springer, 2009.
3. Fetisov V.S., Tagirov M.I., Mukhametzyanova A.I. Podzaryadka elektricheskikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov: obzor sushchestvuyushchikh razrabotok i perspektivnykh reshenii//Aviakosmicheskoe priborostroenie. — 2013. — № 11. — S. 7-26.
4. Kedrinskii I.A., Yakovlev V.G. Litii-ionnyye akkumulyatory. — Krasnoyarsk: Platina, 2002. — 268 s.
5. Rao M.C. Novel Cathode Materials for Rechargeable Batteries // International Journal of Science and Research (IJSR), Proceedings of National Conference on Advanced Technology Oriented Materials (ATOM-2014), 8-9th Dec., 2014, Rajahmundry. — Andhra Pradesh, India, 2014. — P. 11-13. — URL: http://www.ijsr.net/conf/ATOM2014/ATOM2014_03.pdf.
6. Kolosnitsyn V.S., Karaseva E.V. Lithium-Sulfur Batteries: Problems and Solutions // Russian Journal of Electrochemistry. — 2008. — Vol. 44. — No. 5. — R. 506-509. — URL: https://www.researchgate.net/publication/225512575_Lithium-sulfur_batteries_Problems_and_solutions.
7. Nikitin A. Vse dlya litievykh akkumulyatorov: mikroskhemy STM dlya zaryadnykh ustroystv i monitoringa batarei // Novosti elektroniki. — 2013. — № 2. — S. 21-26. — URL: <http://www.compel.ru/lib/ne/2013/2/4-vse-dlya-litievyyih-akkumulyatorov-mikroshemyi-stm-dlya-zaryadnyih-ustroystv-i-monitoringa-batarey>.
8. Okhrimenko V. Intellektual'nye kontrollery zaryadki akkumulyatorov // Elektronnyye komponenty. — 2011. — № 6. — S. 85-88.
9. DW01-P: One Cell Lithium-ion/Polymer Battery Protection IC. Tekhnicheskaya informatsiya kompanii Fortune Semiconductor Corp. — 2014. — URL: http://www.ic-fortune.com/upload/Download/DW01-P-DS-15_EN.pdf.
10. Ustroistvo i printsip raboty zashchitnogo kontrollera Li-ion/polymer akkumulyatora. — URL: <http://go-radio.ru/sxema-kontrollera-litii-ionnogo-akkumulatora.html>.
11. Lithium-ion Rechargeable Battery Protection ICs. Tekhnicheskaya informatsiya kompanii Seiko Instruments Inc. — 2016. — URL: <http://www.sii-ic.com/en/semicon/products/power-management-ic/lithium-ion-battery-protection-ic>.
12. Rykovanov A., Belyaev S. Aktivnyye i passivnyye sistemy balansa Li-ion akkumulyatornykh batarei // Komponenty i tekhnologii. — 2014. — № 3. — S. 121-124.
13. Gruzdev A.I. Kontseptsiya postroeniya sistem kontrolya i upravleniya vysokoenergoemkikh litievykh akkumulyatornykh batarei // Elektrokhimicheskaya energetika. — 2005. — T. 5. — № 2. — S. 90-93.
14. Sikhua Ven. Vyravnivanie parametrov sektsii akkumulyatora obespechivaet dopolnitel'noe vremya raboty i uvelichivaet srok sluzhby akkumulyatornykh batarei//Komponenty TI: Byulleten' nauchno-tekhnikeskoi informatsii. — 2011. — Vyp. 2 (30). — S. 44-48.
15. LTC3300-1. Datasheet. Tekhnicheskaya informatsiya kompanii Linear Technology Corp. 2013. — URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/33001fb.pdf>.
16. LTC6803. Datasheet. Tekhnicheskaya informatsiya kompanii Linear Technology Corp. 2011. — URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/680313fa.pdf>.



Шapiro С. В.
Shapiro S. V.

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



Саенко А. Г.
Saenko A. G.

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

УДК 628.314

ТЕОРИЯ ОЗОНАТОРА С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В статье приведены элементы теории субульразвукового озонатора с бегущим барьерным разрядом, разработанного в научно-исследовательской лаборатории «Физика электронных процессов и наноматериалов» УГУЭС.

Показана методика расчета электрического поля внутри цилиндрической эквипотенциали с использованием метода зеркальных отображений. Дан вывод формул напряжения и емкости газоразрядной трубки озонатора с учетом осесимметричного характера электрического поля.

Проведен анализ бегущего разряда методом зеркальных отображений. Показано изменение геометрии высоковольтного электрода и его зеркального отображения в процессе развития разряда. Получены формулы, определяющие границы зоны ионизированного газа. Установлено, что по мере увеличения напряжения на электродах озонатора не только увеличивается объем зоны ионизации, но и перемещение её оси ближе к диэлектрическому барьеру.

Предложенный в статье анализ служит основой для получения оптимального значения числа электродов N , их геометрического расположения внутри газоразрядной зоны и величины напряжения на электродах U .

Ключевые слова: субульразвуковой озонатор, газоразрядная трубка, ионизированный газ, виртуальный электрод, бегущий барьерный разряд, метод зеркальных отображений, цилиндрические координаты.

THEORY OZONATOR WITH AXIALLY SYMMETRICAL HIGH-VOLTAGE ELECTRODES

The article presents the elements of the theory subultrasonic ozonator with a running barrier discharge developed in the research laboratory «Physics of electronic processes and nanomaterials» USUES.

It is shown the method of calculation of the electric field inside a cylindrical equipotential using the method of mirror images. The derivation of formulas voltage and capacitance discharge tube ozonator considering axially symmetric nature of the electric field is given.

The analysis of the running of the discharge method of mirror images is carried out. The change of the geometry of the high voltage electrode and its mirror image in the process of discharge is shown. The formulas determining ionized gas zone boundary are derived. It is found that as the voltage on the electrodes ozonizer not only increases the volume of the ionization zone, but its axis and moving closer to the dielectric barrier.

The proposed article analysis provides the basis for an optimal value of the number of electrodes N , their geometric arrangement within the gas discharge zone and the voltage across the electrodes U .

Key words: subultrasonic ozonator, discharge tube, ionized gas, the virtual electrode, running barrier discharge, the method of mirroring, cylindrical coordinates.

В исследовательской лаборатории «Физика электронных процессов и наноматериалов» Уфимского государственного университета экономики и сервиса (УГУЭС) разработан субульразвуковой генератор озона с бегущим барьерным разрядом [1, 2, 3].

Его основные достоинства по сравнению с другими типами озонаторов, основанных на барьерном разряде, — относительная дешевизна в изготовлении и компактность. Учитывая возрастающую роль озона в создании современных технологий, в лаборатории

продолжается работа над совершенствованием таких генераторов. В частности, в последнее время появились новые идеи в области теории работы озонаторов с бегущим барьерным разрядом. Ниже излагаются основные элементы этой теории.

1. Метод зеркальных отображений применительно к электрическому полю внутри цилиндрической эквипотенциали

На рисунке 1 дана для иллюстрации конструкция основного элемента озонатора – газоразрядной трубки. Как видно, она состоит из цилиндрического диэлектрического барьера, выполненного из высококачественной керамики 1, снаружи покрытого проводящим слоем, являющимся низковольтным электродом (НВЭ) 2. Внутри цилиндра симметрично располагаются нитеобразные высоковольтные электроды (ВВЭ) 3, выполненные из стальной нержавеющей проволоки.

При подаче на эти электроды высокого напряжения переменной частоты (от 7 до 10 кГц) вокруг них возникает зона ионизации, которая в процессе роста напряжения в течение каждого периода сначала растет, а затем с падением напряжения до нуля вновь исчезает. На рисунке 2 дано схематическое изображение последовательных стадий зоны ионизации. Наружная граница этой зоны представляет собой цилиндр, окружающий высоковольтный электрод.

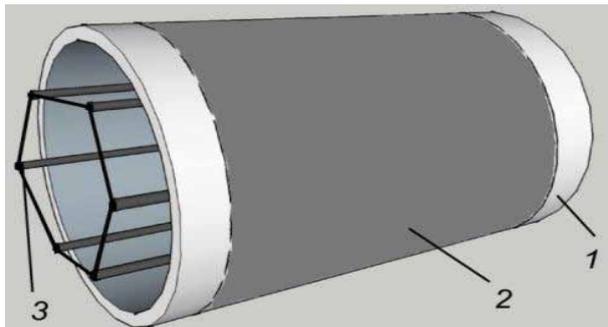


Рисунок 1. Газоразрядная трубка многоэлектродного озонатора

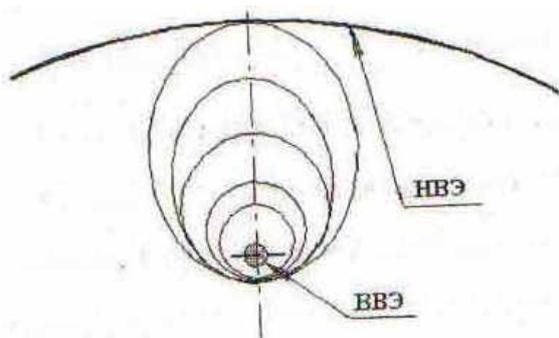
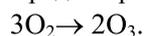


Рисунок 2. Развитие разряда от высоковольтного электрода к низковольтному. Замкнутые кривые вокруг ВВЭ — геометрическое место точек, в которых напряженность достигает величины пробоя воздуха $E_{пр}$ в процессе развития разряда

Эта поверхность характеризуется напряженностью пробоя газовой смеси (в подавляющем большинстве воздуха), содержащей кислород. Именно в этой зоне и происходит по сложной схеме превращение двухатомного кислорода в трехатомный озон:



Молекулы азота, содержащиеся в воздухе, как показывают многочисленные опыты, играют, в основном, роль катализатора этой реакции, хотя крайне небольшое их количество соединяется с атомами кислорода, образуя небольшое количество окислов азота [4].

Поскольку газоразрядные трубки выполняются длинными, т. е. такими, что их осевая длина больше радиуса цилиндра на порядок, можно при теоретическом рассмотрении поля высоковольтных электродов пренебречь краевыми эффектами и считать это поле осесимметричным (цилиндрическим) [5].

На рисунке 3, а дано поперечное сечение газоразрядной трубки. В работе [1] показано, что с достаточно высокой точностью можно внутреннюю поверхность диэлектрического барьера принять эквипотенциальной. Это позволяет применить для изучения поля внутри газоразрядной трубки метод зеркальных отображений [6].

Суть этого метода заключается в том, что каждому точечному заряду, создающему электрическое поле внутри замкнутой эквипотенциальной поверхности, вне этой поверхности располагают виртуальный точечный заряд такой же величины, что и исходный, но противоположный по знаку. После этого все пространство рассматривают однородным и строят поле этих двух зарядов такое, что внутри линии, совпадающей с исходной эквипотенциальной, оно совпадало с искомым.

В нашем случае эквипотенциалью является цилиндрическая внутренняя поверхность диэлектрической трубки, а зарядом — сечение высоковольтного электрода.

На рисунке 3, б дано построение методом зеркального отображения виртуального заряда. Здесь R — радиус окружности, образованной при пересечении внутренней цилиндрической поверхности диэлектрического барьера; R_1 — расстояние высоковольтного электрода от оси цилиндра; R_2 — расстояние от этой оси до виртуального заряда; τ — линейная плотность заряда вдоль высоковольтного электрода; r — радиус круглого провода, из которого изготовлен электрод.

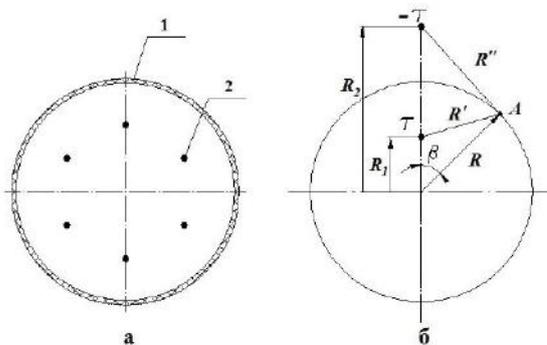


Рисунок 3. Газоразрядные трубки: поперечное сечение газоразрядной трубки (а) (1 – диэлектрический барьер; 2 – высоковольтные электроды), построение методом зеркального отображения виртуального электрода (б)

В нашем случае эквипотенциалью является цилиндрическая внутренняя поверхность диэлектрической трубки, а зарядом — сечение высоковольтного электрода.

На рисунке 3, б дано построение методом зеркального отображения виртуального заряда. Здесь R — радиус окружности, образованной при пересечении внутренней цилиндрической поверхности диэлектрического барьера; R_1 — расстояние высоковольтного электрода от оси цилиндра; R_2 — расстояние от этой оси до виртуального заряда; τ — линейная плотность заряда вдоль высоковольтного электрода; r — радиус круглого провода, из которого изготовлен электрод.

Принимая потенциал высоковольтного электрода равным нулю, находим в соответствии с [6] потенциал точки A на эквипотенциальной поверхности:

$$\begin{aligned} \varphi_A &= \varphi_{A,\tau} + \varphi_{A,-\tau} + \varphi_{\tau,-\tau} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{r} - \\ &- \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R'}{r} + \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_2 - R_1}{r} = \\ &= \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R'}{R''} \cdot \frac{(R_2 - R_1)}{r}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; R' и R'' — расстояния от τ и $(-\tau)$ до точки A .

Величина φ_A определяется напряжением между высоковольтным и низковольтным электродами озонатора U :

$$\varphi_A = U. \quad (2)$$

Из формулы (1) можно найти величину R^2 , учитывая что потенциал φ_A не зависит от положения т. A на окружности радиуса R , т. е. от угла β (рисунок 3, б). В соответствии с теоремой косинусов определяем R' и R'' в функции от R , R_1 , R_2 и $\cos\beta$:

$$R' = \sqrt{R^2 + R_1^2 - 2RR_1\cos\beta}; \quad (3)$$

$$R'' = \sqrt{R^2 + R_2^2 - 2RR_2\cos\beta}. \quad (4)$$

Если выбрать

$$R_2 = \frac{R^2}{R_1}, \quad (5)$$

то отношение R'/R'' не будет зависеть от угла β :

$$\frac{R'}{R''} = \frac{R_1}{R}. \quad (6)$$

При таком выборе R^2 согласно (1) получаем

$$U = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R^2 - R_1^2}{Rr}. \quad (7)$$

Формула (7) верна и в том случае, когда число высоковольтных электродов равно N (рисунок 3, а). Правда, в этом случае линейная плотность зарядов τ равна

$$\tau = \frac{q}{Nl}, \quad (8)$$

где q — суммарный заряд всех N электродов, l — длина газоразрядной трубки.

Из формул (7) и (8) можно вывести значение емкости газоразрядной трубки озонатора:

$$C_\Gamma = \frac{q}{u} = \frac{2\pi\epsilon_0 Nl}{\ln \frac{(R^2 - R_1^2)}{R}}. \quad (9)$$

2. Анализ процесса бегущего разряда методом зеркальных отображений

По мере роста мгновенных значений напряжения и между высоковольтными и низковольтным электродами напряженность поля вблизи первых достигает пробивного, и газ в этих зонах ионизируется. Ионизированный кислородсодержащий газ становится проводником. С дальнейшим ростом напряжения пробивная напряженность удаляется от высоковольтного электрода, и зона ионизированного газа увеличивается (рисунок 2).

Для того чтобы теоретически определить геометрию границы ионизированной зоны, необходимо обычную картину поля, изображенную силовыми линиями и эквипотенциальными, дополнить так называемыми изотензионными поверхностями [1], т.е. поверхностями с постоянными по величине напряженностями поля E . На рисунке 4 показано, как по мере роста напряжения U растет ионизированная зона, окруженная изотензионной поверхностью с напряженностью, равной пробивной $E_{пр}$.

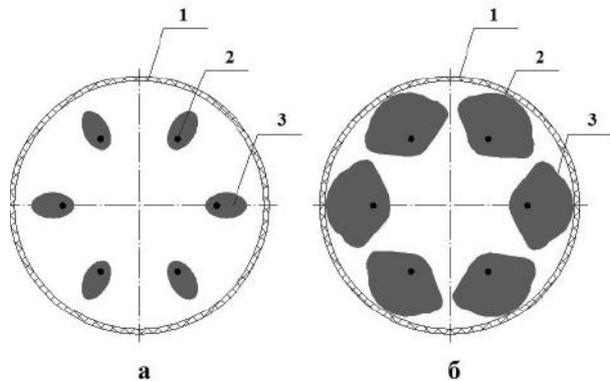


Рисунок 4. Развитие разряда в газоразрядной трубке: 1 — диэлектрический барьер; 2 — высоковольтные электроды; 3 — изотензионные поверхности

Ясно, что картина поля с измененной конфигурацией высоковольтного электрода требует уточнения в использовании метода зеркальных отображений. Зеркальный образ высоковольтного электрода будет представлять собой не круглый провод того же радиуса r , что и исходный электрод, а цилиндр с более сложным поперечным сечением.

На рисунке 5, а показано, как следует строить зеркальный образ произвольной фигуры. На этом рисунке окружность радиуса R , как и ранее, сечение внутренней поверхности диэлектрического барьера, заштрихованная зона $A_1 A_2 B_1 B_2$ — высоковольтный электрод, окруженный ионизированным (проводящим) газом, вторая заштрихованная зона $A_1' A_2' B_1' B_2'$ — зеркальное отображение электрода $A_1 A_2 B_1 B_2$. Из центра O проведем два луча $OA_1 A_2 A_1' A_2'$ и $OB_1 B_2 B_1' B_2'$, расходящиеся на инфинитезимальный угол $d\alpha$. Принимается, что точки A_1', A_2', B_1', B_2' являются зеркальным отображением соответственно точек A_1, A_2, B_1, B_2 , т.е.

$$OA_1 \cdot OA_1' = OA_2 \cdot OA_2' = OB_1 \cdot OB_1' = OB_2 \cdot OB_2' = R^2. \quad (10)$$

Эти соотношения позволяют установить, что треугольник $OA_1 B_1$ подобен треугольнику $OA_1' B_1'$, так как у них общий угол $d\alpha$ и пропорциональны прилегающие к нему стороны:

$$\frac{OA_1}{OB_1} = \frac{OB_1}{OA_1}. \quad (11)$$

По аналогичной причине подобны треугольники OA_2B_2 и $OA_2'B_2'$. Из этих подобий следует, что

$$\begin{cases} A_1'B_1' = \frac{R^2}{A_1B_1} \\ A_2'B_2' = \frac{R^2}{A_2B_2} \end{cases} \quad (12)$$

Конфигурация (рисунок 5, а) с учетом доказанного подобия позволяет построить зеркально отраженный электрод к электроду любой конфигурации следующим построением (рисунок 5, б).

Из центра O проводим лучи $OA, OA_1, \dots, O\varepsilon$, которые разбивают сечение исходного электрода на отдельные площадки $AA_1A_2, A_1B_1B_2A_2, \dots$. Продолжая эти лучи за пределы окружности радиуса R , находим на них точки $A', A_1', B_1', \dots, A_2', B_2', \dots$, определенные соотношениями, аналогичными (10). Соединяя точки $A', A_1', B_1', C_1', \dots, C_2', B_2', A_2', A'$, получаем зеркальное отражение нашего электрода. В частности, если сечение исходного электрода — окружность радиуса r , то его зеркальное отображение — тоже окружность радиуса r' (рисунок 5, в).

Причем, как нетрудно заметить

$$r' = \frac{R^2}{r}; \quad OO_1' = \frac{R^2}{OO_1}. \quad (13)$$

Указанные соотношения вытекают из подобия треугольников $OA O_1$ и $OA' O_1'$, OCO_1 и $OC' O_1'$, OAB и $OA'B'$, где O_1 и O_1' — центры окружностей — сечения соответственно высоковольтного электрода и его зеркального отображения. Точки C и C' — точки касания луча, проведенного из центра окружности — сечения внутреннего цилиндра диэлектрического барьера и касающегося окружности высоковольтного электрода и его зеркального отображения.

Следует отметить, что точной границы зоны ионизации на практике не наблюдается, так как она зависит не только от точной величины пробивной напряженности поля, но и от ряда случайных факторов. Поэтому далее допускаем, что эта граница представляет собой цилиндр, сечение которого равно окружности. Площадь этой окружности с определенной степенью точности равна площади сечения зоны ионизации.

Принятое допущение существенно упрощает математическую модель развития бегущего барьерного разряда, сводя ее к изменению радиуса r и удалению оси цилиндрической зоны ионизации от оси диэлектрического барьера R_1 (рисунок 6). Путем расчетов, аналогичным тем, с помощью которых получены соотношения (7) и (9), но с учетом уточнения (13), получаем для газоразрядной трубки с учетом возникновения ионизации следующие соотношения:

$$U = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{R^2 - R_1^2}{R_1 r} \quad (14)$$

и

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 N l}{\ln(R^2 - R_1^2)/R_1 r}. \quad (15)$$

Нетрудно заметить, что выражения (14) и (15) отличаются от (7) и (9) только тем, что в знаменателе дроби,

стоящей под знаком логарифма, вместо радиуса диэлектрического цилиндра R стоит расстояние от центра ионизированной зоны до оси этого цилиндра R_1 .

Под высоковольтным электродом здесь и далее подразумевается вся зона ионизации вокруг провода, из которого выполнен сам электрод.

Центр ионизированной зоны в общем случае не совпадает с осью высоковольтного электрода. Для того, чтобы определить геометрические размеры ионизированной зоны, величины R_1 и r (рисунок 6) в какой-то момент времени учтем, что напряженность поля на границе этой зоны E_A равна напряженности пробоя. Например, для воздуха при нормальных условиях ($p = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$, $t = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ К}$) напряженность пробоя равна $3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$.

Расстояние от точки A до оси диэлектрического барьера ρ (рисунок 6) зависит ЕПР по формуле

$$e = \frac{E}{a} = N\rho^{N-1} \left(\frac{R^{2N} - R_1^{2N}}{(R^{2N} - \rho^N R_1^N)(R_1^{2N} - \rho^N R_1^N)} \right), \quad (16)$$

где $a = \tau/2\pi\varepsilon_0$.

Для того чтобы найти ρ по формуле (16), придется решить уравнение N степени. Это уравнение можно свести к квадратному уравнению относительно ρ^N ,

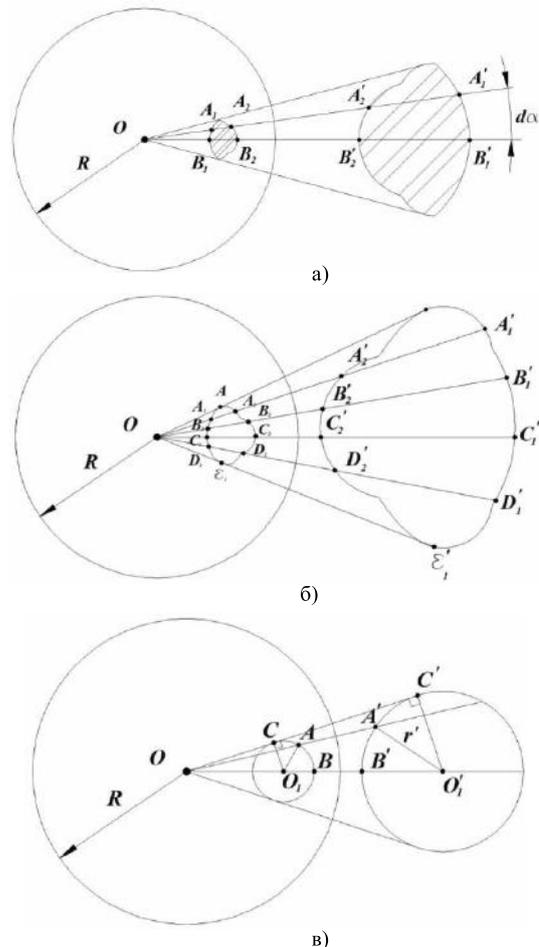


Рисунок 5. К построению зеркально отраженного электрода если заменить ρ^{N-1} на ρ^N/R_1 , полагая, что ρ отличается от R_1 на величину r , на порядок меньшую, чем R_1 .

Тогда получаем

$$\rho_{1,2}^N = \frac{1}{2} \frac{(eR_1^{(1+N)} - 1)(R^{2N} + R_1^{2N}) \pm \sqrt{D}}{eR_1^{(1+2N)}}, \quad (17)$$

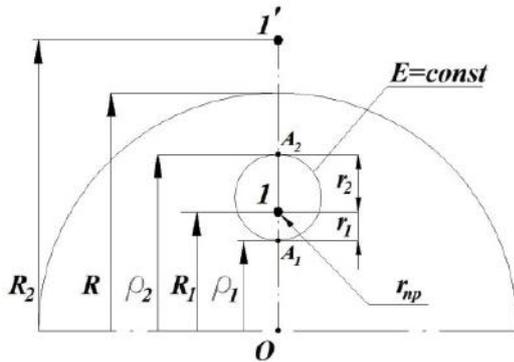


Рисунок 6. Определение границ зоны ионизированного газа

где $D = \left((R^{2N} - R_1^{2N}) (eR_1^{(1+N)} - 1) \right)^2$.

То обстоятельство, что выражение (17) дает два решения для ρ^N , вытекает из того факта, что окружность радиуса r с центром в точке с координатой R_j , характеризующая границу зоны ионизации (рисунок 6), пересекает ординату в двух точках — A_1 и A_2 . Ясно, что большее значение ρ из формулы (17) соответствует точке A_2 , а меньшее — точке A_1 .

Следовательно,

$$R_1 = 0,5(\rho_1 + \rho_2) = \frac{1}{2} \frac{(eR_1^{(1+N)} - 1)(R^{2N} + R_1^{2N})}{eR_1^{(1+2N)}}, \quad (18)$$

$$r = 0,5(\rho_2 - \rho_1) = \frac{1}{2} \frac{(eR_1^{(1+N)} - 1)(R^{2N} - R_1^{2N})}{eR_1^{(1+2N)}}. \quad (19)$$

Формулы (14), (15), (18) и (19) позволяют рассчитать зависимость R_j , r и C от U при напряженности $E = E_{пп}$. Эти зависимости удобно перевести в относительные единицы, приняв за базисные:

Список литературы

1. Ультразвуковые и субультразвуковые генераторы озона / С.В. Шапиро, С.А. Дунаев, А.Г. Саенко, М.А. Садыков, Е.В. Мичков. — LAP Lambert Academic Publishing, 2014. — 120 с.
2. Шапиро С.В., Саенко А.Г., Садыков М.А., Мичков Е.В. Высокочастотный озонатор с охлаждаемым алюминиевым электродом // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2014. — Т. 10. — №1. — С. 49-56.
3. Пат. 2075433 Российская Федерация, МПК⁷ С 01 В. Высокочастотный озонатор / С.В. Шапиро, Б.А. Воронов. — 5064705/26; заявл. 15.04.1992; опубл. 20.03.1997.
4. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. — М.: Изд-во МГУ, 1987. — 236 с.
5. Шапиро С.В., Саенко А.Г. Анализ электрического поля озонатора с бегущим барьерным разрядом в цилиндрической системе координат // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2015. — Т. 11. — № 4. — С. 58-64.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. — М.: Высшая школа, 2001. — 231 с.

- внутренний диаметр диэлектрического цилиндра, $R_0 = R$;
- напряжение на электродах, $U_0 = E_{пп}R$;
- емкость, $C_0 = 2\pi\epsilon_0 Nl$;
- напряженность, $E_0 = E_{пп}$;
- плотность заряда, $\tau_0 = 2\pi\epsilon_0 E_{пп}R$.

Тогда все величины в относительных величинах записываются с подчеркиванием — \underline{R}_j , \underline{r} , $\underline{\rho}$, \underline{U} , \underline{E} , \underline{C} .

В частности,

$$\begin{cases} \underline{U} = \ln \frac{1 - \underline{R}_1^2}{\underline{R}_1 \underline{r}} \\ \underline{C} = \frac{1}{\ln(1 - \underline{R}_1^2) / \underline{R}_1 \underline{r}} \\ \underline{E} = \frac{E}{E_{пп}} \end{cases} \quad (20)$$

Заключение

В результате анализа установлено, что по мере увеличения напряжения на электродах озонатора не только увеличивается объем зоны ионизации, но и перемещение её оси ближе к диэлектрическому барьеру.

Оба перечисленных в пункте 1 фактора свидетельствуют о существенном увеличении емкости газоразрядной зоны озонатора.

Предложенный в статье анализ служит основой для получения оптимального значения числа электродов N , их геометрического расположения внутри газоразрядной зоны и величины напряжения на электродах U .

References

1. Ul'trazvukovye i subul'trazvukovye generatory ozona / S.V. Shapiro, S.A. Dunaev, A.G. Saenko, M.A. Sadykov, E.V. Michkov. — LAP Lambert Academic Publishing, 2014. — 120 s.
2. Shapiro S.V., Saenko A.G., Sadykov M.A., Michkov E.V. Vysokochastotnyi ozonator s okhlazhdaemym alyuminiyevym elektrodom//Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. — 2014. — Т. 10. — № 1. — S. 49-56.
3. Pat. 2075433 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁷ S 01 B. Vysokochastotnyi ozonator / S.V. Shapiro, B.A. Voronov. — 5064705/26; zayavl. 15.04.1992; opubl. 20.03.1997.
4. Filippov Yu.V., Voblikova V.A., Panteleev V.I. Elektrosintez ozona. — M.: Izd-vo MGU, 1987. — 236 s.
5. Shapiro S.V., Saenko A.G. Analiz elektricheskogo polya ozonatora s begushchim bar'ernym razryadom v tsilindricheskoi sisteme koordinat // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. — 2015. — Т. 11. — № 4. — S. 58-64.
6. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Elektromagnitnoe pole. — M.: Vysshaya shkola, 2001. — 231 s.



Павлов С. В.
Pavlov S. V.

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



Павлов А. С.
Pavlov A. S.

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



Сайдуганов А. Р.
Sayduganov A. R.

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



Кунаккужина Н. Ф.
Kunakuzhina N. F.

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

УДК 004:94

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В настоящей статье рассмотрена проблема совместной обработки пространственной, атрибутивной и сетевой информации об объектах инженерной сети для решения расчетных задач в сфере распределения энергоносителей. Существующие информационно-вычислительные комплексы в этой области не учитывают в полной мере пространственную составляющую объектов распределительной сети, являющуюся, несомненно, важным аспектом работы с территориально-распределенными объектами. В качестве подхода к решению этой проблемы в данной статье рассматривается разработка способа описания и хранения сетевой модели данных, агрегирующей комплекс разнотипной информации об объектах инфраструктуры распределяющей организации в рамках информационно-вычислительной системы построения графов инженерных сетей. Предложенный подход к решению данной проблемы необходим для обеспечения информационной поддержки принятия управленческих решений в организациях, где вопрос планирования инфраструктуры инженерных сетей является ключевым. Применение данного подхода позволяет производить расчет режимов работы инженерной сети, что, в свою очередь, может быть использовано при проектировании и модернизации объектов сети. В статье представлена формализация способов описания и хранения сетевой модели данных на основе теоретико-множественного подхода, что с единых методических позиций описывает пространственную, атрибутивную и сетевую информацию в рамках информационной среды предприятия, также разработан алгоритм получения сетевой модели данных из имеющегося комплекса разнотипных данных об объектах сети, являющийся развитием идеи о применении сетевой модели пространственных объектов. В качестве примера практического применения разработанного метода приводится задача моделирования режимов снабжения сети — гидравлический расчет газораспределительной сети в составе геоинформационной системы газораспределительной организации.

Ключевые слова: сетевая модель данных, пространственные данные, ГИС, инженерные сети, сетевой анализ, комплексная обработка, теоретико-множественный подход, граф, информационная поддержка принятия решений, гидравлический расчет.

INFORMATION-COMPUTATION SYSTEM FOR ENGINEERING NETWORKS GRAPH DEVELOPMENT USING CARTOGRAPHIC INFORMATION

This article addresses the problem of the combined description of the spatial, attributive and network information about engineering network objects for calculation tasks in the resources allocation field. Existing information-computation systems used in this sphere doesn't support spatial aspects of distribution network objects. For solving this problem proposed the method of network model description and storage aggregating the complex of polytypic information about distribution organization infrastructure. This method was reflected in information-computation system for engineering networks graph creating. Proposed approach is required to provide information support of manage-

ment making-decision in organizations where the planning of utilities infrastructure is the key aspect. Applying considered approach allow us to calculate the operating mode of engineering networks that is required for networks objects designing and upgrading. In this article represented the formalization of network model description and storage using set-theoretical approach. Further developed an algorithm of network model obtaining from existing complex of polytypic data about network objects. As practical application of developed method considered the modeling of engineering networks operating mode, hydraulic calculation of gas-distribution network that used in geographical information system of gas-distribution organization.

Key words: network model, spatial data, GIS, engineering networks, network analysis, complex processing, set-theoretical approach, graph, information decision support, hydraulic calculation.

Введение

Распределение и передача энергетических ресурсов является актуальной и стратегически важной государственной задачей, поскольку решение вопроса эффективного обеспечения потребителей энергоносителями оказывает влияние на социальные, финансовые и экономические аспекты развития страны. Передача и распределение ресурсов в области нефтегазового сектора в большей части реализуется посредством трубопроводного транспорта, а для его эффективной модернизации и развития требуется информационная поддержка принятия решений, для осуществления которой рынок информационных технологий предлагает сегодня различные информационно-вычислительные системы (ИВС), которые используются, когда требуется обработка большого количества информации. Большинство из них ориентировано на решение конкретных узкоспециализированных аналитических задач, не учитывающих в полной мере для организаций, осуществляющих транспортировку энергоносителей, такую особенность, как то, что объекты, находящиеся в их ведении, распределены территориально (имеют пространственную составляющую). К таким объектам относятся и сами структурные подразделения компаний (секторы, филиалы, отделы), и непосредственно объекты эксплуатации (трубопроводы, различные станции, узлы и т.д.). Поскольку решение вопроса планирования развития инфраструктуры инженерной сети является ключевым моментом в стратегии управления предприятием, и не представляется возможным без учета простран-

ственной составляющей, то для оказания информационной поддержки принятия управленческих решений активно используются современные информационно-вычислительные системы разных классов (например, ERP) совместно с геоинформационными системами (ГИС), предназначенными для обработки пространственных, атрибутивных и сетевых данных об объектах инженерной сети (рисунок 1).

Обработка комплекса исходной информации об объектах инженерной сети подразумевает возможность производить расчет режима работы этой сети, который, в свою очередь, при проектировании новых и модернизации существующих участков инженерной сети поможет определить эффективную конфигурацию схемы и подобрать соответствующее оборудование и материалы. ИВС, используемые в ресурсораспределительных организациях для обработки комплексной информации об объектах инженерной сети, зачастую не ориентированы на совместную обработку пространственной, атрибутивной и сетевой информации. Решение задач сетевого анализа, как правило, абстрагировано от пространственного аспекта, а также от атрибутивной информации, то есть тех компонентов, которые необходимы для моделирования режимов работы инженерной сети. Решение вопроса об эффективном способе совместной обработки пространственных, сетевых и атрибутивных данных в ИВС позволяет использовать их для решения ряда аналитических задач, имеющих значение для стратегии развития инженерной сети, например, для задачи расчета режимов работы инженерной сети.

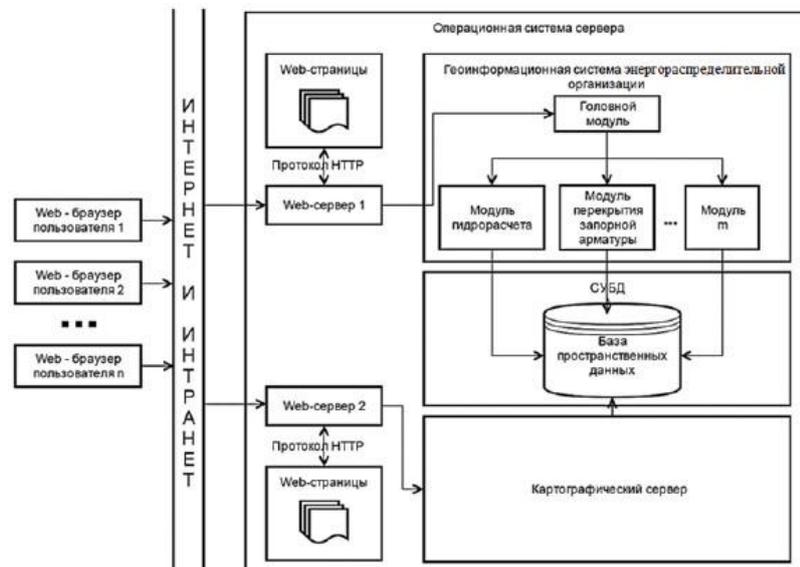


Рисунок 1. Информационно-вычислительная система энергораспределительной организации

Таким образом, актуальными являются задачи разработки способа описания и хранения сетевой модели данных, описывающей совместно пространственные, атрибутивные и сетевые данные. Данная модель впоследствии будет необходима для решения различных аналитических задач, в том числе задачи моделирования режимов энергоснабжения по инженерной сети.

Совместное описание информации инженерной сети

Для комплексной обработки в рамках информационной среды предприятия разнотипной информации необходимо с единых методических позиций описать пространственную, атрибутивную и сетевую информацию об объектах инженерной сети.

Совместное описание всех объектов управления предприятия можно представить на основе теоретико-множественного подхода [1, 2] следующим образом:

$$I = \{I_{атриб}; I_{сетев}; I_{пр}\}, \quad (1)$$

где $I_{атриб}$ — атрибутивные данные, характеризуют описательную информацию объектов предприятия; $I_{сетев}$ — сетевые данные, характеризуют связи между объектами предприятия; $I_{пр}$ — пространственные данные, характеризуют пространственное расположение объектов предприятия.

Пространственные данные — один из видов информационных ресурсов, определяющих специфику их использования, отображения, обмена и поиска. К ним относятся, прежде всего, графическое представление пространственных данных в виде цифровых карт, их координатная привязка к земной поверхности и множество характеристик, связанных с графическими объектами, в соответствии с которыми можно менять отображение этих объектов, которые могут быть представлены в виде точечных, линейных и полигональных объектов, описываемых совокупностью координат. Качественные и количественные характеристики пространственных объектов выражаются множеством служебных атрибутивных данных — специальным информационным ресурсом, тесно связанным с пространственными данными об объекте, хранящимися и обрабатываемыми с ними совместно (идентификатор, наименование, набор свойств и так далее).

Пространственная информация об объектах инженерной сети может быть описана следующим способом:

$$I_{пр} = \{G_{пнт}, G_L, G_{Pol}\}, \quad (2)$$

где $G_{пнт}$ — точечные объекты; G_L — линейные объекты; G_{Pol} — полигональные объекты.

Таким образом, точечные объекты (расположение запорной арматуры, энергораспределительных станций, пунктов редуцирования и других объектов) можно определить в следующем виде:

$$G_{пнт} = \{(x^p, y^p), \{Attr^p\}\}_j, \quad j = \overline{1, n_p}, \quad (3)$$

где $(x^p, y^p), \{Attr^p\}_j$ — пара координат и множество атрибутов j -ой точки; n_p — количество точек.

В свою очередь, линейные объекты (расположение трубопроводов и других объектов) можно определить следующим образом:

$$G_L = \{((x^L, y^L)_q), \{Attr^L\}\}_j, \quad j = \overline{1, n_L}, q = \overline{1, b_j}, \quad (4)$$

где n_L — количество линий; b_j — количество вершин в j -ой линии.

Полигональные объекты (расположение зданий, зон обслуживания, районов и других объектов) также могут быть определены в следующем виде:

$$G_{Pol} = \{((x^{Pol}, y^{Pol})_i), \{Attr^{Pol}\}\}_j, \quad j = \overline{1, n_{Pol}}, i = \overline{1, n_j} \quad t = \overline{2, b_i}, \quad (5)$$

где n_{Pol} — количество полигонов; n_j — количество линий в j -ом полигоне; b_i — количество вершин в i -ой линии.

Под атрибутивными данными понимается множество данных, описывающих свойства пространственных объектов, но не имеющих пространственной компоненты (координат, связи с пространственными характеристиками объектов), и которые не могут быть с ними ассоциированы. Атрибутивные данные хранятся и обрабатываются отдельно от пространственных.

Множество атрибутов инженерной сети может быть описано следующим способом:

$$I_{атриб} = \{(\{A_j\})_i\}, \quad (6)$$

где $(\{A_j\})_i$ — значение j -го атрибута i -го объекта.

Сетевые данные представляются в виде наборов данных, хранящих отношения связности об объектах сети. В качестве модельного представления выступает его граф, который определяется в следующем виде:

$$I_{сетев} = \{V, E, R\}, \quad (7)$$

где V — узлы графа; E — ребра графа; R — совокупность связей.

В свою очередь, узлы можно определить в следующем виде:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \quad (8)$$

где v_n — n -й узел, в качестве которого могут выступать источники и потребители инженерной сети.

В свою очередь, ребра можно определить следующим образом:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}, \quad (9)$$

где e_n — n -ое ребро, в качестве которого могут выступать трубопроводы инженерной сети.

Для определения совокупности связей между узлами графа, представляющего сетевые данные, можно использовать различные способы его представления: в виде списков смежности (список ребер) и списков инцидентности (список узлов). Потребность в подобном представлении возникает при решении расчетных задач [3].

Например, для закольцованного графа (кусочек участка инженерной сети с 4 потребителями, где 1, 3, 4 — физические и 2 — юридический, а также источник под номером 5) список смежности будет выглядеть согласно представленному в таблице смежности графа, а список инцидентности согласно таблицы инцидентности графа, изображенных на рисунке 2 [4].

В списке смежности каждое ребро представлено парой концевых узлов, а в списке инцидентности для каждого узла указаны все смежные с ним, поэтому можно считать, что список инцидентности является записью совокупности связей R между узлами [3].

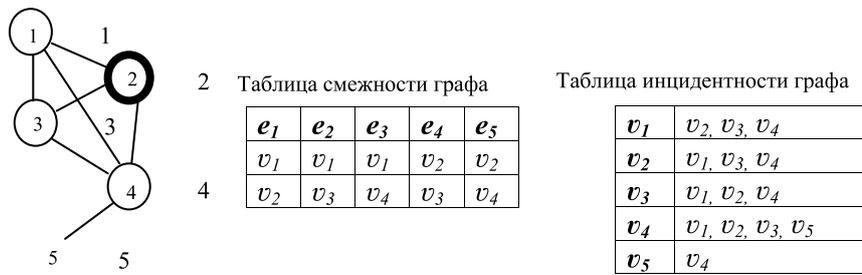


Рисунок 2. Схематичное и табличное представление графа

Способ хранения сетевой модели данных инженерной сети

Изначально данные объектов инженерной сети не содержат сетевую информацию в явном виде, потому что каждый тип объектов имеет свою совокупность данных, составляющими которых являются атрибутивная и пространственная информация, которые представляются в виде классов пространственных объектов, поэтому формализуем способ хранения сетевых данных вместе с пространственными и атрибутивными данными.

Пространственную и атрибутивную составляющие объектов класса пространственных объектов можно представить в следующем виде:

$$T = \{id_i, \{A_j\}, G_i\}, i = \overline{1, n_o}, j = \overline{1, n_A}, \quad (10)$$

где n_o — количество объектов; n_A — количество атрибутов i -го объекта; A_j — значение j -го атрибута i -го объекта; G_j — пространственная информация i -го объекта; id_i — уникальный системный идентификатор i -го объекта, который не повторяется в совокупности информации объектов одного типа. В качестве единицы объекта выступает строка, в таблице 1 показан пример.

Таблица 1. Пространственно-атрибутивная таблица объектов

id	A_1	A_2	...	G
1	значение _{1,1}	значение _{2,1}	...	геометрия ₁
2	значение _{1,2}	значение _{2,2}	...	геометрия ₂
...
n_o	значение _{1, n_o}	значение _{2, n_o}	...	геометрия _{n_o}

Сетевая составляющая объектов класса пространственных объектов обозначается как логическая сеть — это граф связности, который используется для представления и моделирования отношений связности между объектами инженерной сети.

Пространственные объекты в логической сети могут быть представлены в трех видах: точечные — в виде узлов, линейные — в виде ребер, связи между ребрами и узлами — в виде списка инцидентности и могут быть определены по формуле (7), где V — совокупность узлов; E — совокупность ребер; R — совокупность связей.

Таким образом, совокупность узлов может быть определена следующим образом:

$$V = \{F^V, Fid^V, Sid^V, Eid^V\}, \quad (11)$$

где F^V — идентификатор отдельного типа точечных объектов пространственно-атрибутивной составляющей, необходим для определения, к какому типу объектов инженерной сети относится данный объект; Fid^V — идентификатор, который указывает на уни-

кальный идентификатор объекта в пространственно-атрибутивной составляющей; Sid^V — уникальный идентификатор отдельного объекта, геометрия которого разделена узлами; Eid^V — уникальный системный идентификатор узлов графа.

В свою очередь, совокупность ребер может быть определена следующим образом:

$$E = \{F^E, Fid^E, Sid^E, Eid^E\}, \quad (12)$$

где F^E — идентификатор отдельного типа линейных объектов пространственно-атрибутивной составляющей, необходим для определения, к какому типу объектов инженерной сети относится данный объект; Fid^E — идентификатор, который указывает на уникальный идентификатор объекта в пространственно-атрибутивной составляющей; Sid^E — уникальный идентификатор отдельного объекта, геометрия которого разделена узлами; Eid^E — уникальный системный идентификатор узлов графа.

Совокупность связей объектов графа может быть определена следующим образом:

$$R = \{Fid^V, \{Fid_i^V, Fid_i^E\}\}, i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

где n — множество смежных узлов с общим инцидентным ребром; Fid^V — узел; Fid_i^V — смежный узел; Fid_i^E — общее инцидентное ребро узла и смежного узла.

Представим в обобщенном виде пространственно-атрибутивные и сетевые данные и обозначим их как сетевую модель пространственных объектов:

$$I = \{T, I_{сетея}\}, \quad (14)$$

где T — класс пространственных объектов; $I_{сетея}$ — граф пространственных объектов.

После формализации способа хранения сетевой модели данных возникает необходимость создания механизма её получения, где для получения логических данных используется совокупность пространственной и атрибутивной информации. В качестве примера на рисунке 3 в виде блок-схемы отображены этапы получения информации сетевой модели данных.

На первом этапе производится идентификация каждой группы объектов инженерной сети, которые будут участвовать в создании сетевой модели данных, где необходимо определять только те объекты, которые имеют пространственную составляющую в виде точки или линии.

На втором этапе создаются пространственные системные точечные объекты на местах стыков линейных объектов, которые необходимы для того, чтобы обозначить те места, в которых нет пользовательских точечных объектов, где в качестве обоснования их

создания используется теория графов — между ребрами обязательно должны лежать узлы.



Рисунок 3. Блок-схема получения сетевой модели данных

На третьем этапе производится исключение тех системных точечных объектов, пространственные координаты которых соответствуют пользовательским точечным объектам.

На четвертом этапе создается сетевая таблица узлов V на основе точечных объектов, где в качестве источников информации используются результаты третьего этапа.

На пятом этапе создается сетевая таблица ребер E на основе точечных и линейных объектов, где в каче-

стве источников информации используются результаты третьего этапа.

На шестом этапе создается таблица связанности узлов и ребер R на основе принадлежности точек линейным объектам, где в качестве источников информации используются результаты третьего, четвертого и пятого этапов.

В результате создается сетевая модель данных $I_{\text{сетев}}$ и сохраняется в базе геоданных ИВС для дальнейшего использования.

Решение данного вопроса является развитием идеи о применении сетевой модели пространственных объектов в ГИС.

Практическое применение сетевой модели данных

В качестве примера использования разработанного метода приводится задача моделирования режимов снабжения сети (гидравлического расчета газораспределительной сети) в составе геоинформационной системы газораспределительной организации, имеющей сложную территориально-распределенную иерархическую структуру и большое количество сотрудников, которые используют в своей производственной деятельности пространственные, атрибутивные и сетевые данные. ГИС имеет сервис-ориентированную архитектуру (рисунок 1), предоставляющую следующие преимущества:

- одновременная работа большого количества пользователей;
- возможность централизованного хранения и обработки данных;
- снижение требований по программному и аппаратному обеспечению рабочего места пользователя;
- возможность более простого развития и модернизации системы.

Пользовательский интерфейс реализуется клиентской частью и запускается на любом веб-браузере, где в процессе работы формируются запросы к серверу и обрабатываются ответы от него. Клиентская часть состоит из совокупности модулей и файла конфигурации, благодаря чему обеспечивается возможность дальнейшей модернизации системы. Серверная часть, в свою очередь, получает запрос от клиента и выполняет вычисления, после чего формирует результат и отправляет его клиенту по сети с использованием протокола HTTP [4].

На рисунке 4 представлен пример логической сети для описания объектов газораспределения: трубопроводов, пунктов редуцирования газа (ПРГ) и потребителей, а также пример физической реализации сетевой модели пространственных объектов, где показано, каким образом связаны между собой физические объекты трубопроводов, ПРГ и потребителей с таблицами логических связей ребер и узлов, связи которых хранятся в таблице связей [5].

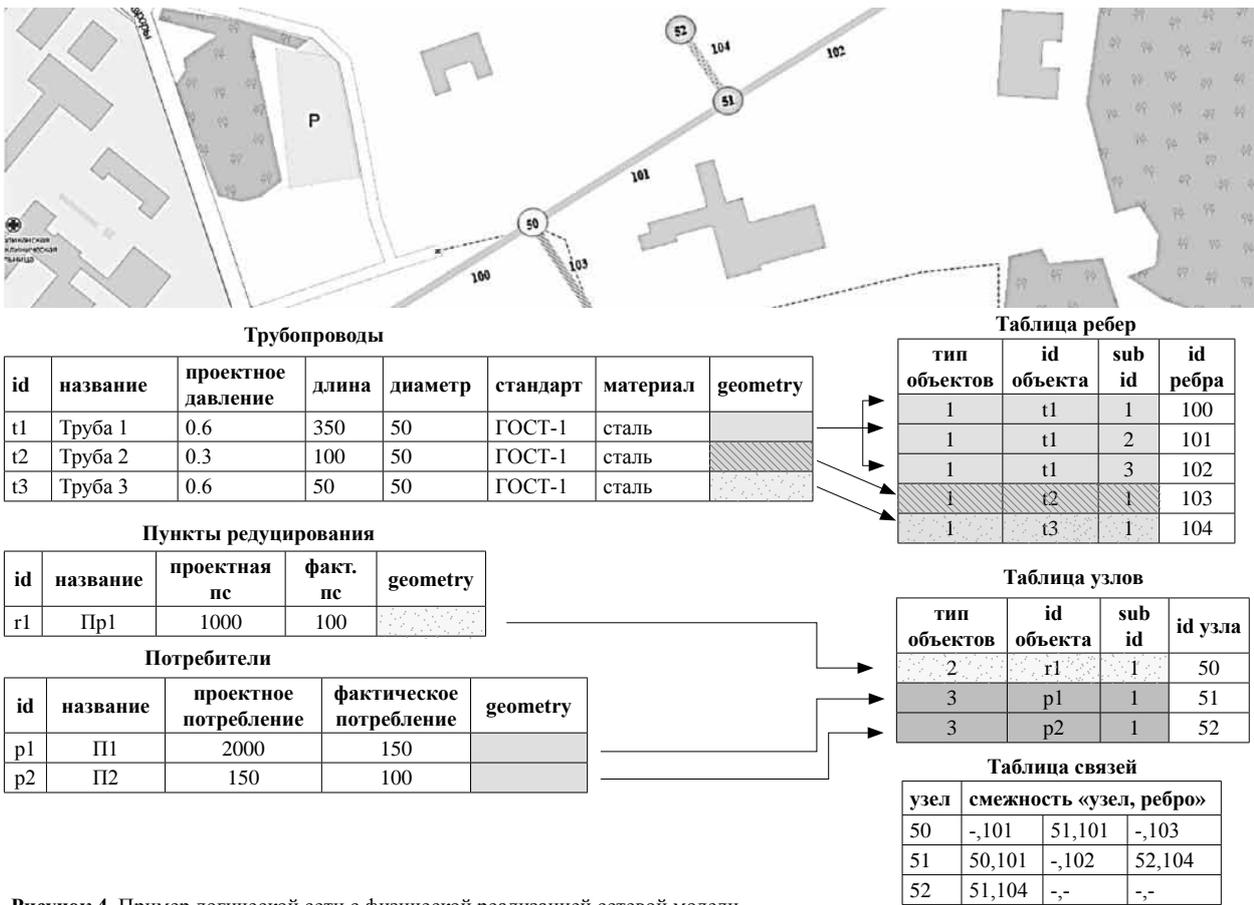


Рисунок 4. Пример логической сети с физической реализацией сетевой модели

Заключение

В работе предлагается подход к разработке информационно-вычислительной системы построения графов инженерных сетей, основанный на разработке способа совместного описания и хранения разнотипной информации, позволяющий представить в едином формализованном виде совокупность объектов инженерной сети распределительного предприятия, а также определить связи между этими объектами, используя уже имеющиеся пространственные и атрибутивные данные. Применение данного способа

позволяет решать большой диапазон аналитических и расчетных задач, результаты которых могут быть использованы для информационной поддержки принятия управленческих решений на предприятиях нефтегазового комплекса. Разработанный метод прошел апробацию при решении задачи моделирования режимов снабжения сети (гидравлического расчета газораспределительной сети) в составе информационно-вычислительной системы газораспределительной организации.

Список литературы

1. Egenhofer M., Sharma J. Topological relations between regions in R2 and Z2 // Third International Symposium on Large Spatial Databases (SSD'93). Lecture Notes in Computer Science, SpringerVerlag. — Singapore, 1993. — Vol. 692. — P. 316-336.
2. Kelley J.L. General Topology. New York: D. van Nostrand Company, Inc., SpringerVerlag., 1955. - 312 p.
3. Домнин Л.Н. Элементы теории графов: учеб. пособие. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. — 144 с.
4. Павлов С.В., Павлов А.С., Самойлов А.С. Обработка пространственной информации в распределенной ГИС ресурсораспределительной организации промышленного региона // Вестник УГАТУ. — 2013. — Т. 17. — № 5 (58). — С. 122-128.
5. Бикташев Т.У., Павлов А.С., Сайдуганов А.Р. Разработка методов совместной обработки пространственной, атрибутивной и сетевой информации для

поддержки принятия управленческих решений на предприятиях нефтегазового комплекса // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем. — 2015. — С. 127-133.

References

1. Egenhofer M., Sharma J. Topological relations between regions in R2 and Z2 // Third International Symposium on Large Spatial Databases (SSD'93). Lecture Notes in Computer Science, SpringerVerlag. — Singapore, 1993. — Vol. 692. — P. 316-336.
2. Kelley J.L. General Topology. New York: D. van Nostrand Company, Inc., SpringerVerlag., 1955. - 312 p.
3. Domnin L.N. Elementy teorii grafov: ucheb. posobie. - Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2007. - 144 s.
4. Pavlov S.V., Pavlov A.S., Samoilov A.S. Obrabotka prostranstvennoi informatsii v raspredelennoi GIS

resursoraspredelitel'noi organizatsii promyshlennogo regiona // Vestnik UGATU. — 2013. — Т. 17. — № 5 (58). — С. 122-128.

5. Biktashev T.U., Pavlov A.S., Saiduganov A.R. Razrabotka metodov sovmestnoi obrabotki prostranstvennoi, atributivnoi i setevoi informatsii dlya podderzhki prinyatiya upravlencheskikh reshenii na

predpriyatiyakh neftegazovogo kompleksa // Geoinformatsionnye tekhnologii v proektirovanii i sozdanii korporativnykh informatsionnykh sistem. — 2015. — С. 127-133.



Павлова А. С.

Pavlova A. S.

аспирант кафедры «Системы управления и контроля химических производств», ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет» (МAMI), г. Москва, Российская Федерация

УДК 004.58

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МНОГОСВЯЗНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Эффективное управление технологическими объектами является важнейшим фактором при проектировании систем. В статье рассмотрен комплекс вопросов по созданию элементов управления для объектов многосвязного регулирования на примере разделительного производства. Указаны ключевые стадии для успешного создания автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП). Дана краткая характеристика разделительного производства, описываются основные единицы оборудования и их компоновка. Представлены структурная схема разделительного производства и параметры, используемые для диагностики технического состояния объекта и управления технологическими процессами разделительного производства.

Для контроля и управления объектами применяются промышленные контроллеры, имеющие программную модель согласно стандарту IEC 61131-3. Эта модель характеризуется такими свойствами, как структурированное программирование, иерархическая организация, программные интерфейсы. Важнейшим аспектом контролирования объектов является четко спроектированная система сбора и анализа данных. Для поддержки считывания больших объемов данных за очень короткое время для разделительного производства реализована функция статических регистров. Под статическими регистрами понимают четко заданную последовательность регистров, хранящую в себе номера для считывания и фактические значения. Функция статических регистров позволяет унифицировать метод управления рабочими данными по технологическому объекту и стандартизировать подход к проектированию АСУТП. В статье представлена структурная схема передачи данных и алгоритм конвертации статических регистров для аналоговых и дискретных значений. Главная задача — это корректная передача данных на систему верхнего уровня. Для этого отправляется циклическая телеграмма, которая содержит заголовок, метку времени и данные. На основе анализа управления сделаны выводы о применении единой методологии для реализации систем управления процессами с многосвязной структурой.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическими процессами, регистры, статические регистры, стандарты, память процессора, производительность, унификация.

STANDARDIZATION OF TECHNOLOGICAL OBJECTS OF THE MULTICOUPLING REGULATION

Effective management of technological objects is the major factor in case of design of systems. In article the complex of questions on creation of controls for objects of the multicoupling regulation on the example of separating production is considered. Key stages for successful creation of the automated control system for technological process (PCS) are specified. The short characteristic is given to separating production, fundamental units of the equipment and their configuration are described. The skeleton diagram of separating production and parameters used for diagnostics of technical condition of object and control of technological processes of separating production is provided. The industrial controllers having program model according to the IEC 61131-3 standard are used to monitoring and object management. This model is characterized by such properties as the structured programming, hierarchical arrangement, program interfaces. The most important aspect of monitoring objects is accurately designed system of

collection and data analysis. For support of reading of large volumes of data in very short time, for separating production function of static registers is realized. Understand as static registers accurately the given sequence of registers, storing in itself numbers for reading and the actual values. Function of static registers allows to unify a method of management of working data from technological object and to standardize the design approach PCS. In article the skeleton diagram of data transfer and algorithm of conversion of static registers for analog and discrete values is provided. The main task, is correct data transfer on system of the top level. For this purpose the cyclic telegram which contains title, a time stamp and data goes. On the basis of the analysis of control conclusions are drawn on application of uniform methodology for implementation of management systems by processes with the multicoupling structure.

Key words: automated process control system, registers, static registers, standards, memory of the processor, productivity, unification.

Введение

Ключевыми стадиями для успешного создания АСУТП являются самые первые стадии, в которых определяются начальные условия всего процесса создания будущей системы, и в значительной степени определяется результат, а именно:

1. Формирование требований к АСУТП;
2. Разработка концепции АСУТП;
3. Разработка технического задания на создание АСУТП.

Тщательное выполнение этих стадий позволяет избежать множества проблем в последующей реализации проекта.

В данной статье уделяется внимание второй стадии проектирования — разработке концепции АСУТП. Для современных систем управления актуально применение систем с возможностью «открытости» [1]. Под этим качеством понимается возможность объединения в рамках общей системы оборудования и программного обеспечения самых разных производителей. Этот подход эффективен, но в обмен на возможность применения разнородного оборудования приобретает множество проблем, связанных с эксплуатацией и обслуживанием, а также проблема защиты от внешнего вмешательства и проникновения вирусов. В связи с развитием кибератак и политической ситуацией в мире основным требованием к оборудованию и программному обеспечению АСУТП выступает не абстрактная «открытость», а напротив, детерминированность (строгая определенность и предсказуемость) поведения, а также жесткость, устойчивость и закрытость программно-технической конструкции для конкретного применения.

В нашей стране находится достаточно большое количество объектов с многосвязно повторяющейся структурой. Представителями многосвязных объектов в нашей стране являются всевозможные разделительные производства, ткацкие производства, металлургические производства и т.д.

Объектами многосвязного регулирования служат агрегаты и процессы, в которых имеются несколько подлежащих регулированию величин, связанных между собой так, что изменение какой-либо из них вызывает изменение некоторых или всех остальных [2]. Взаимное влияние регулируемых величин может возникнуть за счет искусственно создаваемых внешних связей между отдельными параллельно работающими агрегатами. Сложную многосвязную систему обычно рассматривают как состоящую из отдельных

элементарных подсистем (сепаратных систем), связанных между собой [3]. Существуют работающие комплексы, которые нуждаются в модернизации, внедрении новых средств автоматизации с учетом современных требований к безопасности управления технологическим процессом.

В данной статье рассмотрен вопрос эффективности управления объектов с многосвязной структурой на примере разделительного производства.

Существует четыре основных метода разделения (обогащения): магнитная сепарация, газодиффузионный метод, центрифужный и лазерный. Методы разделения различаются по степени селективности. Высокая селективность не всегда приводит к лучшим экономическим показателям. Соотношение капитальных вложений и энергетических затрат может сделать предпочтительными процессы с малой селективностью. Если селективность мала, требуемая концентрация конечного продукта может быть достигнута путем последовательного обогащения в установках, состоящих из большого числа ступеней. Основной единицей оборудования разделительного производства являются газовые центрифуги [4].

Разделительное производство в целом характеризуется значительной территориальной распределенностью и большим числом однотипного технологического оборудования [4].

Разделительное производство сегодня — это каскады из сотен тысяч центрифуг, непрерывный режим работы, большое количество точек контроля, территориальная рассредоточенность точек контроля в пределах цеха, удаленность оборудования от диспетчерского пункта до 1 км, высокий уровень электрических помех, высокая стоимость оборудования, повышенные требования к надежности.

Большое количество данных является результатом наличия многократно повторяющихся структур. Каждая центрифуга имеет набор параметров, за которыми осуществляется контроль по границам, пересчет различных параметров, а также выявление различных групповых сигналов. Одной из важнейших задач реализации концепции построения системы является унификация технических решений.

Модель разделительного производства

Разделительное производство в целом характеризуется значительной территориальной распределенностью и большим числом однотипного технологического оборудования [4].

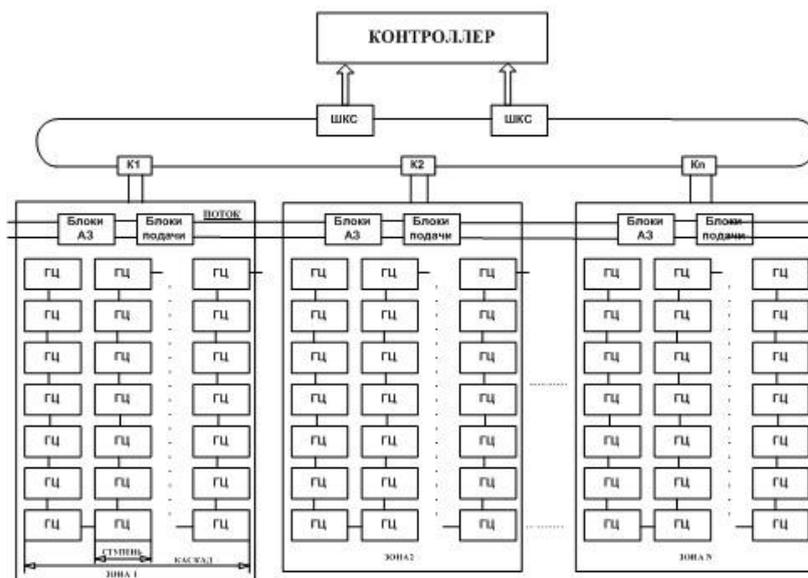


Рисунок 1. Структурная схема разделительного производства

Структурная схема разделительного производства показана на рисунке 1.

Наименьшей единицей оборудования является газовая центрифуга (ГЦ), контролирующий элемент у ГЦ — это датчик сигнализации вращения и датчик питания сети. Датчик сигнализации вращения формирует периодический сигнал, частота и напряжение которого зависят от скорости вращения ротора. Сигнал питающей сети формируется путем понижения линейного или фазного напряжения питания электродвигателя ГЦ. Анализ двух указанных сигналов позволяет определить параметры, используемые для диагностики технического состояния ГЦ и управления технологическими процессами разделительного производства.

В таблице 1 показаны данные, которые рассчитываются в программном контролере по заранее заданным расчетным формулам.

В данной таблице представлена упрощенная модель регулирования без учёта всех параметров управления.

Согласно таблице с одной ГЦ выходит 3 аналоговых сигнала и 6 дискретных. За получение сигналов от процесса и генерацию выходных сигналов отвечает система управления оборудованием. Для реализации управления разделительного производства в качестве программного модуля используется метод регистрового чтения.

Метод регистрового чтения

Программным модулем является информационная, состоящая из процедур структура, которая может взаимодействовать с другими аналогичными структурами. Для построения информационной структуры используются промышленные контроллеры (ПЛК), имеющие стандартную архитектуру.

В архитектуре ПЛК находятся следующие основные компоненты: процессорный модуль, блок питания и модули ввода/вывода [5]. Процессорный модуль состоит из собственно процессора (CPU) и памяти. Модули ввода/вывода бывают дискретными и аналоговыми. Стандарт IEC 61131-3 задает программную модель, соответствующую современным принципам разработки программных продуктов. Эта модель характеризуется такими свойствами, как структурированное программирование, иерархическая организация, программные интерфейсы. Важнейшим параметром ПЛК является емкость памяти, характеризующаяся количеством переменных, которые можно обработать за время функционирования ПЛК. Время доступа к памяти — один из наиболее существенных показателей, способных ограничить быстродействие. Из-за этого происходит деление памяти на уровни иерархии с учетом частоты и скорости использования имеющихся в ней данных.

Основные типы памяти ПЛК:

- ПЗУ — постоянное запоминающее устройство;
- ОЗУ — оперативное запоминающее устройство.

ОЗУ — это оперативная память, которая используется только во время выполнения программы, при

Таблица 1. Расчет параметров газовой центрифуги

Название сигнала	Условие формирования/описание	Обозначение сигнала	Тип сигнала
Частота вращения	Сигнал с датчика	$F_{\text{вращ}}$	аналог.
Частота питающей сети	Сигнал с датчика	$F_{\text{пит}}$	аналог.
Модуль биения	Техническая диагностика состояния газовой центрифуги	A	аналог.
Одиночный выход	Частота входного сигнала ниже установленного порогового значения	1В	дискрет.
Одиночное разрушение	Отсутствие частоты входного сигнала датчика	1Р	дискрет.
Одиночный обрыв связи	Сопrotивление источника сигнала выше порогового значения	1С	дискрет.
Групповые сигналы	Количество сформированных сигналов «1В», «1Р», «1С»	ГВ, ГР, ГС	дискрет.

отключении питания информация, хранившаяся в памяти, пропадает. ОЗУ представляет собой набор регистров. Существуют регистры специального назначения и общего назначения.

Регистры общего назначения — это просто пустые ячейки памяти, которые могут использоваться программистами для хранения в оперативной памяти какой-то пользовательской информации.

Основная задача, стоящая перед программистом-проектировщиком, — эффективно распределить количество сигналов в соответствии с пропускной способностью сети и ОЗУ контроллера. Для поддержки считывания больших объемов данных за очень короткое время для разделительного производства реализована функция статических регистров. Статические регистры — это четко заданная последовательность регистров, хранящая в себе номера для считывания и фактические значения.

Программирование ПЛК имеет отличие от традиционного программирования. Это связано с тем, что ПЛК исполняют бесконечную последовательность программных циклов, в каждом из которых происходит вычисление выходных сигналов и проверка логических условий, а также выдача управляющих сигналов и при необходимости управление индикаторами интерфейса оператора.

Суть метода статических регистров заключается в задании каждому сигналу с технологического объекта определенного места в памяти и присваивании сигналу не бинарной единицы, а десятичного числа. Пример реализации алгоритма представлен ниже.

Управление неполадками

Важнейшим аспектом контролирования объектов является четко спроектированная система сбора и анализа данных. Функция статических регистров позволяет унифицировать метод управления рабочими данными от технологического объекта и стандартизировать подход к проектированию АСУТП. Структурная схема передачи данных разделительного производства показана на рисунке 2.

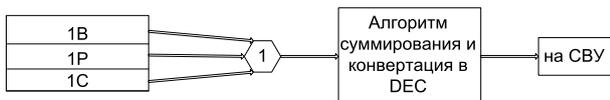


Рисунок 2. Структурная схема передачи данных

С объекта на процессорный модуль поступают дискретные сигналы неисправностей 1В, 1Р, 1С, в памяти процессора хранится алгоритм конвертации булевых значений в соответствующие им десятичные значения (поле DEC в таблице 2), у каждого сигнала есть свое определенное место в памяти согласно полю Bit в таблице 2. Полное заполнение регистра представлено в таблице 2.

Таблица 2. Неполадки и аварийные сигналы

Bit	Hex	Dec	Регистр 40026
0	0001	1	1В
1	0002	2	1Р
2	0004	4	1С
3	0008	8	Резерв
4	0010	16	Резерв
5	0020	32	Резерв
6	0040	64	Резерв
7	0080	128	Резерв
8	0100	256	Резерв
9	0200	512	Резерв
10	0400	1024	Резерв
11	0800	2048	Резерв
12	1000	4096	Резерв
13	2000	8192	Резерв
14	4000	16384	Резерв
15	8000	32768	Резерв

Расшифровка полей таблицы 2:

«Bit» — означает по IEC 60027-2 двоичное число, равное соответствующему разряду в двоичной системе; «Hex» — обозначение шестнадцатеричной системы счисления; «Dec» — обозначение десятичной системы счисления; «Регистр 40026» — регистр с номером 40026.

В одном регистре можно передавать до 32 сигналов (32 бита). Сигналы от процессорного модуля поступают в виде числа в десятичной системе измерения. Алгоритм суммирования подразумевает сумму пришедших за один цикл опроса с датчиков вращения логических единиц. Результат от суммирования представляется в десятичной форме и передается на сверхбыстрое вычислительное устройство (СВУ) для отображения на экране, записи в архив или дальнейшей обработки. На систему верхнего уровня приходит десятичное значение, которое формируется методом суммирования чисел в колонке DEC.

Пример работ

На СВУ с регистра 40026 приходит значение 6. Значение 6 получается в результате суммирования чисел 4 и 2. Значит за один цикл у определенной газовой центрифуги наличие двух сигналов неисправностей. Согласно заранее определенной таблице это сигналы 1Р и 1С.

Данный метод не имеет жестко заданной структуры, она свободно проектируемая, каждый проектировщик системы управления может решать, как, что и в каких регистрах ему хранить.

Согласно нашему производственному процессу на основе одиночных сигналов формируются групповые сигналы. На рисунке 3 изображена структурная схема метода формирования групповых сигналов.



Рисунок 3. Структурная схема метода формирования групповых сигналов

Управление аналоговыми значениями

Для передачи аналоговых значений и расшифровки используется аналогичный способ. Пример реализации показан в таблице 3.

Таблица 3. Аналоговые сигналы

Bit	Hex	Dec	Регистр 40038
0	0001	1	F _{вращ}
1	0002	2	F _{пит}
2	0004	4	A
3	0008	8	Резерв
4	0010	16	Резерв
5	0020	32	Резерв
6	0040	64	Резерв
7	0080	128	Резерв
8	0100	256	Резерв
9	0200	512	Резерв
10	0400	1024	Резерв
11	0800	2048	Резерв
12	1000	4096	Резерв
13	2000	8192	Резерв
14	4000	16384	Резерв
15	8000	32768	Резерв

Процессорный модуль записывает в каждый регистр аналоговое значение и время и хранит его в течение одного цикла. Алгоритм анализа аналоговых значений осуществляется на СВУ. Главная задача — это корректная передача данных на СВУ. Для этого отправляется циклическая телеграмма, которая содержит заголовок, метку времени и данные. В заголовке циклической телеграммы формируется технический адрес секции ГЦ, который преобразуется по определенным правилам в логический адрес. Данные в телеграмме имеют строго упорядоченную последовательность аналоговых значений технологического параметра и их регистровых индексов (сопроводителей) для всех ГЦ, входящих в состав технологической секции.

Пример телеграммы представлен на рисунке 4.

Рисунок 4. Вид телеграммы

Номер бита	Состав телеграммы
0	Длина ТЛГ (TlgLen)
1	Код операции (219)
2	Ergors
3	Номер главного объекта
4	Номер объекта
5	DEC
6	Значение DEC
7	DEC
8	Значение DEC
...	...
...	...
n	Битовые флаги событий измерения для n-ой ГЦ
n+1	Контрольная сумма

Список литературы

1. Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. — М.: Инфра-Инженерия, 2008. — 928 с.
2. Зайцева Е.В., Кравцов А.Ф. Многосвязное регулирование в черной металлургии. — Киев: Техника, 1978. — 134 с.

Длина ТЛГ — это длина полезных данных телеграммы.

Код операции — идентификатор для определения типа отправляемой телеграммы.

Ergors — код ошибки, в случае наличия ошибки в ПЛК.

Номер главного объекта — принадлежность объекта к определенной группе или зданию.

Номер объекта — номер объекта в группе или здании.

DEC — идентификатор сигнала.

Значение DEC — текущее аналоговое значение определенного сигнала.

Данный тип телеграмм может отправляться циклически, а может — по запросу пользователя.

Заключение

Процесс становления систем управления данными в промышленности не только давно начался и установился, а идет постоянно нарастающим потоком. Однако, большая часть неприятностей, связанных с системами управления технологическими процессами, предопределяется ошибками при неформальном отношении к разработке концепции обработки и управления данными процесса. Постоянно появляются новые способы систематизации, конвертации и передачи данных от технологического процесса. Управление большим объемом данных — это задача, требующая четкой структуры организации и анализа этих данных. Существует большое количество иностранных и отечественных программных пакетов для проектирования систем контроля и управления технологическими процессами. В данных программных обеспечениях имеются определенные подходы для организации структур с большим объемом, такие как применение эталонных схем или использование одинаковых функциональных блоков.

Однако на данный момент специалистами не достигнуто однозначного соглашения, каким образом наиболее эффективно работать с одинаковым набором параметров. Применение единой методологии, предложенной в статье для реализации систем управления процессами с многосвязной структурой, позволило бы унифицировать процесс разработки, сократить время на разработку концепции системы, тем самым увеличить коэффициент эффективности.

3. Зырянов Г.В. Системы управления многосвязными объектами: учеб. пособие. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. — 112 с.

4. Обогащение урана / Е. Беккер, Ф. Босхотен, Б. Бриголи, Р. Дженсен, Д. Массиньон, Н. Натрат, К. Робинсон, Суббарамайер, С. Виллани; под. ред.

С. Виллани; пер. с англ. под ред. И.К. Кикоина. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 320 с.

5. Минаев И.Г., Самойленко В.В. Программируемые логические контроллеры: практическое руководство для начинающего инженера. — Ставрополь: АГРУС, 2009. — 100 с.

References

1. Fedorov Yu.N. Spravochnik inzhenera po ASUTP: Proektirovanie i razrabotka. — M.: Infra-Inzheneriya, 2008. — 928 s.

2. Zaitseva E.V., Kravtsov A.F. Mnogosvyaznoe regulirovanie v chernoii metallurgii. — Kiev: Tekhnika, 1978. — 134 s.

3. Zyryanov G.V. Sistemy upravleniya mnogosvyaznymi objektami: ucheb. posobie. — Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YuUrGU, 2010. — 112 s.

4. Obogashchenie urana / E. Bekker, F. Boskhoten, B. Brigoli, R. Dzhensen, D. Massin'on, N. Natrat, K. Robinson, Subbaramaier, S. Villani; pod. red. S. Villani; per. s angl. pod red. I.K. Kikoina. — M.: Energoatomizdat, 1983. — 320 s.

5. Minaev I.G., Samoilenko V.V. Programmiruemye logicheskie kontrollery: prakticheskoe rukovodstvo dlya nachinayushchego inzhenera. — Stavropol': AGRUS, 2009. — 100 s.



Хакимов Д. В.
Khakimov D. V.

аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы», ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, Российская Федерация



Киселев С. К.
Kiselev S. K.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Измерительно-вычислительные комплексы», ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, Российская Федерация

УДК 629.7.05

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В статье рассмотрены основные положения оптимизации структуры комплексов бортового оборудования (КБО) летательных аппаратов (ЛА). Выявлена необходимость смены основных принципов проектирования функциональной структуры КБО. Поставлена задача проведения процессов оптимизации на ранних стадиях проектирования КБО. Предложен метод оптимизации функциональной структуры КБО. Введены и описаны основные принципы построения дерева функций изделия (ДФИ), основные условные графические обозначения (УГО), даны основные понятия и определения. Определены цели оптимизации ДФИ. В качестве основного критерия оптимизации выбран критерий отказобезопасности функций КБО. При создании системы автоматизированного проектирования (САПР) возможно создание нескольких путей оптимизации ДФИ методом смены приоритетов критериев оптимизации. Сформирован перечень данных, необходимых для проведения процесса оптимизации ДФИ, определены основные документы, являющиеся источниками данных. Предложен метод оптимизации ДФИ. Определены основные этапы процесса оптимизации ДФИ. Выделены условия идентичности функций. Предложен алгоритм проведения первого этапа процесса оптимизации функциональной структуры КБО. Данный алгоритм разработан в общем виде и в дальнейшем может быть использован как один из основополагающих для разработки САПР по оптимизации ДФИ. Описаны возможности изменения глубины оптимизации ДФИ. Показана необходимость проведения оценки безопасности систем и бортового оборудования ЛА параллельно с процессом оптимизации функциональной структуры КБО. Для оценки качества процесса оптимизации предложено использовать результаты проведения процесса оценки безопасности систем и бортового оборудования ЛА в соответствии с ВС ГА-Р4761 «Руководство по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации».

Установлена взаимосвязь между процессом построения и оптимизацией ДФИ и процессом оценки безопасности систем и бортового оборудования ЛА.

Ключевые слова: архитектура, оптимизация, алгоритм, модель, авионика, интегральная модульная авионика, безопасность, структура комплекса бортового оборудования, анализ, дерево функций, функциональная структура, аппаратная структура.

STRUCTURE OPTIMIZATION THE ONBOARD EQUIPMENT OF THE AIRCRAFT BASED ON THE OPTIMIZATION OF THE FUNCTIONAL STRUCTURE EARLY IN THE DESIGN

The article describes the main provisions of optimizing the structure of complex onboard equipment (COE) of the aircraft. The necessity of changing the basic principles of the design of the functional structure of the COE. The task of optimization processes in the early stages of the design of the COE. Proposed a method for optimizing the functional structure of the COE. Introduced and describes the basic principles of the tree functions of products (TFP), the main conditional graphical notation (CGN) are the basic concepts and definitions. The aims of optimization TFP. The main criterion optimization criterion selected fail-safe functions of the COE. When you create a CAD you can create multiple ways to optimize the method of changing priorities TFP optimization criteria. Make a list of the data required for process optimization TFP, the basic document is the data source. Proposed a method of optimizing the functions of TFP. The main steps in the process of optimization of TFP. Obtained conditions identical functions. The algorithm of the first stage of the process to optimize the functional structure of the complex onboard equipment. This algorithm is designed in a general way and can further be used as one of the fundamental for the development of the CAD optimization TFP. Learn to change the depth of optimization TFP. The necessity of assessing the safety systems and aircraft avionics in parallel with the optimization of the functional structure of the COE. To assess the quality of the optimization process is proposed to use the results of the evaluation process safety systems, and avionics of aircraft in accordance with VS GA-R4761 «Guidance on Assessment Methods for Security Systems and Onboard Equipment of Civil Aircraft». The relationship between the process of building and optimizing the TFP and the process to evaluate the safety systems, and avionics aircraft.

Key words: architecture, optimization, algorithms, models, avionics, integrated modular avionics, security, structure of the complex avionics, analysis, tree functions, functional structure, hardware structure.

Введение

В настоящее время в авиаприборостроении происходит постепенный переход от федеративной архитектуры комплексов бортового оборудования (КБО) к КБО на основе интегрированной модульной авионики (ИМА). Данный процесс сопровождается коренными изменениями в архитектуре структуры КБО летательных аппаратов (ЛА). Однако сдерживающим фактором является используемый повсеместно принцип формирования функциональной структуры КБО ЛА, заключающийся в распределении функций между системами КБО по их принадлежности к одной из функций уровня ЛА. При проектировании ИМА на основе функциональной структуры, построенной по такому принципу, аппаратная структура ИМА фактически повторяет федеративную структуру авионики, тем самым основные достоинства ИМА нивелируются. Так как в ИМА функции не привязаны к определенному аппаратному блоку, то возможно разработать иной принцип построения и оптимизации функциональной структуры КБО ЛА, который в большей степени будет отвечать новому принципу построения КБО.

В статье рассмотрены метод построения и первый этап оптимизации функциональной структуры КБО ЛА на основе дерева функций изделия (ДФИ).

1. Построение дерева функций изделия

ДФИ — это древовидная структура, наглядно отображающая функциональную структуру КБО ЛА.

Построение ДФИ является последовательно-параллельным процессом. Структурными подразделениями разработчика процесс проектирования ветвей

ДФИ ведется одновременно, однако каждое из подразделений проектирует отдельные ветви ДФИ по последовательному принципу. Исходные данные, достаточные для проектирования, содержатся в техническом задании (ТЗ) и ФНА (Functional Hazard Assessment — оценка функциональных опасностей, данный документ разрабатывается в соответствии с [1]) на КБО.

ТЗ на КБО ЛА содержит перечень функций уровня ЛА. В ФНА каждой функции назначен уровень гарантии проектирования (УГП). Эти данные являются исходными для последующего построения и расчета УГП функций в составе ДФИ. Расчет УГП производится по классическим математическим моделям надежности технических изделий [2].

Эффективность предлагаемого метода разработки функциональной структуры КБО и его влияние на параметры безопасности ЛА можно контролировать с помощью внедряемого на отечественных предприятиях процесса оценки безопасности систем и бортового оборудования ЛА [1]. Этот процесс является последовательным и итерационным. В связи с этим на протяжении всего процесса проектирования КБО могут возникать новые требования, предъявляемые к структуре КБО. Так как процесс оценки безопасности систем и бортового оборудования ЛА и процесс построения и оптимизации функциональной структуры КБО ЛА в процессе проектирования КБО ведутся параллельно и результаты одного из процессов могут вести к изменениям в другом, то можно сказать, что эти процессы согласованы.

Основные принципы построения ДФИ [1, 3, 4]:

— ДФИ является сложной многоуровневой структурой, строящейся на основе иерархической вложенности ряда функций нижнего уровня в единую функцию верхнего уровня;

— функция нижнего уровня может входить в состав неограниченного числа функций верхнего уровня;

— функция нижнего уровня может входить в состав функции любого из верхних уровней;

— каждая функция в составе ДФИ имеет порядковый номер в зависимости от ее иерархического местоположения;

— ДФИ может быть изменено разработчиком в любой момент времени.

Построенное таким образом ДФИ позволяет отобразить сколь угодно сложные функциональные связи оборудования КБО, при этом сохраняется возможность изменять строение ДФИ в процессе оптимизации его структуры.

Введем ряд базовых определений для описания элементов ДФИ:

1. Уровень функции — это иерархически определяемое местоположение функции в ДФИ;

2. Функции верхнего уровня — это функции уровня ЛА, которые не входят в состав каких-либо других функций и имеют высшее иерархическое положение в ДФИ;

3. Базовая функция — это функция, разложение которой на подфункции является невозможным, либо нецелесообразным;

4. Измерительная базовая функция — функция измерения одного из параметров ЛА;

5. Промежуточная функция — это функция, которая является частью функции более высокого уровня и при этом является функцией более высокого уровня для ряда других функций из состава дерева функций;

6. Комплексная функция — это функция, являющаяся результатом объединения нескольких функций нижнего уровня.

Измерительные функции всегда являются базовыми, так как результаты измерения текущих параметров ЛА являются исходными данными для промежуточных и функций верхнего уровня. Однако разработчик может ограничить глубину разложения промежуточных функций на каком-либо этапе построения ДФИ и присвоить промежуточной функции статус базовой. Причиной этого может являться, например, запланированное использование серийного изделия. Такое решение справедливо, если набор функций, исполняемых серийным изделием, нецелесообразно подвергать процессу оптимизации, либо в связи тре-

бованиями заказчика изделия. Таким образом, глубина анализа ДФИ может быть ограничена разработчиком изделия.

Определим используемые при построении ДФИ условные графические обозначения (УГО) (таблица 1).

На рисунке 1 а, б приведены примеры оформления двух частей ДФИ, построенных на основе КБО гражданского вертолета. Функции 3 «Функции формирования и отображения пилотажно-навигационной информации» и 4 «Функции пилотирования и управления вертолетом» являются комплексными функциями. Данным комплексным функциям в ТЗ на КБО не был присвоен УГП, однако функциям, на которые они разложены, эти параметры указаны. Поэтому в приведенных ДФИ указание УГП начинается не с функций верхнего уровня. Такое упрощение допустимо тогда, когда комплексная функция является суммой входящих в нее промежуточных функций и данные промежуточных функций не подвергаются никаким изменениям.

На первых этапах проектирования разработчик может иметь несколько различных вариантов структуры ДФИ, построенных с применением различных способов реализации функций. Эти варианты ДФИ необходимо сравнить между собой и выбрать оптимальный.

Анализ первичного ДФИ позволяет выделить следующие цели оптимизации:

- минимизация количества функций в составе ДФИ путём поиска и устранения повторов функций в различных ветвях ДФИ;

- наложение структурных методов повышения отказобезопасности функций КБО, таких как резервирование, периодическая коррекция данных, комплексная обработка данных и т.д.;

- выделение групп функций, которые возможно реализовывать в рамках одной аппаратной структурной единицы.

2. Оптимизация структуры ДФИ

Процесс оптимизации целесообразно разделить на несколько этапов:

- минимизация количества повторов функций в составе ДФИ;

- поиск функций, которые могут быть реализованы методом преобразования данных одной или нескольких других функций КБО;

- группирование функций КБО для их последующей реализации в рамках одной системы КБО.

В рамках данной статьи рассмотрен только первый этап оптимизации.

Таблица 1. УГО, используемые для построения ДФИ

Символ	Описание
	наименование функции
	указатель базовой функции и уровня гарантии проектирования
	указатель промежуточной функции и уровня гарантии проектирования
	указатель того, что функция является частью комплексной функции



Рисунок 1. Пример первичного ДФИ на основе существующего гражданского вертолета

Для минимизации количества функций в составе ДФИ требуется провести анализ всего ДФИ и провести процедуру поиска и устранения повторов идентичных функций.

Произведем выборку функций КБО, подлежащих рассмотрению, и внесем их в множество $F\{f_1, \dots, f_a\}$, где a — переменная, соответствующая порядковому номеру функции в ДФИ. В состав этого множества не будут включены функции, зафиксированные в ТЗ на КБО, так они являются основой ДФИ.

Каждая функция КБО характеризуется выходными и входными параметрами. По набору данных параметров будет проводиться анализ поиска повторов функций. Зафиксируем за каждой функцией $F\{f_1, \dots, f_a\}$ набор множеств, ее характеризующих:

- $X_a\{x_1, \dots, x_i\}$ — множество входных параметров;
- $Y_a\{y_1, \dots, y_j\}$ — множество выходных параметров;
- $S_a\{s_1, \dots, s_k\}$ — множество специальных признаков.

Множество специальных признаков $S_a\{s_1, \dots, s_k\}$ включает в себя признаки, которые позволят в дальнейшем классифицировать функцию в составе ДФИ, а также данные о налагаемых на данную функцию ограничениях и требованиях по ее реализации.

Элементами множества $S_a\{s_1, \dots, s_k\}$ являются:

- s_1 — признак типа функции:
 - $s_1 = 1$ — функция верхнего уровня;
 - $s_1 = 2$ — функция промежуточного уровня;
 - $s_1 = 3$ — функция базового уровня;
 - $s_1 = 4$ — функция индикации и отображения информации;
 - $s_1 = 0$ — измерительная функция базового уровня;
- s_2 — признак реализации функции:
 - $s_2 = 1$ — допускается только непосредственная реализация функции;
 - $s_2 = 0$ — допускается косвенная реализация функции (например, замена измеренного значения параметра на значение, вычисленное математическим путем);
- s_3 — признак необходимости применения метода резервирования функции, при этом значение, присвоенное переменной s_3 , обозначает количество требуемых резервов функции (если $s_3 = 0$, то резервирование не требуется);

- s_4 — признак наличия привязки к серийному изделию:
 - $s_4 = 1$ — функция реализована на серийном изделии;
 - $s_4 = 0$ — функция не реализована на серийном изделии;
- s_5 — признак УГП функции:
 - $s_5 = 5$ — «катастрофический» (А);
 - $s_5 = 4$ — «аварийный» (В);
 - $s_5 = 3$ — «сложный» (С);
 - $s_5 = 2$ — «усложнение условий полёта» (D);
 - $s_5 = 1$ — «отсутствие влияния на безопасность» (Е);
- s_6 — признак того, что функция была изменена в процессе устранения повторов функций в структуре дерева функций:
 - $s_6 = 1$ — функция заменила собой ряд идентичных функций;
 - $s_6 = 2$ — функция была заменена идентичной функцией;
 - $s_6 = 0$ — данная функция в процессе устранения повторов функций изменений не претерпела.

Функции базового уровня не имеют множества входных параметров. Это связано с тем, что эти функции, как правило, являются измерительными. Если разработчик намеренно присваивает промежуточной функции статус базовой, тогда данное множество существует, однако в процессе проведения оптимизации ДФИ оно не используется.

Процесс поиска идентичных функций строится на основе сравнения характеризующих множеств $X_a\{x_1, \dots, x_i\}$ и $Y_a\{y_1, \dots, y_j\}$ с учетом данных множества $S_a\{s_1, \dots, s_k\}$.

Функции f_a и f_{a+1} считаются идентичными, если выполняются следующие условия:

$$X_a\{x_1, \dots, x_i\} = X_{a+1}\{x_1, \dots, x_i\}; \quad (1)$$

$$Y_a\{y_1, \dots, y_j\} = Y_{a+1}\{y_1, \dots, y_j\}. \quad (2)$$

Последовательным сравнением всех функций множества $F\{f_1, \dots, f_a\}$ находятся идентичные.

После того как обнаружены несколько одинаковых функций в структуре ДФИ, переходят к процессу устранения повторов функций. Заменяв ряд однообразных функций одной функцией, которая будет отвечать всем требованиям, предъявляемым к заменяемым

функциям, для этого нужно объединить множества специальных признаков всех идентичных функций [5]:

$$S_1 \{s_1, \dots, s_k\} \cup \dots \cup S_a \{s_1, \dots, s_k\}, \quad (3)$$

а также изменить значения переменных s_3, s_4, s_5, s_6 :

- значение параметра s_3 заменяющей функции будет равно максимальному значению, которое имеется среди параметров s_3 заменяемых функций;
- если заменяющая функция может быть реализована на серийном изделии, привязанном к заменяемой функции, тогда $s_4 = 1$, иначе $s_4 = 0$;
- значение параметра s_5 заменяющей функции будет равно максимальному значению, которое имеется среди параметров s_5 заменяемых функций;
- значение параметра s_6 заменяющей функции будет равно 1, а значения параметров s_6 заменяемых функций будет равно 2.

Функция не может быть заменена другой функцией, если требуется ее непосредственная реализация, о чем говорит признак $s_2 = 1$. Алгоритм процесса поиска и устранения повторов идентичных функций представлен на рисунке 2.

Замена ряда одинаковых функций одной заменяющей их функцией приводит к появлению перекрестных связей между ветвями ДФИ. Например, обработка ДФИ по предложенному алгоритму позволит устранить повтор функции «Измерение барометрической высоты полета» в ветвях ДФИ, представленных на рисунке 1, а, б. При этом функция «Измерение барометрической высоты полета» станет общей для двух ветвей ДФИ.

Заключение

Построение и оптимизация функциональной структуры КБО ЛА на основе построения ДФИ позволят разработчикам более эффективно и более гибко видоизменять аппаратную структуру оборудования

Список литературы

1. ВС ГА-Р4761. Руководство по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. — Введ. 2011-01-01. — М.: ОАО «Авиаиздат», 2011. — 265 с.
2. Тихоненков В.А., Мишин В.А. Конструирование и надежность измерительно-вычислительных комплексов летательных аппаратов: учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ульяновск: УлГТУ, 2002. — 202 с.
3. ВС ГА-Р4754. Руководство по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации. — Введ. 2011-01-01. — М.: ОАО «Авиаиздат», 2010. — 76 с.
4. Галушкин В.В., Катков Д.И., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Сквозная технология проектирования комплексов бортового оборудования перспективных воздушных судов // Известия Южного федерального университета. — 2012. — № 3. — С. 201-209.
5. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику: пер. с фр. / В.П. Мякишев, В.Е. Тараканов; ред. Б.А. Севастьянов. — М.: Наука, 1975. — 479 с.

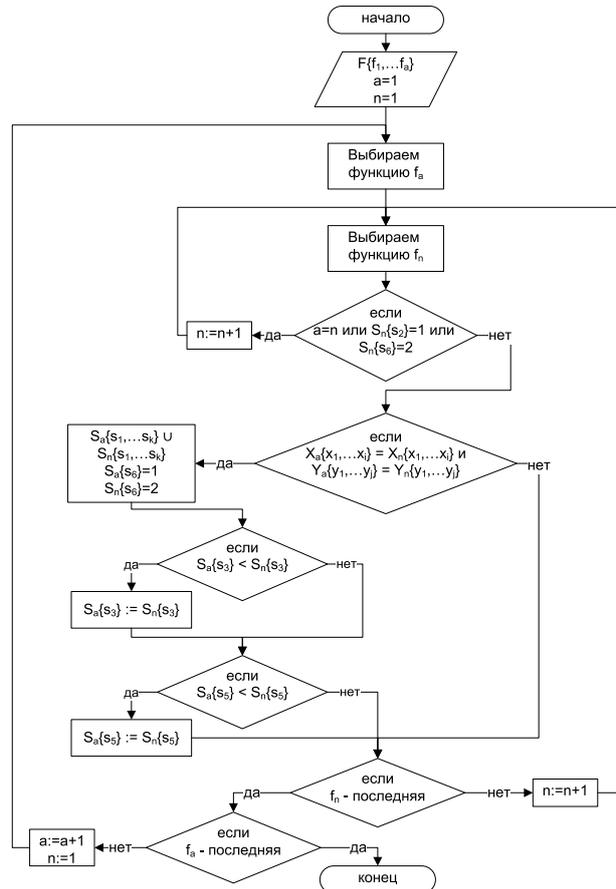


Рисунок 2. Алгоритм поиска и устранения повторов функций в составе ДФИ

КБО ЛА. Увеличение возможностей изменения и оптимизации всей структуры КБО даст разработчикам возможность наиболее эффективно достигать поставленных задач в процессе проектирования КБО на основе архитектуры ИМА.

References

1. VS GA-R4761. Rukovodstvo po metodam otsenki bezopasnosti sistem i bortovogo oborudovaniya vozdushnykh sudov grazhdanskoi aviatsii. — Vved. 2011-01-01. — M.: OAO «Aviaizdat», 2011. — 265 s.
2. Tikhonenkov V.A., Mishin V.A. Konstruirovaniye i nadezhnost' izmeritel'no-vychislitel'nykh kompleksov letatel'nykh apparatov: ucheb. posobie dlya vuzov. — 2-e izd., pererab. i dop. — Ul'yanyovsk: UIGTU, 2002. — 202 s.
3. VS GA-R4754. Rukovodstvo po protsessam sertifikatsii vysokointegrirovannykh slozhnykh bortovykh sistem vozdushnykh sudov grazhdanskoi aviatsii. — Vved. 2011-01-01. — M.: OAO «Aviaizdat», 2010. — 76 s.
4. Galushkin V.V., Katkov D.I., Kos'yanchuk V.V., Sel'vesyuk N.I. Skvoznaya tekhnologiya proektirovaniya kompleksov bortovogo oborudovaniya perspektivnykh vozdushnykh sudov // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. — 2012. — № 3. — S. 201-209.
5. Kofman A. Vvedeniye v prikladnuyu kombinatoriku: per. s fr. / V.P. Myakishev, V.E. Tarakanov; red. B.A. Sevast'yanov. — M.: Nauka, 1975. — 479 s.



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 технических систем», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация



Абдрахманов В. Х.
Abdrakhmanov V. Kh.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация



Салихов П. 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 338.465.4

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЖИЛЫХ ЗОН НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Сегодня создается рынок решений в области Machine to Machine и Интернета вещей, основанных на беспроводных технологиях. Одним из первопроходцев этого рынка стала разработка и создание проекта «Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления».

В целях повышения энергосбережения часто необходимо поддерживать требуемый температурный или климатический режим в помещении. Также бывает необходимо дистанционно отслеживать параметры или управлять устройством дистанционно, например, менять температурный режим, программу функционирования по дням недели. Представляемые в статье идеи по разработке «Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления» являются примером реализации Интернета Вещей (Internet of Things) в Умном городе (Smart City).

Решение проблем энергоресурсосбережения возможно путем повсеместного внедрения современных автоматизированных систем мониторинга и управления (АСМУ) теплотреблением зданий. Существующие пилотные решения АСМУ отоплением и распределенными информационно-управляющими системами приборного учета выполняются с помощью коммутируемых линий связи, беспроводных GSM-сетей, глобальных каналов Internet и решают частные вопросы мониторинга состояния и удаленного управления оборудованием тепловых пунктов. Для простых и бюджетных решений удаленного мониторинга хорошо подходит глобальная сеть Internet ввиду ее широкой распространенности в России (подведена практически к каждому жилому дому, предприятию и учебному заведению) и относительной простоты реализации. В реализации различных функций интеллектуальных систем жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления используются акустооптические датчики.

Проект «Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления» — это новая концепция на многосложную систему управления и контроля жилых зон. Пользователь системы будет получать информацию с единого центра, находящегося у него дома или в офисе, при помощи сотового телефона, телевизора, голосового управления, а также удаленно при помощи сайта системы.

На российском рынке нет прямых конкурентов, так как предлагаемые аналоги либо дорогостоящие, либо имеют ограниченный функционал.

Новизна разработки заключается в предлагаемых новых помехоустойчивых методах определения местоположения объекта с использованием избыточного числа точек (в том числе и перемещаемых), относительно которых измеряется расстояние. Предложены оригинальные помехозащищенные алгоритмы получения информации от объекта и проведены предварительные эксперименты с парами приемопередатчиков, разработаны и изготовлены макетные платы для датчиков.

В статье проведен анализ основных тенденций развития интеллектуальных систем жилых зон. В результате сделан вывод о целесообразности использования для связи с устройствами ZigBee-технологии. Предложено в основе построения сети использовать так называемую ZigBee-технологию. Технология передачи данных ZigBee применяется в промышленности для создания сетей передачи измерительной информации. Отличительной особенностью сетей ZigBee является легкость их наращивания путем установки допол-

нительных приемопередающих модулей. Сами модули могут иметь различные варианты исполнения и в зависимости от задачи отличаться повышенной экономичностью или повышенной излучаемой мощностью, компактностью исполнения.

Ключевые слова: интеллектуальная система, энергосбережение, управление климатом, погодные регуляторы, датчики, автоматизация, мониторинг режимов, ZigBee-технология, XBeePRO и XBeeZNet 2.5 модули, MESH-топология.

INTELLIGENT SYSTEM OF LIVING AREAS ON THE BASIS OF INFORMATION-MEASURING CONTROL SYSTEMS

Today, the market of solutions is created in the area of Machine to Machine and Internet of Things, which basis of wireless technologies. One of the pioneers of this market is «Intelligent system of living areas on the basis of information-measuring control systems».

In order to improve energy conservation is often necessary to maintain the required temperature and climatic conditions in the room. Also, it is necessary, to remotely control the parameters — for example, to change the temperature. Presented in the article ideas on the development of «Intelligent system of living areas on the basis of information-measuring control systems» are an example of the implementation of the Internet of Things in Smart City.

Solving problems of energy saving is possible by the widespread introduction of modern automated monitoring and control systems of heat consumption of buildings. Such existing pilot systems of heating management and distributed information and control metering systems are made via dial-up lines, the wireless of GSM-networks, the global Internet channels 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, 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.

«The Intelligent system of living areas on the basis of information-measuring control systems» is a new concept in the polysyllabic living areas of management and control system. Users of the system will receive the information from a single center, located at his home or in the office, using cell phone, TV, voice control, as well as remotely via the site system.

There are no direct competitors on the Russian market, as proposed analogues either costly or have limited functionality.

The novelty lies in the development of the proposed new error-correcting methods for determining the location of an object using an excess number of points. The original algorithms radio interference of obtaining information from the object (including the calculation of the exact location of an object using a trained neural network) are proposed, and preliminary experiments with pairs of transceivers are conducted, it is designed and manufactured prototyping boards for sensors.

The article analyzes of the main trends in the development of intelligent systems of living areas are done. As a result, the conclusion was done about practicability of using to communicate with ZigBee-technology devices. It is proposed basis of building a network to use the so-called ZigBee-technology. ZigBee data transmission technology used in the industry to create a signal transmission networks. A distinctive feature of the ZigBee network is the ease of their capacity by installing additional transceiver modules. The modules themselves may have different versions and, depending on the different tasks of increased efficiency and higher power, compact design.

Key words: intelligent system, energy-saving, climate control, weather controls, sensors, automation, monitoring modes, ZigBee-technology, XBeePRO and XBeeZNet 2.5 modules, MESH-topology.

Сегодня многие строения хозяйственного или жилого назначения состоят из ключевых подсистем, отвечающих за выполнение определенных функций, которые решают различные проблемы в процессе работы этого строения. По мере увеличения этих подсистем и количества выполняемых ими функциональных задач управление и обработка подсистем становятся все более сложными. Также стремительно увеличиваются расходы на содержание обслуживающего персонала, ремонт и технического обслуживание этих подсистем. Впервые эти проблемы встали при эксплуатации больших административных и производственных зданий и комплексов.

Современное строение — это мегаполис в миниатюрной модели. Можно сказать, что в этом строении действуют все отделы, являвшиеся ранее неизменными атрибутами мегаполиса. В таких строениях обычно существует административная служба или

администратор, которые осуществляют обслуживание практически круглосуточно. Конечно, в настоящее время существует большое количество автоматки, которая сама выполняет возложенные на нее функции: отопительные системы, вентиляция, поддержание микроклимата, системы освещения, пожарная и охранная сигнализация, контроль входа/выхода и т.п., но управление и обслуживание всех этих систем автоматки требует наличия специализированного персонала, обязанностью которого являются контролирование работы этих устройств и устранение неполадок в случае выхода их из строя.

Сегодня создается рынок решений в области Machine to Machine и Интернета вещей, основанных на беспроводных технологиях. Одной из первых на этом рынке стала разработка проекта «Интеллектуальная система жилых зон» [1].

Решение проблем энергоресурсосбережения возможно путем повсеместного внедрения современных автоматизированных систем мониторинга и управления (АСМУ) теплопотреблением зданий [2]. Существующие пилотные решения АСМУ отоплением и распределенными информационно-управляющими системами 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 реализации различных функций интеллектуальных систем жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления используются акустооптические датчики [8, 9, 10].

Предложено в основе построения сети при разработке проекта «Интеллектуальная система жилых зон» использовать ZigBee-технология. Технология передачи данных ZigBee применяется в промышленности для создания сетей передачи измерительной информации. Отличительной особенностью сетей ZigBee является легкость их наращивания путем установки дополнительных приемопередающих модулей. Сами модули могут иметь различные варианты исполнения и в зависимости от задачи отличаться повышенной экономичностью или повышенной излучаемой мощностью, компактностью исполнения. Датчик вместе с модулем и элементом питания может иметь вес в несколько граммов и размещаться в труднодоступных местах, в том числе в таких, куда подвод информационных кабелей невозможен или сопряжен со значительными трудностями. Примеры: датчики температуры, датчики движения, датчики влажности, газоанализаторы, размещаемые в труднодоступных местах пожароопасных помещений и т.д.

Радиус действия типичных сетей ZigBee составляет 1–10 км. Наличие в указанных модулях вывода специального сигнала RSS, пропорционального принимаемой мощности радиосигнала от других модулей, делает возможным кроме получения информации о различных параметрах объекта вычислять еще и его текущие координаты в пределах локальной области.

Новизна разработки заключается в предлагаемых новых помехоустойчивых методах определения местоположения объекта с использованием избыточного числа точек (в том числе и перемещаемых), относительно которых измеряется расстояние. Предложены оригинальные помехозащищенные алгоритмы получения информации от объекта (включая вычисление точного местоположения объекта с помощью обучаемой нейросети), проведены предварительные эксперименты с парами приемопередатчиков, разработаны и изготовлены макетные платы для датчиков.

Если проектировщику необходимо организовать связь «точка-точка» или «звезда», то ZigBee-модули

используются как самостоятельные приборы. При проектировании полноценной сети ZigBee («MESH») требуется микроконтроллер, в который должен быть загружен набор управляющих программ, так называемый стек протоколов ZigBee. Модуль с таким контроллером называют координатором. Он обычно сопряжен с диспетчерским компьютером. Кроме координатора в сети присутствуют еще модули с функциями определения оптимального маршрута передачи (Routers) и простые модули конечных устройств (End Devices) — датчиков, исполнительных устройств, выключателей (рисунок 1).

Нами проводились эксперименты с ZigBee-модулями компании DIGI: XBeePRO и XBeeZNet 2.5. Модули XBeeZNet 2.5 (рисунок 2) являются законченными узлами, способными самостоятельно подключаться к сети с MESH-топологией и передавать данные, поступающие от внешнего хост-процессора.

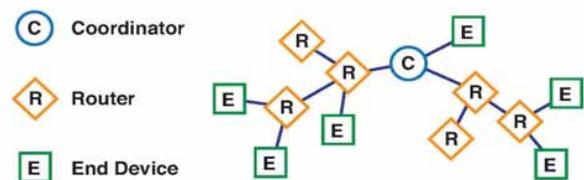


Рисунок 1. Структура ZigBee-сети с MESH-топологией



Рисунок 2. Внешний вид XBee-модулей

Благодаря встроенному ZigBee-стеку все операции по формированию сети, присоединению новых устройств, прокладке оптимальных маршрутов сообщений осуществляются автоматически, без участия внешнего микроконтроллера. Для передачи данных существует ограниченный набор простых управляющих команд, которые могут выполняться даже на самом недорогом 8-разрядном внешнем микроконтроллере. XBeeZNet 2.5 модули имеют возможность выступать и как абсолютно самостоятельные узлы. В этом случае за прием/передачу информации отвечают имеющиеся на модуле периферийные узлы: порты ввода-вывода, АЦП и ЦАП. Если будут применяться ZigBee-модули без внешнего микроконтроллера, то прием или передача данных будет происходить под управлением команд, поступающих по эфиру от координатора или любого другого узла сети.

В процессе испытаний модулей была разработана и успешно испытана простейшая беспроводная система для удаленного измерения температуры с помощью ZigBee-модуля. Схема измерительного модуля представлена на рисунке 3.

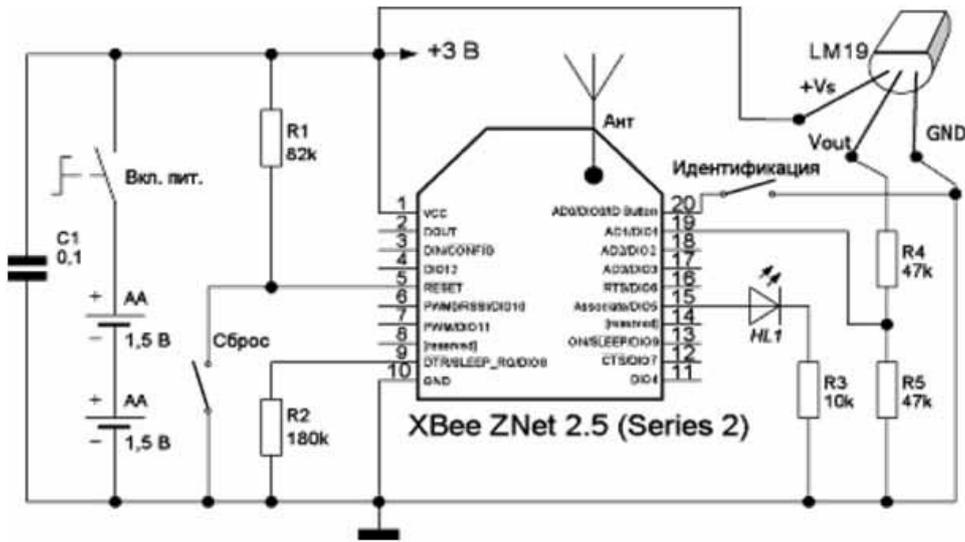


Рисунок 3. Принципиальная схема температурного датчика

Измерение температуры производится с помощью аналогового датчика LM19, преобразующего температуру в диапазоне от минус 55 °С до 130 °С в выходное напряжение, измеряемое с помощью АЦП модуля XBeeZNet 2.5. В связи с тем что диапазон выходного напряжения LM19 (0,303...2,485 В) превышает максимальное измеряемое напряжение АЦП модуля (1,2 В), в схеме применен делитель напряжения на резисторах, понижающий выходное напряжение LM19 в 2 раза. Ток потребления LM19 составляет менее 10 мкА, поэтому датчик позволяет существенно экономить энергию батарей при работе ZigBee-модуля в спящем режиме.

Измерительный модуль (рисунок 4) работает от двух батарей типа «АА». Светодиод «HL1» отображает режим работы модуля: если он светится постоянно, модуль не присоединился к ZigBee-сети; если мигает 2 раза в секунду, произошло присоединение модуля к ZigBee-сети; если редкие короткие вспышки, то модуль находится в спящем режиме и периодически просыпается для запроса данных от родительского узла. В этом простом проекте применение встроенного АЦП и возможность удаленной отсылки

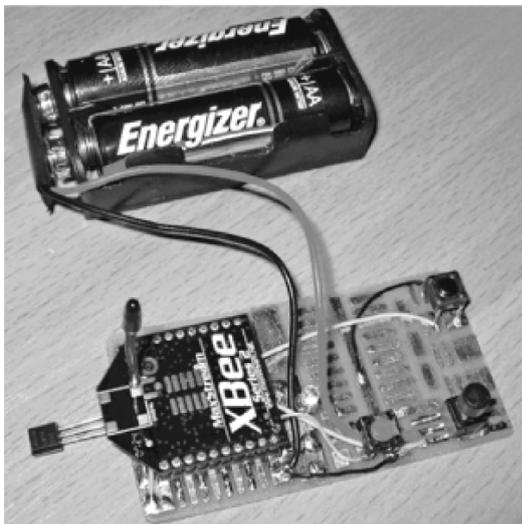


Рисунок 4. Температурный датчик на базе модуля XBee

команд позволили отказаться от применения внешнего микроконтроллера.

Данный микрокомпьютер будет обрабатывать данные со всех систем, также все управление будет вестись через него, что позволит объединить все системы в одной коробке.

Основные функции системы:

- автоматический контроль над передвижениями внутри строений и на прилегающих территориях;
- определение и контроль температуры внутри и снаружи помещений;
- оповещение голосом, а также звуковыми сигналами;
- контроль над целостностью водопровода;
- возможность удаленной передачи данных;
- управление через Internet;
- самотестирование системы;
- возможность оперативного просмотра протокола работы системы;
- автоматическое выключение света после ухода жильцов. После ухода всех жильцов система после 10 мин переходит в режим энергосбережения и отключает освещение во всем доме. Система будет отслеживать жильцов по наличию в зоне видимости мобильного телефона;
- автоматическое включение света в прихожей в момент прихода жильцов. Система будет вас встречать, включая свет, а также приятную музыку. Принцип работы системы основан на предыдущем примере;
- автоматическое вкл./выкл. света в ванной комнате. Данная система позволит управлять светом в ванной комнате без применения механических выключателей. Вся система будет управляться с помощью ультразвуковых и инфракрасных датчиков;
- система снайпер. Включение света с помощью хлопка или щелчка;
- система «Рассвет» в спальнях. Данная функция будет увеличивать яркость света в комнате, имитируя рассвет. Система начинает работать за 30 мин до звонка будильника;

- ночная подсветка. Система подсвечивает путь ночью, когда вы идете в ванную комнату;
- экономичный режим системы отопления. В данном режиме система отопления будет поддерживать температуру не ниже 10 °С, что предотвратит замерзание системы отопления;
- система приведения во время отпуска. Данная система будет включать свет в доме на 2 ч. Система будет имитировать жильцов в доме;
- система ЖКХ. Будет снимать показатели со счетчиков (газа, воды и электроэнергии) и предавать ЕРКЦ;
- зеркало со сводкой основных новостей. Зеркало будет выводить информацию о последних событиях, погоду и новости. Зеркало с выходом в сеть, также оно будет синхронизироваться с Интеллектуальной системой жилых зон;
- возможность полного контроля жилых зон как внутри объекта, так и снаружи;
- контроль над водопроводной сетью (целостность, контроль замерзания протекающей жидкости);
- охранно-пожарная функция и др.

Достоинства Интеллектуальной системы жилых зон:

- простота установки и обслуживания (не требует профессиональных знаний);
- многофункциональность (все функции совмещены в общем модуле);
- возможность увеличения функциональных возможностей;
- автоматический контроль и сохранение информации;

Список литературы

1. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // IEEE Internet of Things J. — Feb., 2014. — Vol. 1. — № 1. — P. 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]. — URL: <http://www.t2system.ru>.
4. Автоматизация и диспетчеризация систем теплоснабжения зданий [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.halax.ru/avtomatizacijadispetcherizacijasistem.html>.
5. Система мониторинга «HeatCAM» [Электронный ресурс] — URL: <http://heating.sumdu.edu.ua>.
6. Загирняк М.В., Перекрест А.Л. Опыт внедрения и использования автоматизированной системы мониторинга температурных режимов и удаленного управления теплоснабжением Кременчугского национального университета // Электротехнические и компьютерные системы. — 2014. — № 15 (91). — С. 423-426.

- наблюдение за работой и управление Интеллектуальной системой жилых зон из любой точки мира, где имеется доступ к сети Internet;
- своевременный сервис и консультация из любой точки мира по телефону;
- контроль и диагностика системы на базе Android, Windows;
- невысокая цена.

Кроме того, несомненным достоинством является блочная система «Интеллектуальная система жилых зон». Проект «Интеллектуальная система жилых зон» предполагает производить контроль, диагностику и управление любым техническим устройством «умного дома» на расстоянии.

Выводы

Данная система объединила в себе существующие решения и востребованные наборы функций из Интернет вещей, а также вобрала новые интересные технические решения.

Проект «Интеллектуальная система жилых зон» — это совокупность программного обеспечения и набора модулей, необходимых для реализации данного технического устройства.

Интеллектуальная система жилых зон может быть реализована как в максимальной комплектации, так и в виде отдельных модулей.

Управление и контроль над системой возможно производить с любого устройства и в любом месте, где имеется доступ к сети Интернет.

7. Шестака А.И., Мельникова Л.В., Бушер В.В. Современные методы автоматизации зданий // Электротехнические и компьютерные системы. — 2013. — № 11 (87). — С. 82-89.
8. Ураксеев М.А., Важаев К.В. Акустооптические преобразователи: теоретические предпосылки и новые разработки // Датчики и системы. — 2000. — № 1. — С. 35-37.
9. Ураксеев М.А. Акустооптические датчики физических величин. Уфа: Уфимск. гос. акад. эконом. и сервиса, 2008. — 111 с.
10. Важаев К.В. Акустооптические устройства и их применение в приборах и информационно-измерительных системах // Нефтегазовое дело. — 2012. — Т. 10. — № 1. — С. 148-151.

References

1. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // IEEE Internet of Things J. — Feb., 2014. — Vol. 1. — № 1. — P. 22-32.
2. Anisimov A.L., Astapkovich A.M., Kasatkin A.A. Sistemnye problemy sozdaniya raspredelennykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem pribornogo ucheta. — Rezhim dostupa: http://guap.ru/guap/skb/docs/article_v3.doc. (Data obrashcheniya: 12.06.2014).

3. Dispetcherizatsiya priborov ucheta cherez internet [Elektronnyi resurs]. — URL: <http://www.t2system.ru>.

4. Avtomatizatsiya i dispetcherizatsiya sistem teplosnabzheniya zdaniy [Elektronnyi resurs]. — URL: <http://www.halax.ru/avtomatizaciya-dispetcherizacijasis-tem.html>.

5. Sistema monitoringa «HeatCAM» [Elektronnyi resurs]. — URL: <http://heating.sumdu.edu.ua>.

6. Zagirnyak M.V., Perekrest A.L. Opyt vnedreniya i ispol'zovaniya avtomatizirovannoi sistemy monitoringa temperaturnykh rezhimov i udalennogo upravleniya teplopotrebieniem Kremenchugskogo natsional'nogo universiteta // Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy. — 2014. — № 15 (91). — S. 423-426.

7. Shestaka A.I., Mel'nikova L.V., Busher V.V. Sovremennye metody avtomatizatsii zdaniy//Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy. — 2013. — № 11 (87). — S. 82-89.

8. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V. Akustoopticheskie preobrazovateli: teoreticheskie predposylki i novye razrabotki // Datchiki i sistemy. — 2000. — № 1. — S. 35-37.

9. Urakseev M.A. Akustoopticheskie datchiki fizicheskikh velichin. Ufa: Ufimsk. gos. akad. ekonom. i servisa, 2008. — 111 s.

10. Vazhdaev K.V. Akustoopticheskie ustroystva i ikh primenenie v priborakh i informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh // Neftegazovoe delo. — 2012. — T. 10. — №1. — S. 148-151.



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

КАЛИБРОВКА АКУСТООПТИЧЕСКОГО МОНОХРОМАТОРА С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В статье представлена разработанная методология калибровки акустооптического монохроматора с электронным управлением. Описаны структурная схема оптического блока, его составные части, монохроматор с электронным управлением, состоящий из акустооптического перестраиваемого фильтра, драйвера, соединительных кабелей и программного обеспечения, основные технические характеристики акустооптического монохроматора.

Предложен способ калибровки акустооптического монохроматора, предполагающий использование эталонного источника излучения с известными характеристиками и приемника оптического излучения с целью установления соответствия заданной длины волны пропускания монохроматором длине волны излучателя.

Представлена структурная схема и фотография разработанной системы для калибровки акустооптического монохроматора с электронным управлением. Описаны устройства, применяемые в данной системе калибровки, и приведены их технические характеристики.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены калибровочные характеристики спектрального разрешения для коллимированного пучка, значения управляющей частоты для реперных лазерных длин волн, дифракционная эффективность.

Разработанная методика калибровки акустооптического монохроматора с электронным управлением позволяет уменьшить суммарную погрешность за счет минимизации ее систематической составляющей, а также дает возможность уменьшить время и трудоемкость процедуры калибровки.

Ключевые слова: измерение температуры, акустооптический преобразователь температуры, акустооптический перестраиваемый фильтр, оптический блок.

CALIBRATION OF THE ACOUSTO-OPTIC MONOCHROMATOR WITH ELECTRONIC CONTROL

The article describes the developed methodology for calibration of acousto-optic monochromator with electronic control. A block diagram of the optical block is described by its component parts. The developed monochromator with an electronic control consisting of acousto-optic tunable filter driver, connection cables and software. Presents the main technical characteristics of acousto-optical monochromator.

The proposed method for calibration of acousto-optic monochromator, utilizing a reference radiation source with known characteristics and a receiver of optical radiation with the purpose of establishing compliance with the set wavelength bandwidth of the monochromator the wavelength of the emitter.

A block diagram and photograph of the developed system for calibration of acousto-optic monochromator with electronic control. Describes the devices used in this calibration system, and given their specifications.

In result of experimental research obtained in calibration spectral resolution for a collimated beam, the value of the control frequency to the reference laser wavelength, diffraction efficiency.

The developed method of calibration of acousto-optic monochromator with electronic control, allows to reduce the total error by minimizing its systematic component, and also enables to reduce the time and complexity of the calibration.

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

В настоящее время среди различных методов построения устройств и систем различного назначения все большее распространение получает модульный принцип. Модульный принцип построения устройств и систем предполагает, что состав указанных средств состоит из блоков (модулей), обеспечивающих возможность их замены или изменения с целью совершенствования функционирования или адаптации к новым условиям. Под модулем понимают составную часть, имеющую законченные функциональное назначение и конструкцию и снабженную элементами соединения и коммутации с другими модулями в изделии. Применение модульного принципа построения позволяет повысить уровень унификации, сократить трудоемкость проектирования и изготовления машины. Оптический блок акустооптического пирометра построен по модульному принципу, при этом связь между составными частями устройства осуществляется посредством волоконно-оптического кабеля.

Для любого измерительного прибора важнейшей характеристикой является точность результатов осуществляемых им измерений. В этой связи важной представляется процедура калибровки прибора, которая на методическом уровне определяет точность его работы. Реализация модульного принципа позволяет обеспечить проведение калибровки отдельных модулей устройства, в частности, оптико-электронного модуля оптического блока акустооптического пирометра с целью повышения точности измерения, чему и посвящена данная работа.

На рисунке 1 представлена структурная схема акустооптического пирометра, которая состоит из оптического блока 1, содержащего последовательно соединенные стеклянное окно, прозрачное в инфракрасном диапазоне 2, линзу 3, фокусирующую световой поток на входной торец волоконного световода 4, выходной торец которого соединен с акустооптическим монохроматором 5, выход которого соединен с входом измерительного блока 6, а выход управления измерительного блока связан с управляющим входом монохроматора.

Основным элементом акустооптического пирометра, определяющим качественные характеристики, является акустооптический монохроматор с электронным управлением (МЭУ) (рисунок 2). Основными конструктивными элементами монохроматора с электронным управлением являются: входной оптический разъем монохроматора 1, акустооптический перестраиваемый фильтр с входным и выходным поляризатором 2, выходной оптический разъем монохроматора 3, драйвер акустического сигнала 4, блок питания 5, соединительные кабели 6 (рисунок 2). Технические характеристики МЭУ представлены в таблице 1 [1–11].

МЭУ состоит из металлического корпуса, в котором размещен фильтрующий элемент АОПФ (2), а также входной (1) и выходной поляризаторы (3) (рисунок 3).

Способ калибровки акустооптического монохроматора предполагает использование эталонного источника излучения с известными характеристиками и приемника оптического излучения с целью установ-

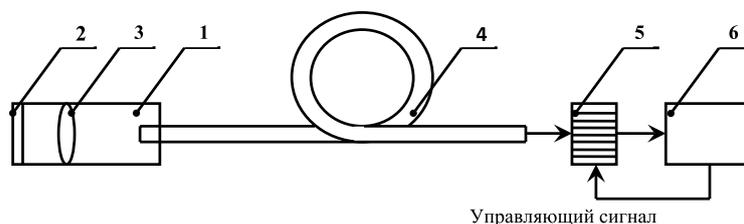


Рисунок 1. Структурная схема оптического преобразователя температуры

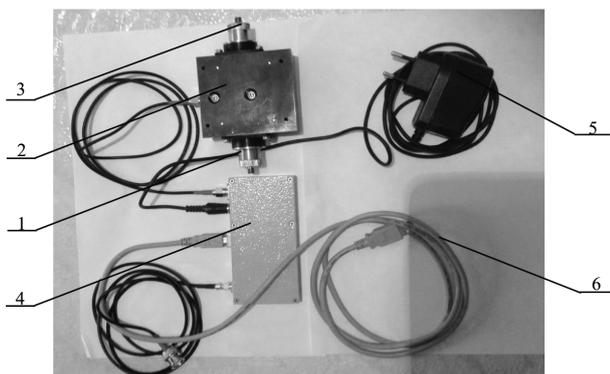


Рисунок 2. Монохроматор с электронным управлением

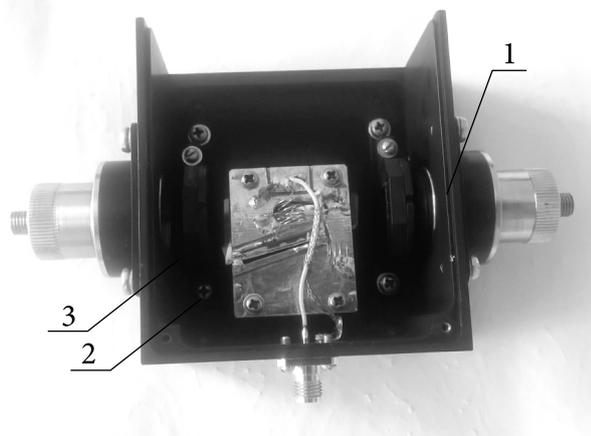


Рисунок 3. Акустооптический перестраиваемый фильтр с входным и выходным поляризаторами

ления соответствия заданной длины волны пропускания монохроматором длине волны излучателя.

Калибровку монохроматора можно разделить на несколько этапов:

- калибровка источника, приемника и волоконно-оптических кабелей;
- регистрация излучения на трех длинах волн;
- определение величины отклика приемника, вызванного падающим на него излучением;
- определение соответствия заданной длины волны пропускания монохроматором длине волны излучателя;
- определение коэффициента пропускания монохроматора.

В качестве источника излучения использовались лазерные диоды на длинах волн: 850, 1300, 1310, 1550 нм.

Таблица 1. Технические характеристики монохроматора с электронным управлением

Материал акустооптического фильтра (АОФ)	TeO ₂
Спектральный диапазон, нм	850–1900
Диапазон управляющих частот, МГц	78–45
Световое окно АОФ, диаметр, мм	6,0
Входная угловая апертура АОФ, град	5,1
Максимально допустимая средняя по времени мощность управляющего сигнала, Вт	2,5
Входное волновое сопротивление, Ом	50



Рисунок 4. Структурная схема калибровочной системы

Для регистрации излучения лазера было использовано фотоприемное устройство.

Структурная схема калибровочной системы представлена на рисунке 4, фотография системы — на рисунке 5.

На рисунке 5 представлены: 1 — ПК; 2 — источник излучения; 3 — драйвер; 4 — акустооптический монохроматор; 5 — приемник излучения.

В качестве источника лазерного излучения используется Grandway FHS2Q01F, предназначенный для работы на следующих длинах волн: 850, 1300, 1310, 1550 нм. Основные характеристики прибора: ширина спектра — 3 нм; частота модуляции — 270, 1000, 2000 Гц; выходная мощность — -5 дБм (± 0,5 дБ).

В качестве приемника излучения используется измеритель оптической мощности SNR-PMT-08C, предназначенный для регистрации излучения и определения параметров. Основные характеристики прибора: рабочий диапазон длин волн — 800–1600 нм; тип детектора — InGaAs; диапазон измеряемой мощности — -50~+23 дБм; погрешность — ±0,15 дБ; калиброванные длины волн — 850, 1300, 1310, 1550 нм.

Калибровка проходит следующим образом. Источник Grandway FHS2Q01F испускает излучение на следующих длинах волн: 850, 1300, 1310, 1550 нм.

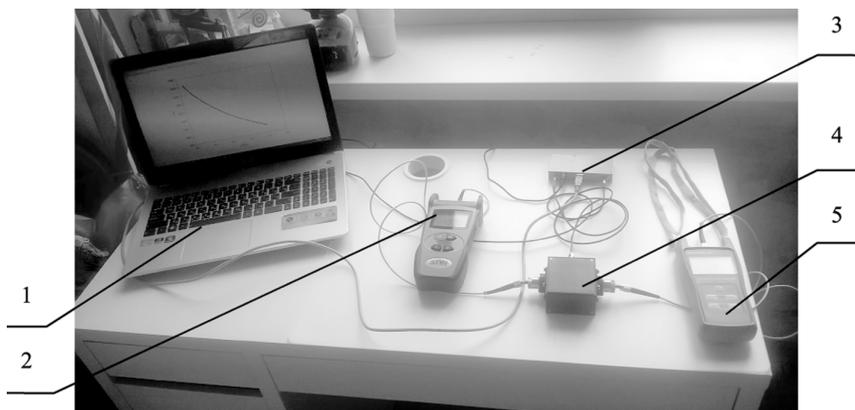


Рисунок 5. Фотография калибровочной системы

Таблица 2. Экспериментальные данные калибровки

№ п/п	Технические характеристики акустооптического монохроматора	Калибровочные данные
1.	Спектральное разрешение для коллимированного пучка: — на длине волны 632,8 нм — на длине волны 1152,3 нм — на длине волны 1542 нм	1,9 нм 2,6 нм 4,9 нм
2.	Значение управляющей частоты для реперных лазерных длин волн: — на длине волны 632,8 нм — на длине волны 1152,3 нм — на длине волны 1542 нм	150,65 МГц 76,69 МГц 56,33 МГц
3.	Дифракционная эффективность: — на длине волны 632,8 нм, при мощности управляющего сигнала — на длине волны 1152,3 нм, при мощности управляющего сигнала — на длине волны 1542 нм, при мощности управляющего сигнала	0,43 Вт — 70 % 0,48 Вт — 70 % 0,51 Вт — 70 %

При помощи ПК подается управляющий сигнал на драйвер, генерирующий управляющие частоты для указанных длин волн. Поступающее по волоконному световоду излучение проходит через акустооптический монохроматор и далее по волоконному световоду попадает на приемник SNR-PMT-08C.

Результаты экспериментальных данных представлены в таблице 2.

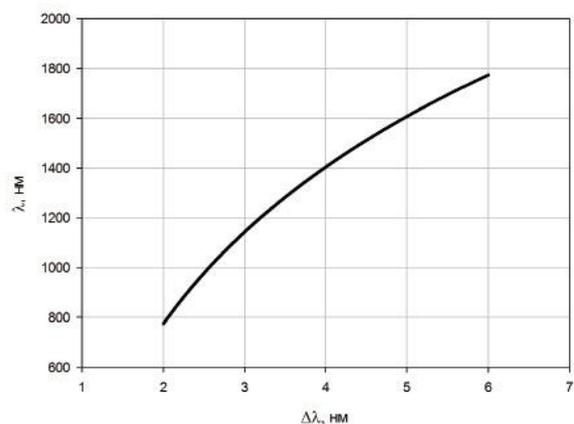
По полученным экспериментальным данным были построены калибровочные характеристики, представленные на рисунке 6.

Выводы

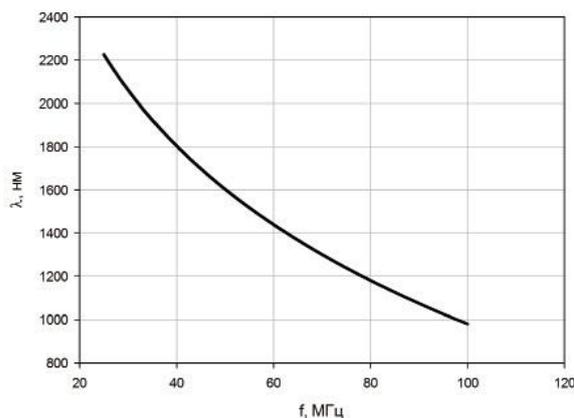
В статье представлена разработанная методика калибровки акустооптического монохроматора с электронным управлением, позволяющая уменьшить суммарную погрешность за счет минимизации ее систематической составляющей, а также время и трудоемкость процедуры калибровки.

Список литературы

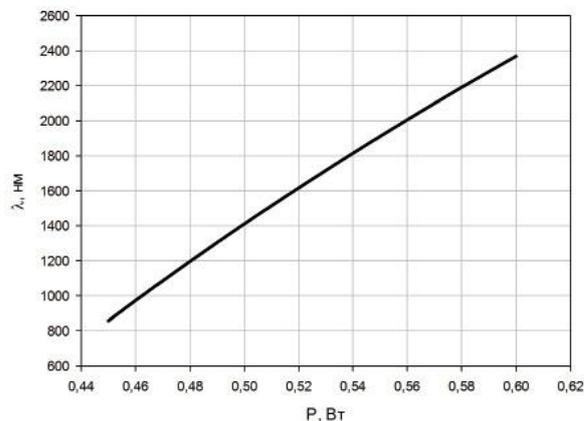
1. Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. Принципы построения оптических преобразователей температуры // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. — 2009. — № 2 (6). — С. 21-26.
2. Фаррахов Р.Г., Ураксеев М.А., Мухамадиев А.А. Оптико-электронные преобразователи температуры для систем контроля технологическими процессами. — 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. — Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2009. — 119 с.



а) Спектральное разрешение для коллимированного пучка



б) Значение управляющей частоты для реперных лазерных длин волн



в) Дифракционная эффективность

Рисунок 6. Калибровочные характеристики

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, МПК⁸ G 01 J 15/10. Оптический преобразователь температуры / Р.Г. Фаррахов, А.А. Мухамадиев. 2009122755/28; заявл. 15.06.2009; опубл. 20.09.10.

References

1. Farrakhov R.G., Mukhamadiev A.A. Printsipy postroeniya opticheskikh preobrazovatelei temperatury // Prikaspiiskii zhurnal: Upravlenie i vysokie tekhnologii. — 2009. — № 2 (6). — S. 21-26.

2. Farrakhov R.G., Urakseev M.A., Mukhamadiev A.A. Optiko-elektronnye preobrazovateli temperatury dlya sistem kontrolya tekhnologicheskimi protsessami. — Ufa: Ufimskaya gosudarstvennaya akademiya ekonomiki i servisa, 2010. — 105 s.

3. Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G., Urakseev M.A. Akustoopticheskie pribory informatsionno-izmeritel'nykh sistem ekologicheskogo monitoringa. — Ufa: Ufimskaya gosudarstvennaya akademiya ekonomiki i servisa, 2009. — 119 s.

4. Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G. Matematicheskaya model' akustoopticheskogo pirometra // Datchiki i sistemy. — 2012. — № 2. — S. 28-30.

5. Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G. Statischeeskaya kharakteristika, chuvstvitel'nost' i razreshayushchaya sposobnost' akustoopticheskogo pirometra // Datchiki i sistemy. — 2011. — № 11. — S. 41-43.

6. Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G. Akustoopticheskii preobrazovatel' temperatury // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. — 2011. — № 1. — S. 26-28.

7. Farrakhov R.G., Mukhamadiev A.A. Universal'nyi piometr dlya izmereniya vysokikh temperatur // Datchiki i sistemy. — 2010. — № 11. — S. 23-25.

8. Farrakhov R.G. Matematicheskaya model' opticheskogo preobrazovatelya temperatury s volokonnym svetovodom // Pribory. — 2010. — № 4. — S. 11-14.

9. Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A., Farrakhov R.G., Il'yasov I.R. Osnovnye etapy stanovleniya i razvitiya akustooptiki v XX veke // Istoriya nauki i tekhniki. — 2010. — № 3 (spets. vypusk № 1). — S. 34-37.

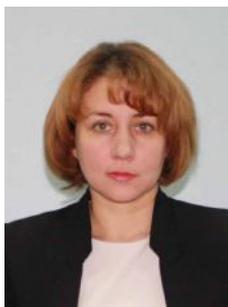
10. Farrakhov R.G., Mukhamadiev A.A. Opticheskii preobrazovatel' temperatury dlya sistem kontrolya i upravleniya // Datchiki i sistemy. — 2010. — № 10. — S. 39-41.

11. Пат. 2399892 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁸ G 01 J 15/10. Opticheskii preobrazovatel' temperatury / R.G. Farrakhov, A.A. Mukhamadiev. 2009122755/28; заявл. 15.06.2009; опубл. 20.09.10.



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*



Левина Т. М.
Levina T. M.

*кандидат технических наук,
заведующий кафедрой «Общенаучные
дисциплины», филиал ФГБОУ
ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»
в г. Салавате,
г. Салават, Российская Федерация*



Бажанова Т. В.
Bazhanova T. V.

*студент, филиал ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный
нефтяной технический университет»
в г. Салавате,
г. Салават, Российская Федерация*

УДК 321.3.08

АЛГОРИТМ РАБОТЫ ЦИФРОВОГО УСТРОЙСТВА ИНТЕГРИРОВАНИЯ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Предложено использование магнитооптического эффекта Фарадея в современном измерительном комплексе контроля электрического тока и магнитного поля с цифровым интегрирующим устройством. Обоснована необходимость создания измерительных комплексов с улучшенными характеристиками (точность, надежность, чувствительность, малые габариты) для автоматизации производственных процессов на нефтегазовых предприятиях. Рассматриваемый измерительный комплекс направлен также на решение проблемы получения актуальной и сиюминутной информации on-line при диагностике остаточного ресурса оборудования на нефтегазовых предприятиях. Описана структурная схема чувствительного элемента измерительного комплекса контроля электрического тока и магнитного поля, содержащая проводник электрического тока, создающий магнитное поле, лазерный диод, поляризатор, чувствительный элемент, анализатор, измерительный блок.

В статье описан принцип действия измерительного комплекса контроля электрического тока и магнитного поля, который направлен на решение вопросов повышения точности, надежности, чувствительности, обеспечения малых габаритов. Приведены структурная схема и алгоритм цифрового устройства интегрирования, которые можно использовать при автоматизации контроля и диагностики остаточного ресурса оборудования и производственных процессов на нефтегазовых предприятиях. Рассмотрен программно разработанный прототип, содержащий входной преобразователь типа «напряжение-код» и вычислитель-микропроцессор со всеми типовыми вспомогательными большими интегральными схемами. В программно разработанном прототипе приведена укрупненная схема микропроцессорного интегрирующего устройства, в состав которого входят: таймер типа параллельный периферийный интерфейс типа KP580BB55, многорежимный буферный регистр типа K589IIP12, дешифраторы адреса, параллельный преобразователь «напряжение-код», схема выборки и хранения и ряд вспомогательных логических элементов. Приведены интерфейсы программно разработанного прототипа микропроцессорного интегрирующего устройства. Автоматизация процессов при диагностике остаточного ресурса оборудования на нефтегазовых предприятиях позволит получать сиюминутную, актуальную информацию.

Ключевые слова: измерительный комплекс, эффект Фарадея, электрический ток, магнитное поле, чувствительный элемент, алгоритм, цифровое устройство интегрирования, точность, надежность, интерфейс.

ALGORITHM OF THE DIGITAL INTEGRATING DEVICE IN THE MEASURING SYSTEM FOR CONTROL OF THE ELECTRIC CURRENT AND MAGNETIC FIELD

Proposed use of the magneto-optical Faraday effect in the modern measuring complex control of electric current and magnetic field with a digital integrator. The necessity of creation of measuring systems with improved performance (accuracy, reliability, sensitivity, small size) for the automation of production processes in the oil and gas companies. Also considered measuring system is aimed at the fact that more and more processes in the diagnosis of residual equipment life at oil and gas facilities require urgent and immediate information on-line. We describe a block

diagram of the sensor measuring complex control of the electric current and magnetic field comprising a conductor of electric current creates a magnetic field, a laser diode, a polarizer, the sensing element, analyzer, measuring unit.

The article describes the principle of measuring the complex control of the electric current and magnetic field, which aims to address these shortcomings as accuracy, reliability, sensitivity, small size. The block diagram of the algorithm and the integration of digital devices that you can use to automate the monitoring and diagnosis of a residual resource of oil and gas equipment manufacturing enterprises in the process of oil and gas enterprises. Considered software developed prototype comprises an input transducer, such as «code voltage» and a computer microprocessor with all the auxiliaries typical large-scale integrated circuits. The software developed prototype is shown enlarged diagram of the microprocessor of the integrating device, which includes: a timer such as a parallel peripheral interface type KR580BB55 multimode type K589IP12 buffer register, address decoder, parallel converter «voltage code», and sampling and storing a number of auxiliary circuit logic elements.

Results software interfaces developed a prototype microprocessor integrator. Process automation in the diagnosis of residual life of equipment in the oil and gas companies allow momentary and receive up to date information.

Key words: measuring system, the Faraday effect, electric current, magnetic field sensor, algorithm, digital device integration, accuracy, reliability, interface.

На сегодняшний день основная тенденция развития информационно-измерительных и управляющих систем заключается в автоматизации производственных процессов на нефтегазовых предприятиях, что позволит уменьшить риски при принятии решений за счет перехода к машинному контролю больших и сложных измерительных комплексов и систем. В связи с этим растет необходимость разработки измерительных комплексов с улучшенными характеристиками (точность, надежность, чувствительность, малые габариты), при этом контроль параметров электрического тока и магнитного поля находит широкое применение в измерительных комплексах и системах диагностики остаточного ресурса оборудования нефтегазовых предприятий.

В настоящее время существуют средства измерения электрического тока и магнитного поля, но имеющиеся у них характеристики обладают рядом недостатков [1, 2, 3]. Низкие параметры искро-, взрывобезопасности, точности, быстродействия обусловлены тем, что материал изготовления чувствительных элементов существующих измерительных комплексов контроля электрического тока и магнитного поля подвержен внешнему излучению или его установка требует разрыва электрической цепи [4].

Рассматриваемый в статье измерительный комплекс контроля электрического тока и магнитного поля направлен на решение данных недостатков, а также на получение актуальной и сиюминутной информации on-line при диагностике остаточного ресурса оборудования на нефтегазовых предприятиях.

Интеграция измерительного комплекса контроля электрического тока и магнитного поля с цифровым интегрирующим устройством является наиболее удобным решением [5].

В основе построения современного измерительного комплекса контроля электрического тока и магнитного поля с цифровым интегрирующим устройством находится волоконно-оптический чувствительный элемент, использующий магнитооптический эффект Фарадея.

Если изготовить кольцо из нескольких витков оптоволокна n_f и намотать на это кольцо провод, то, пропустив электрический ток I , можно получить пре-

образователь магнитного поля, обладающий высокой чувствительностью. При этом угол вращения плоскости поляризации

$$\varphi = Vn_f n_i I,$$

где n_i — число пересечений I с n_f [6].

Чувствительный элемент отражает физические процессы, происходящие при действии внешнего магнитного поля на оптическое излучение, проходящее по чувствительному элементу. Структурная схема чувствительного элемента приведена на рисунке 1.

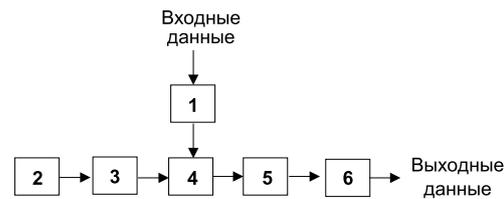


Рисунок 1. Структурная схема чувствительного элемента измерительного комплекса контроля электрического тока и магнитного поля:

- 1 — проводник электрического тока, создающий магнитное поле; 2 — лазерный диод; 3 — поляризатор; 4 — чувствительный элемент; 5 — анализатор; 6 — измерительный блок [7]

При практической реализации к цифровым интегрирующим устройствам не предъявляется строгих требований по микропроцессорным средствам [8]. Рассмотрим программно разработанный прототип, состоящий из входного преобразователя «напряжение в код» и вычислителя со всеми стандартными вспомогательными большими интегральными схемами (БИС).

В программно разработанном прототипе приведена укрупненная схема микропроцессорного интегрирующего устройства, в состав которого входят: таймер типа параллельный периферийный интерфейс (ППИ), многорежимный буферный регистр (МБР), дешифратор адреса, аналого-цифровой преобразователь, схема выборки и хранения и ряд сопутствующих логических элементов. Схема приведена на рисунке 2.

Алгоритм работы микропроцессорного интегратора отличается простотой (рисунок 3) [9].

Приведем реализацию алгоритма подробнее. При выполнении арифметической операции сложения (вычитания) знаковые разряды обрабатываются цифровыми.

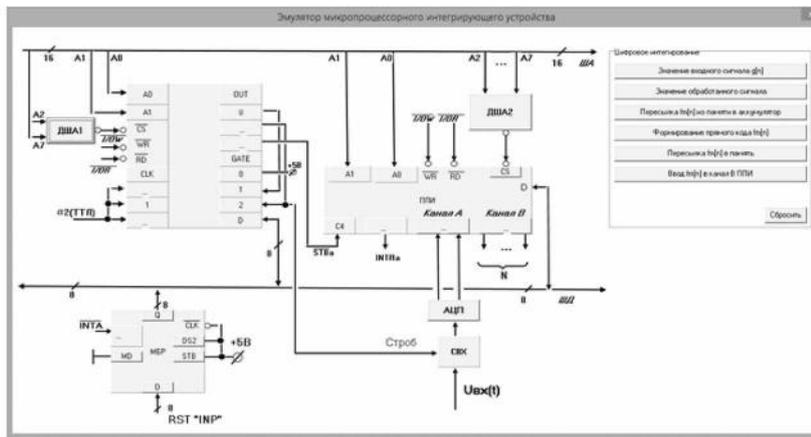


Рисунок 2. Интерфейс программно разработанного прототипа микропроцессорного интегрирующего устройства

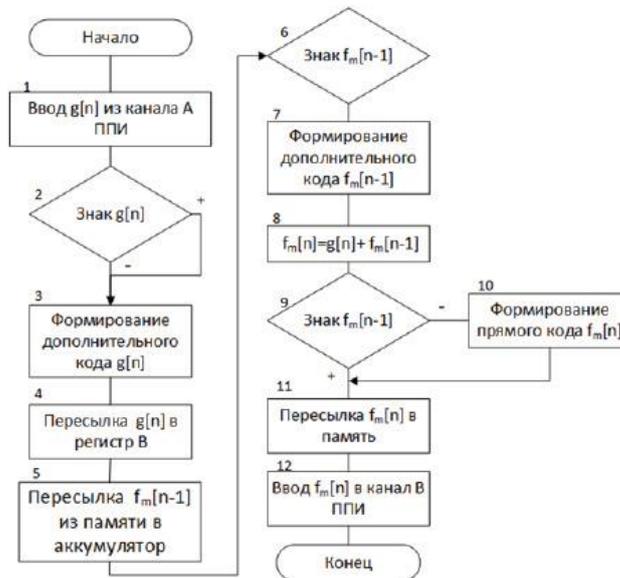


Рисунок 3. Алгоритм подпрограммы микропроцессорного интегратора

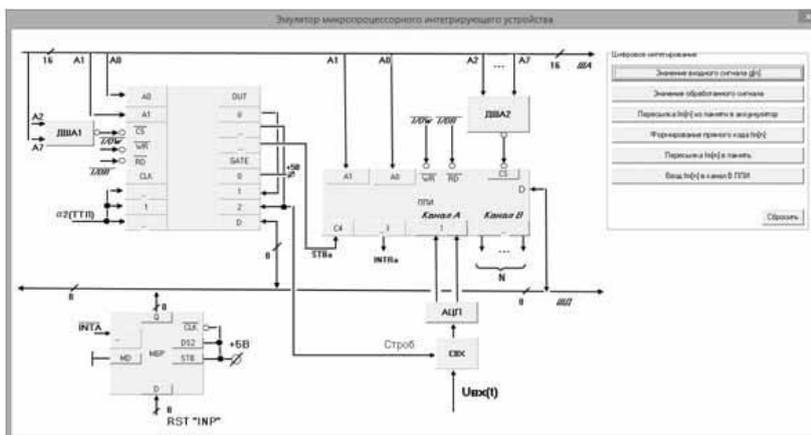


Рисунок 4. Реализация подпрограммы. Пункт: значение входного и обработанного сигнала g[n]

Значения входного сигнала $g[n]$ вводятся в микропроцессор в прямом коде с указанием знака в старшем разряде.

Обработку прерывания цифрового интегрирования микропроцессор считывает в аккумулятор, значение входного сигнала — из канала А интерфейса ППИ (блок 1) (рисунок 4).

В блоках 2 и 3 осуществляется анализ знака числа $g[n]$, и в случае $g[n] < 0$ формируется дополнительный код числа $g[n]$ (рисунок 5).

Далее значение $g[n]$ заносится в регистр В микропроцессора, освобождая аккумулятор для последующих операций (рисунок 6).

В блоке 5 вычисленное на $(n-1)$ -ом шаге значение величины $f_m[n-1]$ из ячейки памяти с адресом 1 пересылается в аккумулятор. Затем в блоках 6 и 7 анализируется знак величины $f_m[n-1]$, и для $f_m[n-1] < 0$ формируется дополнительный код (рисунок 7).

Реализация алгоритма интегрирования осуществляется в блоке 8.

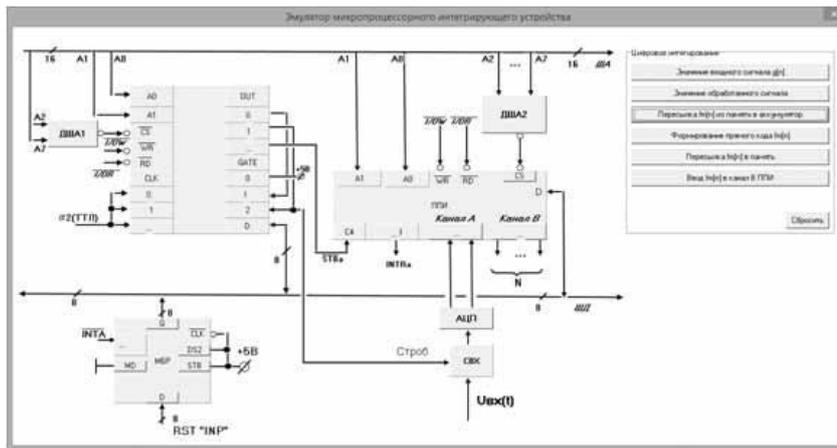


Рисунок 5. Реализация подпрограммы. Пункт: пересылка $f_m[n]$ из памяти в аккумулятор

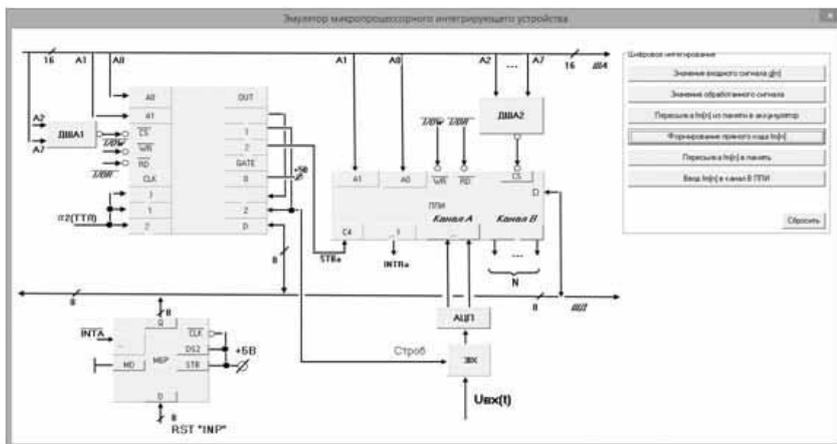


Рисунок 6. Реализация подпрограммы. Пункт: формирование прямого кода $f_m[n]$

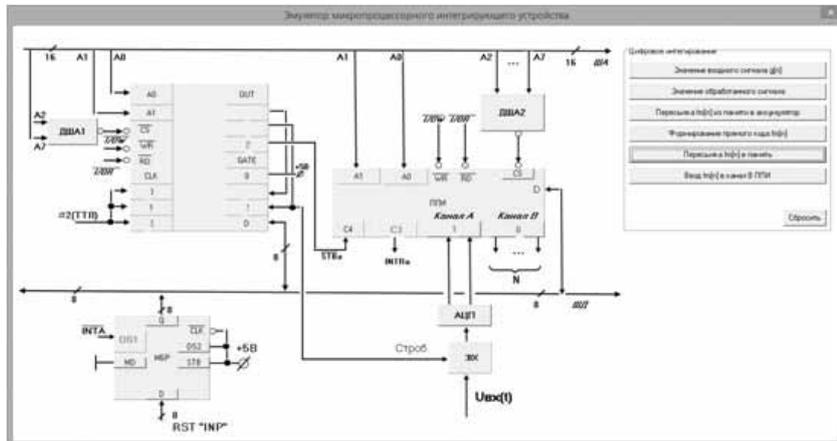


Рисунок 7. Реализация подпрограммы. Пункт: $f_m[n]$ пересылка в память

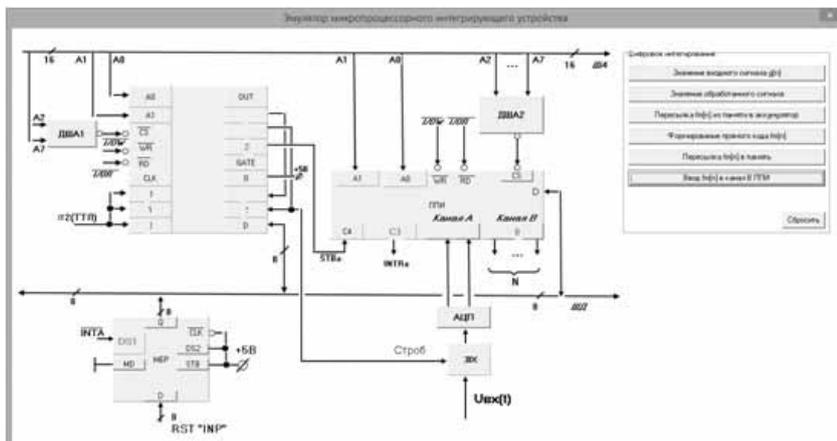


Рисунок 8. Реализация подпрограммы. Пункт: ввод $f_m[n]$ в канал ППИ

В результате получается значение величины $f_m[n] = g[n] + f_m[n-1]$, которое в случае $f_m[n-1] < 0$ преобразуется в прямой код (блоки 9, 10) и запоминается в ячейке памяти с адресом 1 (блок 11). По завершении операции пересылки вычисленное на n -ом шаге значение величины $f_m[n]$ выводится в канал В интерфейса ППИ (блок 12) (рисунок 8).

Список литературы

1. Левина Т.М. Информационно-измерительная система с волоконно-оптическим преобразователем магнитного поля: автореф. ... канд. техн. наук. — Уфа, 2010. — 22 с.
2. Левина Т.М., Лулева Н.Н. Применение искро-, взрывобезопасных преобразователей магнитного поля // Технологии трансферной безопасности. — 2015. — № 2 (60). — С. 86-93.
3. Ураксеев М.А., Левина Т.М., Шамаев Ф.Ф., Кулябин А.С. Разработка волоконно-оптических систем для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования в СУБД с веб-интерфейсом // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2015. — Т. 11. — № 1. — С. 97-103.
4. Ураксеев М.А., Левина Т.М. Волоконно-оптические датчики электрического тока и магнитного поля как средства повышения уровня безопасности, объектов нефтегазового комплекса // Экологические системы и приборы. — 2008. — № 3. — С. 8-12.
5. Ураксеев М.А., Левина Т.М. Волоконно-оптические датчики магнитного поля и электрического тока // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2007. — № 9. — С. 42-45.
6. Пат. 136190 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 R 15/24. Интеллектуальный преобразователь магнитного поля и электрического тока / Ф.Ф. Шамаев, Т.М. Левина. — 2013134844/28; заявл. 23.07.2013; опубл. 27.12.2013.
7. Окуси Т., Оцу М., Нисихара Х., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики: пер. с яп. — Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1991. — 255 с.
8. Пат. 62713 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 R 29/00. Информационно-измерительное устройство контроля магнитного поля и электрического тока / М.А. Ураксеев, К. В. Соловей. — 2006144718/22; заявл. 14.12.2006; опубл. 27.04.2007.
9. Бесекерский В.А., Ефимов Н.Б., Зиятдинов С.И. и др. Микропроцессорные системы автоматического управления / Под общ. ред. В.А. Бесекерского. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1988. — 365 с.
10. Ураксеев М.А., Левина Т.М. Оптоволоконные трансформаторы как элемент современных электротехнических комплексов и систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2013. — № 2. — Т. 9. — С. 23-29.

Выводы

Разработанная конструкция измерительного комплекса с программно разработанным прототипом цифрового интегрирующего устройства позволяет с высокой точностью и надежностью контролировать электрический ток и магнитное поле [10].

Автоматизация процессов при диагностике остаточного ресурса оборудования на нефтегазовых предприятиях позволит получать сиюминутную, актуальную информацию.

References

1. Levina T.M. Informatsionno-izmeritel'naya sistema s volokonno-opticheskim preobrazovatelem magnitnogo polya: avtoref. ... kand. tekhn. nauk. — Ufa, 2010. — 22 s.
2. Levina T.M., Luneva N.N. Primenenie iskro-, vzryvobezopasnykh preobrazovatelei magnitnogo polya // Tekhnologii transfernoi bezopasnosti. — 2015. — № 2 (60). — S. 86-93.
3. Urakseev M.A., Levina T.M., Shamaev F.F., Kulyabin A.S. Razrabotka volokonno-opticheskikh sistem dlya ucheta, monitoringa i prognozirovaniya raboty vysokovol'tnogo oborudovaniya v SUBD s web-interfeisom // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. — 2015. — T. 11. — № 1. — S. 97-103.
4. Urakseev M.A., Levina T.M. Volokonno-opticheskie datchiki elektricheskogo toka i magnitnogo polya kak sredstva povysheniya urovnya bezopasnosti, ob'ektov neftegazovogo kompleksa // Ekologicheskie sistemy i pribory. — 2008. — № 3. — S. 8-12.
5. Urakseev M.A., Levina T.M. Volokonno-opticheskie datchiki magnitnogo polya i elektricheskogo toka // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. — 2007. — № 9. — S. 42-45.
6. Pat. 136190 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁷ G 01 R 15/24. Intellektual'nyi preobrazovatel' magnitnogo polya i elektricheskogo toka / F.F. Shamaev, T.M. Levina. — 2013134844/28; zayavl. 23.07.2013; opubl. 27.12.2013.
7. Okosi T., Otsu M., Nisikhara Kh., Khatate K. Volokonno-opticheskie datchiki: per. s yap. — L.: Energoatomizdat, Lenigr. otd., 1991. — 255 s.
8. Pat. 62713 Rossiiskaya Federatsiya, MPK⁷ G 01 R 29/00. Informatsionno-izmeritel'noe ustroystvo kontrolya magnitnogo polya i elektricheskogo toka / M.A. Urakseev, K. V. Solovei. — 2006144718/22; zayavl. 14.12.2006; opubl. 27.04.2007.
9. Besekerskii V.A., Efimov N.B., Ziatdinov S.I. i dr. Mikroprotsessornye sistemy avtomaticheskogo upravleniya / Pod obshch. red. V.A. Besekerskogo. — L.: Mashinostroenie, Leningr. otd., 1988. — 365 s.
10. Urakseev M.A., Levina T.M. Optovolokonnye transformatory kak element sovremennykh elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. — 2013. — № 2. — T. 9. — S. 23-29.



Тимофеев А. О.
Timofeev A. O.

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



Ясовеев В. Х.
Yasoveev V. Kh.

доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Информационно-измерительная техника»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.3.083

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ СКВАЖИННОЙ ДИНАМОГРАММОЙ И ЭНЕРГИЕЙ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ СТАНКА-КАЧАЛКИ

В настоящее время техническая диагностика состояния штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ) играет ведущую роль в автоматизации процесса нефтедобычи. Благодаря развитию диагностики удается снижать затраты на обслуживание и функционирование всего комплекса насосного и наземного оборудования скважины. Принцип диагностики основан на анализе параметров, а именно, на измерении параметров текущего состояния ШСНУ и сравнении их с эталонными значениями. Так, при проведении динамометрирования — одного из важнейших методов диагностики погружной части ШСНУ — полученные динамограммы сравнивают с эталонными, на основании чего делают вывод о виде и степени неисправности. В абсолютном большинстве существующих систем динамометрирования в качестве первичного преобразователя используется датчик усилия, позволяющий измерить нагрузку, приложенную в точке подвеса штанг. Достоинством данного метода является его информативность: с его помощью можно определить практически все основные характеристики погружного оборудования ШСНУ. Однако одним из недостатков данного метода является сложность его реализации — датчик динамометрирования является достаточно сложным и дорогим устройством по сравнению с другими преобразователями, поэтому возникает задача проведения косвенного динамометрирования на основе анализа электрических характеристик. Принцип косвенного динамометрирования заключается в измерении значений активной мощности и их пересчете в значения усилия в точке подвеса штанг ШСНУ с учетом влияния неуравновешенности станка-качалки.

В данной статье рассмотрены существующие подходы к анализу мощности, потребляемой электродвигателем станка-качалки, методы определения неуравновешенности станка-качалки, а также взаимосвязь между потребляемой мощностью и силой на штанге. Рассмотрены вопросы учета неуравновешенности станка-качалки в процессе определения потребляемой мощности, а также выявлена корреляция между потребляемой мощностью $N(\varphi)$, усилием на штанге $P_2(\varphi)$, коэффициентом сбалансированности D_p и коэффициентом $1/D_p$, обратном коэффициенту сбалансированности. С учетом этого была предложена структура системы косвенного динамометрирования по измеренным значениям мощности, а также описан механизм функционирования данной системы. Представлена предварительная оценка погрешности данной системы, а также проведен анализ энергопотребления микроконтроллера системы и даны рекомендации по оптимальным режимам его работы. Представленная система может применяться как для комплексной диагностики ШСНУ, так и для выявления отдельных неисправностей в её системах.

Ключевые слова: динамометрирование, ваттметрирование, штанговая скважинная насосная установка, неуравновешенность, активная мощность.

AN ANALYSIS OF THE CORRELATION BETWEEN THE DOWNHOLE DYNAMOMETER CARD AND THE ENERGY CONSUMED BY THE MOTOR OF THE PUMPING UNIT

At the moment technical diagnostics of the downhole sucker rod pumping units (DSRPU) plays a key role in the automation of the process of oil production. Thanks to the development of diagnostics it is able to reduce the maintenance costs and the functioning of the entire complex of submersible and surface equipment. Diagnostics principle is based on the analysis of options is to measure the parameters of the current state of DSRPU and comparing them

with the reference values. Thus, during dynamometer carding — one of the most important diagnostic methods of submersible DSRPU equipment diagnostics — a dynamometer card is obtained and compared with the reference card, on which we may draw a conclusion about the type and a degree of fault. In the vast majority of existing dynamometer carding systems a force sensor is used as the primary device, which allows to measure the load that applied at the point of suspension rods. The advantage of this method is in its informative value: it can be used to identify virtually all the main characteristics of the submersible DSRPU equipment. However, one disadvantage of this method which is necessary to allocate includes the complexity of its implementation - dynamometer sensor is quite complicated and expensive device compared to other transducers. Therefore, there arises the problem of indirect dynamometer carding which based on an analysis of the electrical characteristics. The principle of indirect dynamometer carding is to measure the active power values and their significance in terms of efforts at the point of suspension rods DSRPU taking into account the effect of unbalance of the pumping unit. This paper discusses existing approaches to the analysis of the power consumed by the motor pumping unit, methods for determining the imbalance of pumping unit, and the relationship between power consumption and power on the rod. The questions of the effect of imbalance of pumping unit in the process of determining the power consumption are considered, as well as the correlation between power consumption $N(\varphi)$, a force on the rod $P_2(\varphi)$, the balance ratio D_p and ratio $1/D_p$, the return to a balanced ratio. Given this a structure of a system of indirect dynamometer carding has been proposed which measured values of active power, and the mechanism of functioning of the system is also described. Preliminary estimate of the error of the system is presented, as well as the analysis of energy consumption of the microcontroller unit and recommendations on the optimal mode of its operation are also given. The proposed system can be used for complex diagnostics of DSRPU, and to identify specific faults in its systems.

Key words: dynamometer carding, wattmeter carding, downhole sucker rod pumping unit, unbalance, active power.

Наиболее распространенным и изученным методом диагностики состояния скважинных штанговых насосных установок (СШНУ) является динамометрирование [1], процесс получения соотношений между силой $P(S)$, прикладываемой к полированному штоку СШНУ, и смещением S от точки подвеса стержня. Будучи одной из форм полученных кривых, динамограмма показывает изменения нагрузки $P(S)$ в точке подвеса стержня в зависимости от смещения S во время штангового качания. Природа отклонения динамограммы от нормы позволяет определить различные неисправности в работе СШНУ. Однако этот способ, как известно, не удобен в эксплуатации: портативные проводные динамометры относительно дороги и ненадежны [2]. Кроме того, метод полностью исключает диагностику наземного оборудования.

Более удобным методом диагностики СШНУ может быть ваттметрирование, то есть процесс получения ваттметрограммы, показывающей соотношение между мощностью $N(\varphi)$, потребляемой электродвигателем насосной установки (НУ), и углом поворота коленчатого вала. В этом случае нет необходимости в использовании преобразователей механических величин в электрические сигналы, используется датчик мощности переменного тока. Следует, однако, отметить, что динамометрирование в основном используется сегодня для диагностики отказов штанговых насосов, так как расшифровка динамометрических карт лучше изучена, чем у карт ваттметрирования. Изучение симптомов неисправности из карт ваттметрирования является длительным процессом, который требует многочисленных экспериментов.

Таким образом, возникает задача проведения корреляции между энергетическими и динамическими характеристиками СШНУ, а именно между ваттметрограммой и динамограммой.

В общем виде мощность, потребляемая СШНУ из сети (P_3), может быть определена из соотношения

$$P_3 = P_{ж} + \Delta P_{п}, \quad (1)$$

где $P_{ж}$ — полезная мощность, расходуемая на подъем скважинной жидкости; $\Delta P_{п}$ — суммарные потери мощности НУ.

Использование данного метода расчета полезной мощности на практике затруднено тем, что многие параметры работы погружного оборудования, определяющие суммарные потери мощности, не могут быть измерены, поскольку для них могут быть приведены расчеты лишь с учетом определенных допущений и погрешностей.

Определение полезной мощности, исходя из электрических характеристик электрооборудования СШНУ, осложняется тем, что электрическая нагрузка является непостоянной за период качания, поэтому большинство параметров электродвигателя также изменяются за каждый период.

Существует эмпирическая формула для определения мощности, потребляемой СШНУ, предложенная Б.М. Плющом и В.О. Саркисяном [3]

$$P_3 = \frac{10^3}{\eta_n} \left(K_1 + \frac{K_2 \cdot F_{ж} \cdot S}{9,81} \right) N, \quad (2)$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от типа и грузоподъемности НУ; K_2 — коэффициент, зависящий от режима откачки и диаметра насоса; η_n — коэффициент полезного действия передачи от вала двигателя к валу кривошипа; $F_{ж}$ — вес поднимаемой жидкости; S — длина хода штока, м; N — количество качаний балансира в секунду.

Данная формула позволяет оценить полную мощность, потребляемую СШНУ, для подъема скважинной жидкости. Недостатком данной формулы является необходимость вычисления коэффициентов η_n и K_2 , которые являются индивидуальными для каждого станка-качалки и могут изменяться со временем.

Известны расчеты по определению зависимости между потребляемой мощностью электродвигателя и силой на штанге [4]. Так, мощность $N(\varphi)$, потребляе-

мая электрическим двигателем, обусловлена, в основном, следующими силами: $P_1(\varphi)$ — балансировкой веса груза и $P_2(\varphi)$ — усилием на штанге. Была установлена зависимость между мощностью $N(\varphi)$, потребляемой электродвигателем, и силой $P_2(\varphi)$, приложенной к штанге:

$$P_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 R \omega} \frac{R \sin(\alpha + \varphi) - (\lambda_1 \sin \varphi + H \cos \varphi)}{(\lambda_1 \sin \alpha - H \cos \alpha) - \lambda_1 \sin(\alpha + \varphi)} \times (N(t) - P_1 \cdot \omega \cdot R \cdot \cos(\omega t)) \quad (3)$$

Данное соотношение позволяет определить усилие, создаваемое на штанге скважинной штанговой насосной установки, без вычисления коэффициентов, индивидуальных для каждого станка-качалки. Следует отметить, что в соотношении (3) балансировка веса груза должна быть определена заранее, что не всегда представляется возможным в условиях полевой эксплуатации, поэтому данный вопрос, по мнению авторов, необходимо решать путем вычисления балансировки на основе определения сбалансированности станка-качалки СШНУ.

Для вычисления сбалансированности станка-качалки производится сравнение энергий, затрачиваемых при ходе штока вверх и вниз. Энергия соответствует площади под кривой изменения мощности. Коэффициент сбалансированности равен отношению этих энергий, при идеальной сбалансированности коэффициент будет равен единице.

Следует учесть, что реактивная мощность электродвигателя станка-качалки может существенно превосходить активную. Кроме того, реактивная мощность в процессе качания меняется незначительно — не более чем на 2 %, в то время активная мощность варьируется до 75 %. Коэффициент мощности изменяется от 0,06 до 0,27.

Несбалансированность станка-качалки может быть установлена по значениям полной или активной мощности

$$D_p = \frac{P_U - P_D}{P_U + P_D}, \quad D_I = \frac{I_U - I_D}{I_U + I_D} \quad (4)$$

где D_p и D_I — коэффициенты неуравновешенности, которые рассчитываются на основании значений мощности и тока соответственно; P_U и I_U — значения активной мощности и тока при подъеме штанги; P_D и I_D — значения активной мощности и тока при спуске штанги.

На основании вышеизложенного соотношение (3) примет вид

$$P_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 R \omega} \frac{R \sin(\alpha + \varphi) - (\lambda_1 \sin \varphi + H \cos \varphi)}{(\lambda_1 \sin \alpha - H \cos \alpha) - \lambda_1 \sin(\alpha + \varphi)} \times N(t) \times D_p \quad (5)$$

Для подтверждения теоретических исследований были проведены экспериментальные измерения мощности, потребляемой электродвигателем СШНУ, а также усилия в траверсе канатной подвески.

Данные исследования проводились на скважине № 10958. По измеренным значениям были построены ваттметрограмма и динамограмма за период качания, которые изображены на рисунках 1 и 2.

На рисунках видно, что увеличение потребляемой мощности прямо пропорционально усилию в траверсе канатной подвески станка-качалки. Однако получен-

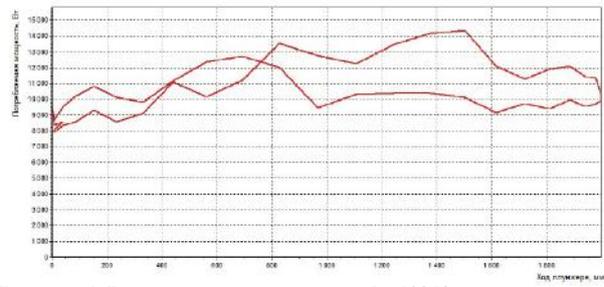


Рисунок 1. Ваттметрограмма скважины № 10958

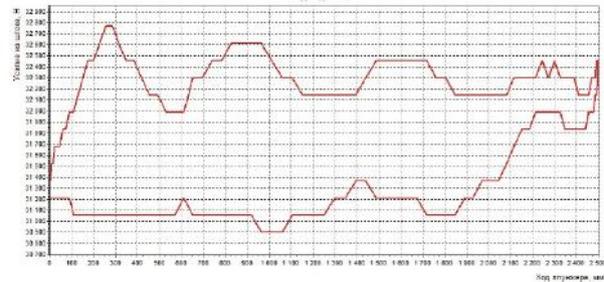


Рисунок 2. Динамограмма скважины № 10958

ная ваттметрограмма за период качания имеет несколько иную тенденцию, чем построенная динамограмма: при свободном ходе станка-качалки потребляемая электроэнергия уменьшается не более, чем на 5–10 %.

Для идентификации структуры математической модели процесса нефтедобычи СШНУ была рассмотрена корреляция следующих факторов: мощность $N(\varphi)$, усилие на штанге $P_2(\varphi)$, коэффициент сбалансированности D_p и коэффициент $1/D_p$, обратный коэффициенту сбалансированности.

Было сделано 9 выборок, для которых определены значения факторов. Значения откликов корреляции отражены в таблице 1.

Таблица 1. Значения откликов корреляции

№ выборки	$N(\varphi)$, кВт	$P_2(\varphi)$, кН	D_p , %	$1/D_p$, 1/%
1	9,0	32,7	29,6	0,03378
2	10,2	32,1	32,3	0,03091
3	10,4	32,4	38,8	0,02574
4	13,0	32,5	43,1	0,02317
5	12,6	32,2	31,0	0,03226
6	13,0	32,4	38,4	0,02604
7	14,2	32,3	33,9	0,02946
8	12,4	32,1	26,5	0,03774
9	11,8	32,4	19,1	0,05236

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции

	$N(\varphi)$	$P_2(\varphi)$	D_p	$1/D_p$
$N(\varphi)$	1,0000	0,9686	0,8783	0,9757
$P_2(\varphi)$	0,9686	1,0000	0,8306	0,9289
D_p	0,8783	0,8306	1,0000	0,9396
$1/D_p$	0,9757	0,9289	0,9396	1,0000

Как видно из таблицы 2, такие факторы, как мощность $N(\varphi)$, усилие на штанге $P_2(\varphi)$ и коэффициент сбалансированности D_p , сильно коррелированы между собой. Коэффициенты корреляции составляют 0,9686; 0,8783; 0,9757; 0,9289; 0,9396.

Мощность и усилие на штанге связаны между собой согласно указанной зависимости (3). В связи с

этим можно определить значение $P_2(\varphi)$, исходя из установления значения $N(\varphi)$.

Для вычисления значений усилия на штанге по действующим значениям мощности авторами предлагается система динамометрирования, изображенная на рисунке 3.

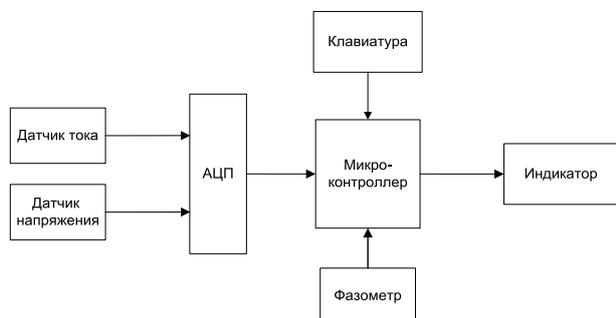


Рисунок 3. Структурная схема системы косвенного динамометрирования по измеренным значениям активной мощности

Данная система предназначена для построения динамограммы на основе измеренных значений активной мощности. Так, на основе измеренных мгновенных значений напряжения и тока вычисляются действующие значения напряжения и тока следующим образом:

$$I_K = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{L-1} i_k^2(t)}{L}}, \quad (6)$$

$$U_K = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{L-1} u_k^2(t)}{L}}, \quad (7)$$

где $i(t)$, $u(t)$ — мгновенные значения тока и напряжения, полученные с датчиков тока и напряжения соответственно и оцифрованные.

На основе вычисленных действующих значений тока и напряжения микроконтроллер определяет значение полной мощности по следующей формуле:

$$S_k = U_k \cdot I_k, \quad (8)$$

где S_k — действующее значение полной мощности.

Вычисление активной мощности N_k из полной S_k производится в микроконтроллере при помощи коэффициента мощности $\cos(\psi)$, а сдвиг фаз ψ измеряется фазометром. Затем при помощи формулы (4) вычисляются два коэффициента уравновешенности: D_p и D_r . Коэффициент уравновешенности, который используется в дальнейших расчетах, — среднее геометрическое этих двух коэффициентов и именуется D_δ .

Оценка погрешностей разрабатываемой системы показала, что при использовании первичных преобразователей класса точности 1,0 погрешность всей системы не будет превышать 1,56 % во всем диапазоне измерения.

Была проведена оценка энергопотребления микроконтроллера STM32F407VGT6, используемого в данной системе в зависимости от частоты тактирования. Результаты приведены на рисунке 4. Данный график показывает, что для снижения энергопотребления микроконтроллера на несколько миллиампер требуется установка производительности на уровне 2–3 MIPS.

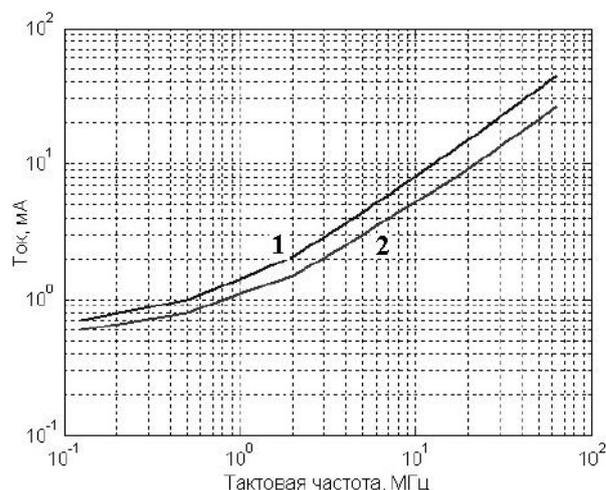


Рисунок 4. Ток потребления микроконтроллера в зависимости от частоты тактирования (1 — периферия задействована; 2 — периферия выключена)

Таким образом, в результате проведенных исследований по изучению взаимосвязей между энергетическими и динамическими характеристиками СШНУ (ваттметрограммой и динамограммой) установлено, что мощность и усилие на штанге коррелированы между собой, а коэффициенты корреляции варьируются от 0,83 до 0,98.

Предложена структура системы, позволяющая проводить динамометрирование на основе измерения значений мощности, тока и сдвига фаз. Предварительный анализ погрешности системы показал, что погрешность всей системы не превышает 1,56 % во всем диапазоне измерения.

Проведена оценка энергопотребления микроконтроллера разрабатываемой системы и даны рекомендации по оптимальной загрузке данного микроконтроллера на уровне 2–3 MIPS.

Выводы

Установленные взаимосвязи между усилием на штанге и мощностью, потребляемой электродвигателем станка-качалки, позволяют непосредственно оценить усилие на штанге по результатам измерения активной мощности. Данный подход позволяет проводить косвенное динамометрирование при уменьшении количества измеряемых параметров, тем самым уменьшается количество средств измерения и удешевляется система автоматизации в целом.

Предлагаемая система косвенного динамометрирования измеряет электрические характеристики: ток, напряжение, фазу, что позволяет проводить ваттметрирование и косвенное динамометрирование с приемлемой точностью.

Список литературы

1. Андреев В.В., Уразаков К.Р., Далимов В.У. Справочник по добыче нефти / Под ред. К.Р. Уразакова. — М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. — 374 с.
2. Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х. Автономный датчик усилия системы динамометрирования штанговой скважинной глубинно-насосной установки // Вестник УГАТУ. — 2015. — Т. 19. — № 4 (70). — С. 34-39.
3. Андриасов Р.С., Мищенко И.Т., Петров А.И. и др. Добыча нефти: справочное руководство по проектированию и эксплуатации нефтяных месторождений / Под общ. ред. Ш.К. Гиматудинова. — М.: Недра, 1983. — 455 с.
4. Guluyev G.A., Pashayev A.B., Pashayev F.G., Rzayev A.G., Sabziev E.N. Building the Dynamometer Card of Sucker Rod Pump Using Power Consumption of the Eclectic Motor of Pumping Unit // Problems of Cybernetics and Informatics: IV International Conference. — 2012. — Section 4. — P. 19-21.
5. Клаассен К.Б. Основы измерений. Датчики и электронные приборы: пер. с англ. / Е.В. Воронова, А.Л. Ларина. 3-е изд. — Долгопрудный: Интеллект, 2008. — 350 с.

References

1. Andreev V.V., Urazakov K.R., Dalimov V.U. Spravochnik po dobyche nefi / Pod red. K.R. Urazakova. — M.: Nedra-Biznestsentr, 2000. — 374 s.
2. Timofeev A.O., Yasoveev V.Kh. Avtonomnyi datchik usiliya sistemy dinamometrirovaniya shtangovoi skvazhinnoi glubinno-nasosnoi ustanovki // Vestnik UGATU. — 2015. — T. 19. — № 4 (70). — S. 34-39.
3. Andriasov R.S., Mishchenko I.T., Petrov A.I. i dr. Dobycha nefi: spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniyu i ekspluatatsii neftyanykh mestorozhdenii / Pod obshch. red. Sh.K. Gimatudinova. — M.: Nedra, 1983. — 455 s.
4. Guluyev G.A., Pashayev A.B., Pashayev F.G., Rzayev A.G., Sabziev E.N. Building the Dynamometer Card of Sucker Rod Pump Using Power Consumption of the Eclectic Motor of Pumping Unit // Problems of Cybernetics and Informatics: IV International Conference. — 2012. — Section 4. — P. 19-21.
5. Klaassen K.B. Osnovy izmerenii. Datchiki i elektronnye pribory: per. s angl. / E.V. Voronova, A.L. Larina. 3-e izd. — Dolgoprudnyi: Intellect, 2008. — 350 s.



Латыпов К. Ф.
Latypov K. F.

аспирант кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

г. Уфа, Российская Федерация



Доломатов М. Ю.
Dolomatov M. Yu.

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Управление и сервис в технических системах», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

г. Уфа, Российская Федерация

УДК 53.04, 530.1

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ПОТЕНЦИАЛОВ ИОНИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТАМ ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При изучении явлений, связанных с исследованием эмиссии, и при определении работы выхода электрона с поверхности твердых тел возникает проблема прогнозирования энергии ионизации. В настоящее время существует ряд методов прогнозирования, таких как методы Корринги-Кон-Ростокера, метод ортогонализированных плоских волн и др., но они обладают существенными недостатками — плохо воспроизводят возбужденные состояния, в том числе спектр, ширину запрещенной зоны и другие параметры. Такие методы характеризуются математической сложностью и неадекватностью расчёта экспериментальных данных. Становится очевидным, что наряду с теоретическими методами необходимо развивать и полуэмпирические, опирающиеся на эксперимент.

В данной работе рассматривается функционал электронного состояния системы, вид которого в конкретном виде не определен. Учитывается только первый и второй порядок возмущения энергии квантовой системы. На основе такого подхода предложена двухпараметрическая полуэмпирическая феноменологическая модель. Физический смысл функционала заключается в отображении энергии совокупности твёрдых тел, близких по типу внешних электронных оболочек.

Этот полуэмпирический функционал определяется кулоновской и обменной энергией взаимодействия электронов, а также энергией электростатического взаимодействия всех электронов с ионами кристаллической решетки. Предлагаемый функционал зависит от физических свойств, которые связаны с энергией квантовой системы. Такими свойствами могут быть простые физические свойства, например, такие как интегральные коэффициенты отражения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах электромагнитного спектра, заряды атомов. Они соответственно выражают электронное и электростатическое взаимодействие для электронов и их энергию взаимодействия с кристаллической решеткой. Эта модель подтверждается зависимостью первых потенциалов ионизации металлов от интегрального коэффициента отражения и зарядов атомов. Результаты подтверждаются статистической обработкой экспериментальных данных для металлов первой и второй групп периодической системы Менделеева методом многофакторного регрессионного анализа. Установленные зависимости имеют практическое значение для оценки энергий ионизации и работы выхода электронов многих металлических тел: монокристаллов, пленок, квантовых точек и других.

Ключевые слова: полуэмпирическая модель, функционал энергии, интегральный коэффициент отражения, заряды атомов, оптические спектры, электрон-электронное взаимодействие, статистическая обработка данных.

SEMIEMPIRICAL ASSESSMENT ENERGY METALS IONIZATION POTENTIALS ON INTEGRAL COEFFICIENT OF REFLECTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

Forecasting of ionization energy presents difficulties in the processes related to emission research and electronic work function from the surface of solids. Nowadays several forecasting methods are used — such as Korringa-Kohn-Rostoker approximation, method of orthogonalized plane waves, etc., but they have essential disadvantages — excited states parameters are not clearly represented, such as the spectrum, the band gap, etc. These methods require complex math calculations and still have poor correspondence to experimental data. Therefore along with theoretical methods we should develop also semiempirical methods based on the experiment.

In this paper we research functional of electronic states of the system, which form is not defined in a particular way. We consider only first and second order of the power compensation of the quantum system. On this basis we suggest a two-parameter semiempirical phenomenological model. The physical meaning of functional is displaying sum-total energy of solids with outer electron shells of similar types.

This semiempirical functional is determined by Coulomb and interchange interaction energy of the electrons, and also by the energy of the electrostatic electronic interaction with the crystal lattice ions. This functional depends on the physical properties that are related to the energy of quantum system. These properties may be simple physical properties such as integrated reflectances in the ultraviolet and visible regions of electromagnetic spectrum, atomic charges. They respectively express electronic and electrostatic interaction of electrons and their interaction energy with the crystal lattice. This model is confirmed by correlation of the first metal ionization potentials to the integral reflection coefficient and atomic charges. The results are confirmed by statistical processing of experimental data for metals of the first and second groups in Mendeleev’s classification conducted by multivariate regression analysis. These dependences have practical significance for evaluation of ionization energies and electron work function of many metallic agents: single crystals, films, quantum dots, and others.

Key words: semiempirical model, energy functional, integrated reflectance, atomic charges, optical spectra, electron-electron interaction, statistical data processing.

Введение

Для решения задач физической и прикладной электроники при изучении явлений, связанных с исследованием эмиссии, и для определения работы выхода электрона с поверхности твердых тел необходимо прогнозировать энергию их ионизации. Как известно, эта энергия соответствует границе занятой зоны проводимости и определяется зонной структурой тел [1]. В настоящее время существует значительная группа методов расчета зонной структуры, которые применяются для расчета металлов и полупроводников [2 — 5], таких как: метод ортогонализированных плоских волн, метод присоединенных плоских волн (ППВ), метод Корринги-Кона-Ростокера (ККР). По-прежнему используются методы, основанные на методе самосогласованного поля Хартри-Фока, в которых каждый электрон движется в поле периодического потенциала, создаваемого остальными электронами и неподвижными ионами решетки. Недостатками перечисленных методов является завышенное значение ширины запрещенной зоны. Наиболее широкое распространение получили методы теории функционала плотности Кона-Шэма [2].

Данные методы удовлетворительно оценивают основное состояние твердого тела, но плохо воспроизводят возбужденные состояния, такие как спектр, ширина запрещенной зоны и другие параметры. В методе функционала плотности Кона-Шэма (DFT) [2] предполагается, что функционал энергии основного состояния, вычисляемый в заданной точке пространства, определяется следующим образом

$$E_{xc} = \int \varepsilon_{xc}(n)\rho(r)d^3r, \quad (1)$$

$$\text{где } \rho(\vec{r}) = N \int d^3r_2 \int d^3r_3 \dots \int d^3r_N \psi^*(\vec{r}, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N) \psi(\vec{r}, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N), \quad (2)$$

здесь r_1, \dots, r_N — расстояния между взаимодействующими частицами; ψ — соответствующая волновая функция.

Волновая функция в (2) считается функционалом, поэтому остальные наблюдаемые физические величины также функционалы ρ .

Основной проблемой DFT является попытка точного учета корреляционной и обменной энергии путём введения различных функционалов, что весьма непросто. В большинстве расчетов твердых тел обменно-корреляционный функционал разбивается на обменную и корреляционную составляющие, например, в методе Пердю-Бёрке-Эрнцерхофа (PBE). Использование этих функционалов в сочетании с многочастичной теорией возмущений дает хорошие результаты при расчете структуры и энергетических характеристик отдельных молекул и основных состояний идеальных твердых тел [5]. Недостатками метода DFT являются: недооценка ширины запрещенной зоны в неидеальных решетках кристаллов, молекулах и кластерах, неточности и значительные погрешности в расчетах энергии ионизации, сродства к электрону и неприменимость к системам с открытыми оболочками, например к парамагнитным наночастицам. Для решения этой проблемы применяют многочастичную теорию возмущений, которая приводит к более адекватным результатам, но создает значительные вычислительные трудности, поэтому наряду с теоретическими необходимо развивать полуэмпирические подходы к оценке электронных состояний реальных твердых тел и молекул, которые опираются на эксперимент, и прежде всего на данные спектроскопии.

В настоящее время для определения энергии ионизации (ЭИ) и сродства к электрону (СЭ) наряду с

фотоэлектронной спектроскопией существует альтернативный метод, использующий интегральные характеристики электронных спектров поглощения в ультрафиолетовой (УФ) и видимой областях (так называемых интегральных сил осцилляторов [6, 7]). Так, в работе [6] выявлена эмпирическая связь между интегральными силами осциллятора (ИСО) электронного спектра поглощения атомов и молекул и первыми потенциалами ионизации (ПИ). Как известно, первый ПИ численно равен энергии ионизации, взятой с обратным знаком. В квазилинейном приближении эти закономерности имеют вид:

$$P = \alpha_1 + \alpha_2 \theta, \quad (3)$$

где P — потенциал ионизации, эВ; α_1, α_2 — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа орбитали, постоянные в данном гомологическом ряду, соответственно эВ, эВ·моль·см⁻¹·нм⁻¹;

$$\theta_{lg} = \iint_{\lambda, \varepsilon} \log(\xi) d\lambda d\varepsilon, \quad (4)$$

где θ_{lg} — так называемый тета интеграл от логарифмической спектральной функции молярного коэффициента поглощения от длины волны, нм, л·нм·моль⁻¹·см⁻¹; $\log \xi = f(\varepsilon)$ — соответствующая логарифмическая спектральная функция поглощения электромагнитного излучения для атомов или молекул, безразмерная величина, характеризующая масштаб квантовой системы.

С физической точки зрения (4) отражает квантовый континуум множества электронных состояний. Кроме того, физический смысл величины (4) 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. И согласно правилу сумм Томаса-Райха-Куна [8], выполняющегося для идеальных многоэлектронных систем, во внешних полях сумма сил осциллятора для всех электронов в N -электронной молекуле равна числу электронов N . Последнее означает косвенную связь этой величины с зарядами атомов. 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 зарядов ядер в квантовых системах. Наличие зависимостей (3) означает, что подобные закономерности связи интегральных характеристик отражения и энергии ионизации должны выполняться для плёнок и кристаллов металлов и полупроводников.

В соответствии с изложенным, логично предположить существование связи вида

$$\Xi = f(\theta_R, S), \quad (5)$$

где Ξ — энергетический параметр, характеризующий спектр квантовой системы, например, потенциал ионизации, эВ; S — структурный параметр, характеризующий электромагнитное взаимодействие частиц; θ_R — величина, характеризующая результирующий спектр отражения системы (квантовый континуум электронных состояний), определяемый интегрированием коэффициента отражения по всему спектру.

$$\theta_R = \iint_{\varepsilon, R} \xi(\varepsilon, R) d\varepsilon dR, \quad (6)$$

где ε — энергия электромагнитного излучения, Дж; R — коэффициент отражения; ξ — соответствующая функция спектральной плотности энергии электромагнитного излучения взаимодействующего с частицами вещества.

Цель работы

Целью данной работы является исследование взаимосвязи первых ПИ и интегральных коэффициентов отражения (ИКО) кристаллами и пленками металлов 1, 2 группы (Na, K, Cu, Rb, Ag, Cs, Au, Be, Mg, Ca, Zn, Sr, Cd, Ba) в рамках двухпараметрической феноменологической модели неидеальных многоэлектронных систем.

Основная идея работы состоит в предположении, что спектр суммы собственных значений энергий совокупности из m неидеальных квантовых систем E описывается определенным суперфункционалом от энергии всех основных и возбужденных электронных состояний. Эти энергетические суперфункционалы могут быть построены из квантовых систем с одинаковым строением внешних электронных оболочек, например, элементов определенной группы в системе Д.И. Менделеева. Суперфункционалы, в свою очередь, выражаются через наборы подмножеств функционалов различных сохраняющихся физических величин, учитывающих обменное взаимодействие электронов и их электростатическое взаимодействие между собой и ионами решеток твердых тел. В соответствии с изложенным ниже, варианты таких подмножеств могут быть построены в виде подмножеств функционалов от ИСО $\theta(\varepsilon, \lambda)$ и функционалов зарядов $F(Z)$. Эти величины отражают законы числа частиц и сохранения заряда квантовой системы соответственно.

$$E = F(\theta, Z). \quad (7)$$

В общем случае функционал θ построен на классе не сепарабельных, гладких, ограниченных функций, которые, в свою очередь, являются суперпозицией дискретных, спектральных Блоховских функций и могут быть представлены, например, функциями Ψ от рядов Фурье для m решеток:

$$\theta(\varepsilon, \lambda) = \Psi \left(\sum_m \sum_n A_{mn} \cdot e^{inkt} \right), \quad (8)$$

где A_{mn} — константа; t — время; c, n — число членов ряда Фурье; i — комплексная единица, $k=2\pi/\lambda$.

Очевидно, что множество функций $e^{inkt} \in [-\infty < n < \infty]$ в (8) образует бесконечномерный базис линейного пространства $L^2[a; b]$ ортогональных синус-косинусных функций.

Предположим, что в рядах структур твердых тел, содержащих атомы с одним типом внешней электронной оболочки, потенциалы межчастичного взаимодействия близки между собой и энергией электронной системы, тогда отклонение неидеального функционала энергии от некоторого исходного значения ΔF будет характеризовать электронное состояние решетки металла с данным структурным распределением заряда, соответствующим определенной группе симметрии.

Считая функционал E в (7) непрерывной функцией двух переменных, разложим его в ряд по степеням $(\theta - \theta_0)$ и $(Z - Z_0)$ и некоторого остаточного члена:

$$E = F(\theta, Z) = f(\theta_0, Z_0) + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial f(\theta_0, Z_0)}{\partial \theta} + \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 f(\theta_0, Z_0)}{\partial \theta^2} + \frac{(\theta - \theta_0)^3}{3!} \cdot \frac{\partial^3 f(\xi_1, Z_0)}{\partial \theta^3} + \frac{Z - Z_0}{1!} \left[\frac{\partial f(\theta_0, Z_0)}{\partial Z} + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial^2 f(\theta_0, Z_0)}{\partial (Z\theta)} + \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^3 f(\xi_2, Z_0)}{\partial (Z\theta^2)} \right] + \frac{(Z - Z_0)^2}{2!} \left[\frac{\partial^2 f(\theta_0, Z_0)}{\partial (Z^2)} + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial^3 f(\xi_3, Z_0)}{\partial (Z^2\theta)} \right] + \frac{(Z - Z_0)^3}{3!} \cdot \frac{\partial^3 f(\theta, \eta_1)}{\partial (Z^3)}, \quad (9)$$

где $\eta_1 = Z_0 + \mu_1(Z - Z_0), 0 < \mu_1 < 1$; $\xi_1 = \theta + \mu_2(\theta - \theta_0), 0 < \mu_2 < 1$; $\xi_2 = \theta + \mu_3(\theta - \theta_0), 0 < \mu_3 < 1$; $\xi_3 = \theta + \mu_4(\theta - \theta_0), 0 < \mu_4 < 1$.

При $n=2$ формула (9) примет вид

$$F(\theta, Z) = A_0 + A_1(\theta - \theta_0) + A_2(Z - Z_0) + [A_3(\theta - \theta_0)^2 + A_4(\theta - \theta_0)(Z - Z_0) + A_5(Z - Z_0)^2] + \Omega, \quad (10)$$

где коэффициенты A_0, \dots, A_5 не зависят от θ и Z , а Ω — остаточный член, структура которого аналогична структуре остаточного члена в формуле Тейлора для сходящегося ряда двух переменных.

Полагая $\theta_0 = 0$ и $Z_0 = 0$, $\Omega \rightarrow 0$ перепишем формулу (9) в виде

$$E = A_0 + A_1 \cdot \theta + A_2 \cdot Z + A_3 \cdot \theta^2 + A_4 \theta Z + A_5 \cdot Z^2. \quad (11)$$

Физический смысл коэффициентов A_0, \dots, A_5 заключается в характеристике возмущения суперфункционала энергетического спектра квантовой системы под влиянием структурных, кулоновских и обменных факторов электронного взаимодействия. Выражение (11) позволяет искать зависимость энергии ионизации I в виде полуэмпирической квадратичной функции двух переменных: ИКО и зарядов атомов кристаллической решетки

$$I = a_0 + a_1 \cdot \theta + a_2 \cdot Z + a_3 \theta Z + a_4 \cdot \theta^2 + a_5 \cdot Z^2, \quad (12)$$

где θ_r — ИКО, эВ; a_0, \dots, a_5 — эмпирические коэффициенты, имеющие следующую размерность: a_0 [эВ]; a_1 — безразмерный; a_2 [эВ/Кл]; a_3 [Кл⁻¹]; a_4 [эВ⁻¹]; a_5 [эВ/Кл²].

Несмотря на полуэмпирический характер зависимости (11) коэффициенты a_0, \dots, a_5 очевидно имеют физический смысл как характеристики возмущения внешней электронной оболочки. Так, a_0 характеризует тип электронной оболочки; a_1, a_4 — возмущение оболочек под влиянием кулоновских и обменных факторов электронного взаимодействия; a_2, a_5 — возмущение оболочек под влиянием кулоновских факторов взаимодействия электронов с ионами решетки 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 нашем подходе это не имеет значения, так как подход к решению задачи феноменологический.

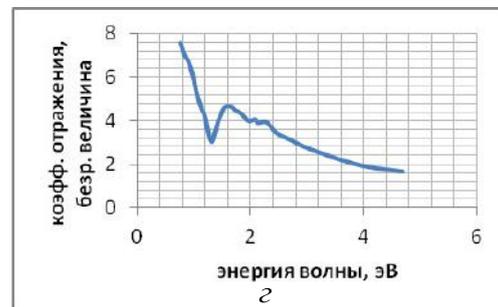
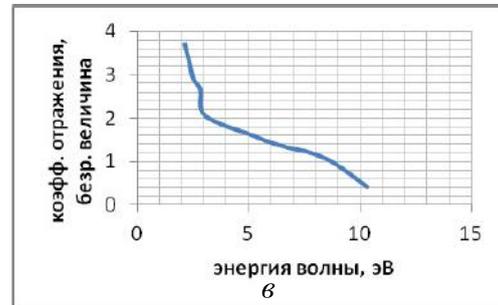
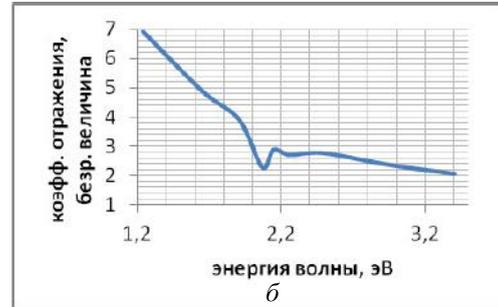
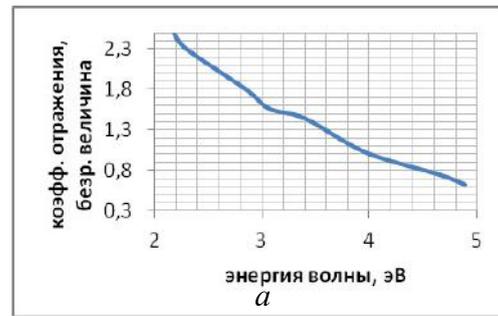


Рисунок 1. Спектры отражения металлов: Na (жидкое состояние) (а), Cu (массив) (б), Mg (плёнка) (в), Zn (монокристалл) (г)

Таблица 1. Физические свойства металлов 1 и 2 группы

Металлы	Состояние	ИКО, отн. ед.	Заряд ядра	ПИ эВ эксп.	Металлы
Na	плёнка	531,24	11	5,14	Na
K	плёнка	224,17	19	4,34	K
Cu	плёнка	727,83	29	7,73	Cu
Rb	плёнка	163,63	37	4,18	Rb
Ag	плёнка	771,25	47	7,58	Ag
Cs	плёнка	258,31	55	3,89	Cs
Au	плёнка	867,50	78	9,27	Au
Be	напыленное	393,57	4	9,32	Be
Mg	напыленное	573,37	12	7,65	Mg
Ca	напыленное	331,72	20	6,11	Ca
Zn	монокристалл	929,66	30	9,39	Zn
Sr	напыленное	293,95	38	5,69	Sr
Cd	напыленное	799,35	48	8,99	Cd
Ba	напыленное	304,15	56	5,22	Ba

Таблица 2. Статистические характеристики двухпараметрической феноменологической модели потенциалов ионизации

Металлы и тип внешней оболочки	Y , безр. в-на	Y^2 , безр. в-на	S , эВ
Металлы первой группы ns ¹	0,996	0,993	0,040
Металлы второй группы ns ²	0,984	0,968	0,020

Таблица 3. Коэффициенты разложения функционала электронных энергий регрессионной модели для потенциалов ионизации металлов 1 и 2 групп

	a_0 , эВ	a_1 , безр.	a_2 , эВ/Кл	a_3 , Кл ⁻¹	a_4 , эВ ⁻¹	a_5 , эВ/Кл ²
Металлы первой группы ns ¹	6,59777	-0,01407	-0,02003	-0,00005	$2,000 \cdot 10^{-5}$	0,00037
Металлы второй группы ns ²	13,3239	-0,0128	-0,2942	0,0002	$1,098 \cdot 10^{-5}$	0,0027

Таблица 4. Расчетные и экспериментальные ПИ для металлов первой группы системы Менделеева

Металлы	ИКО, отн.ед.	Заряд ядра	ПИ эксп., эВ	ПИ расч., эВ	ΔПИ, эВ
Na	531,24	11	5,14	5,235	-0,095
K	224,17	19	4,34	4,116	0,224
Cu	727,83	29	7,73	7,139	0,591
Rb	163,63	37	4,18	3,552	0,628
Ag	771,25	47	7,58	8,493	-0,913
Cs	258,31	55	3,89	4,397	-0,507
Au	867,5	78	9,27	8,921	0,349

Таблица 5. Расчетные и экспериментальные ПИ для металлов второй группы системы Менделеева

Металлы	ИКО, отн. ед.	Заряд ядра	ПИ эксп., эВ	ПИ расч., эВ	ΔПИ, эВ
Be	393,57	4	9,32	9,119	0,201
Mg	573,37	12	7,65	7,651	-0,001
Ca	331,72	20	6,11	6,641	-0,531
Zn	929,66	30	9,39	9,418	-0,028
Sr	293,95	38	5,69	5,181	0,509
Cd	799,35	48	8,99	8,950	0,040
Ba	304,15	56	5,22	5,409	-0,189

Объекты исследования и результаты

В качестве объектов исследования нами выбраны электронные спектры отражения металлов 1 и 2 группы периодической системы: Na, K, Cu, Rb, Ag, Cs, Au, Be, Mg, Ca, Zn, Sr, Cd, Ba. Соответствующие спектры выбирались из справочных данных [9]. Образцы металлов первой группы представляли собой пленки толщиной 100–1000 нм. Образцы металлов второй группы представляли собой напыленные структуры толщиной до 100 нм. Отдельные спектры отражения металлических поверхностей по данным [9] приведены на рисунке 1.

Интегрирование спектров проводили методом трапеции с шагом 5 нм. Потенциалы ионизации атомов металлов выбирались по известным данным атомной эмиссионной спектроскопии. Соответствующие данные приведены в таблице 1.

Коэффициенты (12) рассчитывали методом наименьших квадратов [10] по экспериментальным данным [9]. Статистическую обработку спектров отражения проводили методом многофакторного регрессионного анализа по стандартным программам [11] с оценкой множественного коэффициента корреляции Y , коэффициента детерминации Y^2 , стандартную ошибку S , соответствующие данные приводятся в таблице 2.

Значения этих коэффициентов модели приведены в таблице 3. Расчеты свидетельствуют о значимости всех коэффициентов в (12).

Обсуждение результатов

Таким образом, на основе экспериментальных спектроскопических данных установлены корреляционные зависимости первого ПИ от ИКО.

Достоверность полученных данных подтверждена расчетной оценкой погрешности.

В таблицах 4, 5 приведены данные о соответствии расчетных и экспериментальных значений ПИ.

Для металлов 1 и 2 групп таблицы Менделеева соответствующие ошибки расчетов составляют: среднеквадратичная — 0,04 и 0,2 эВ; средняя абсолютная — 0,20 и 0,49 эВ соответственно.

Из приведенных результатов следует, что существует взаимосвязь первых ПИ с ИКО металлических тел и зарядами элементов 1 и 2 групп периодической системы. Это подтверждают высокие значения коэффициентов множественной корреляции $Y=0,98-0,99$. Очевидно, точность измерений можно повысить, уменьшая ошибку эксперимента определения спектров отражения путем подготовки однородных поверхностей образцов, однородных по микроструктуре и степени шероховатости.

Выводы

Установлены зависимости для оценки энергий ионизации и работы выхода электронов в пленках. Для первого и второго порядков возмущения суперфункционала энергии квантовой системы предложена двухпараметрическая полуэмпирическая феноменологическая модель, связывающая энергию ионизации с интегральным коэффициентом отражения излучения в видимом и УФ диапазонах спектра. Физический смысл суперфункционала заключается в энергии совокупности электронных основных и возбужденных состояний твердых тел, близких по типу внешних электронных оболочек.

Результаты подтверждаются статистической обработкой экспериментальных данных для металлов первой и второй групп периодической системы

Менделеева методом многофакторного регрессионного анализа.

Список литературы

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. — М.: ООО «МедиаСтар», 2006. — 538 с.
2. Зиненко В.И., Сорокин Б.П., Турчин П.П. Основы физики твердого тела. — М.: Физ.-мат. лит., 2001. — 336 с.
3. Kresse G., Joubert D. The guide of VASP // Phys. Rev. — 59. — 1758 (1999). — URL: <https://cms.mpi.univie.ac.at/marsweb/index.php>.
4. Кон В. Электронное строение вещества — волновые функции и функционалы плотности // УФН. — 2002. — Т. 172. — №3. — С. 336-338.
5. Андриевский Б.В., Романюк Н.Н., Миццишин О.Я. и др. Расчет зонной структуры и оптических свойств кристаллов ГАСГ // Физика твердого тела. — 2012. — Т. 54. — № 10. — С. 1940-1945.
6. Долوماتов М.Ю., Мукаева Г.Р. Способ определения потенциалов ионизации и сродства к электрону атомов и молекул методом электронной спектроскопии // Журнал прикладной спектроскопии. — 1992. — Т. 56. — №4. — С. 570.
7. Dolomatov M. Yu., 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). — P. 261-268.
8. Юдин Г.Л. Сила осциллятора // Физическая энциклопедия. — М.: Большая российская энциклопедия, 1994. — Т. 4. — С. 495.
9. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред: справочник. — Л.: Химия, 1984. — С. 69-98.
10. Бахвалов Н.С. Численные методы. — М.: Наука, 2000. — 630 с.
11. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. — М.: Физ.-мат. лит., 1998. — 528 с.

References

1. Kittel' Ch. Vvedenie v fiziku tverdogo tela. — М.: ООО «MediaStar», 2006. — 538 s.
2. Zinenko V.I., Sorokin B.P., Turchin P.P. Osnovy fiziki tverdogo tela. — М.: Izd. Fiz.-mat. lit., 2001. — 336 s.
3. Kresse G., Joubert D. The guide of VASP // Phys. Rev. — 59. — 1758 (1999). — URL: <https://cms.mpi.univie.ac.at/marsweb/index.php>.
4. Kon V. Elektronnoe stroenie veshchestva — volnovye funktsii i funktsionaly plotnosti // UFN. — 2002. — Т. 172. — №3. — S. 336-338.
5. Andrievskii B.V., Romanyuk N.N., Mishchishin O.Ya. i dr. Raschet zonnnoy struktury i opticheskikh svoistv kristallov GASG // Fizika tverdogo tela. — 2012. — Т. 54. — № 10. — S. 1940-1945.
6. Dolomatov M.Yu., Mukaeva G.R. Sposob opredeleniya potentsialov ionizatsii i srodstva k elektronu atomov i molekul metodom elektronnoi spektroskopii // Zhurnal prikladnoi spektroskopii. — 1992. — Т. 56. — №4. — S. 570.
7. Dolomatov M.Yu., 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). — P. 261-268.
8. Yudin G.L. Sila ostillyatora // Fizicheskaya entsiklopediya. — М.: Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya, 1994. — Т. 4. — S. 495.
9. Zolotarev V.M., Morozov V.N., Smirnova Ye.V. Opticheskie postoyannye prirodnykh i tekhnicheskikh sred: spravochnik. — L.: Khimiya, 1984. — S. 69-98.
10. Bakhvalov N.S. Chislennyye metody. — М.: Nauka, 2000. — 630 s.
11. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. Statisticheskii analiz dannykh na komp'yutere. — М.: Fiz.-mat. lit., 1998. — 528 s.

ОБ АВТОРАХ

Абдрахманов Вали Хызырович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: awali@inbox.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Абызбаев Ибрагим Измаилович

доктор технических наук, профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и нефтегазовых месторождений», Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: iktugaes@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Авдзейко Владимир Игоревич

кандидат технических наук, заместитель начальника научного управления, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», e-mail: scinews@main.tusur.ru, г. Томск, Российская Федерация

Айгузина Валентина Владимировна

студентка кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: vtiry@mail.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

Ахметов Ильнур Вазирович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информатика и ИКТ», Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: iktugaes@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Бажанова Татьяна Валерьевна

студент, Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: tattin76@mail.ru, г. Салават, Российская Федерация

Бекузин Владимир Игоревич

магистрант кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: tiobaldo1@gambler.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Вавилов Вячеслав Евгеньевич

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: s2_88@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Важдаев Константин Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», 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

Доломатов Михаил Юрьевич

кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Управление и сервис в технических системах», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: dolomatov@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Карабельская Ирина Владимировна

аспирант кафедры «Физика», доцент кафедры «Информатика и ИКТ», Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: iktugaes@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Карнышев Владимир Иванович

кандидат технических наук, начальник патентно-информационного отдела, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», e-mail: scinews@main.tusur.ru, г. Томск, Российская Федерация

Киселев Сергей Константинович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Измерительно-вычислительные комплексы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального

образования «Ульяновский государственный технический университет», e-mail: ksk@ulstu.ru,
г. Ульяновск, Российская Федерация

Козловский Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника»,
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Самарский
государственный технический университет», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, г. Самара, Российская Федерация

Кунаккужина Нурия Факиловна

аспирант кафедры «Геоинформационные системы», Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический
университет», e-mail: kunakkuzhinan@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

Латыпов Камил Фаридович

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

Левина Татьяна Михайловна

кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Общенаучные дисциплины», Филиал Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский
государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, e-mail: tattin76@mail.ru,
г. Салават, Российская Федерация

Мельничук Ольга Васильевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский
государственный авиационный технический университет», e-mail: fet777@mail.ru,
г. Уфа, Российская Федерация

Мещеряков Роман Валерьевич

доктор технических наук, профессор, директор Департамента по науке и инновациям, проректор по научной
работе и инновациям, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,
e-mail: scinews@main.tusur.ru, г. Томск, 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

Новикова Анна Петровна

ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»,
e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, г. Самара, Российская Федерация

Павлов Александр Сергеевич

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

Павлов Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор кафедры «Геоинформационные системы», Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский
государственный авиационный технический университет», e-mail: psvgis@mail.ru,
г. Уфа, Российская Федерация

Павлова Анна Сергеевна

аспирант кафедры «Системы управления и контроля химических производств», Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», e-mail: annapavlova90@mail.ru,
г. Москва, Российская Федерация

Петровский Сергей Валерьевич

ведущий инженер кафедры «Электрические станции», Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»,
e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, г. Самара, Российская Федерация

Решетняк Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности»,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», e-mail: reshetniak@inbox.ru,
г. Москва, Российская Федерация

Саенко Алексей Геннадиевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное
государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной
технический университет», e-mail: ac_1@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Сайдуганов Арслан Радионович

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

Салихов Ренат Баязитович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: salikhovrb@ya.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Тимофеев Александр Олегович

аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: aleck07@mail.ru, г. Уфа, 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

Фетисов Владимир Станиславович

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: fet777@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

Хакимов Дмитрий Валерьевич

аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет», e-mail: sense151015@mail.ru, г. Ульяновск, 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

Шапиро Семен Вольфович

доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: svshap@ufacom.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

Ясовеев Васих Хаматович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: yasov@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

ABOUT THE 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

Abyzbaev Ibrahim I.

dr. sci. tech., Professor of Development and Exploitation of Oil and Gas and Oil Fields Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: iktugaes@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Avdzejko Vladimir I.

cand. sci. tech., Deputy Head of Scientific Management, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics», e-mail: scinews@main.tusur.ru, Tomsk, Russian Federation

Aiguzina Valentina V.

Student of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: vtipy@mail.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

Akhmetov Ilnur V.

cand. sci. phys.-math., Assistant Professor of Informatics and ICT Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: iktugaes@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Bazhanova Tatiana V.

Student of Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: tattin76@mail.ru, Salavat, Russian Federation

Bekuzin Vladimir I.

Master of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: tiobaldo1@rambler.ru, Ufa, Russian Federation

Vavilov Vyacheslav Ye.

cand. sci. tech., Senior Lecturer of Electromechanics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: s2_88@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

Dolomatov Michail Yu.

cand. sci. tech., dr. sci. chem., Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Head of the Laboratory «Electronics and Nanotechnology», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: dolomatov@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Karabelskaya Irina V.

Post-Graduate Student of Physics Chair, Assistant Professor of Informatics and ICT Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: iktugaes@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Karnyshev Vladimir I.

cand. sci. tech., Head of Patent Information Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics», e-mail: scinews@main.tusur.ru, Tomsk, Russian Federation

Kiselev Sergey K.

dr. sci. tech., Professor, Head of Measuring Computer Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ulyanovsk State Technical University», e-mail: ksk@ulstu.ru, Ulyanovsk, Russian Federation

Kozlovskiy Vladimir N.

dr. sci. tech., Assistant Professor, Head of Theoretical and General Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Samara, Russian Federation

Kunakkuzhina Nuriya F.

Post-Graduate Student of Geoinformation Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: kunakkuzhinan@gmail.com, Ufa, Russian Federation

Latypov Kamil F.

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: latypovkf@rambler.ru, Ufa, Russian Federation

Levina Tatiana M.

cand. sci. tech., Head of General Scientific Disciplines Chair, Branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» in Salavat, e-mail: tattin76@mail.ru, Salavat, Russian Federation

Melnichuk Olga V.

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: fet777@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Meshcheryakov Roman V.

dr. sci. tech., Professor, Director of Science and Innovation Department, Vice-Rector for Research and Innovation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics», e-mail: scinews@main.tusur.ru, Tomsk, 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

Novikova Anna P.

Assistant of Theoretical and General Electrical Engineering Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Samara, Russian Federation

Pavlov Aleksandr S.

cand. sci. tech., Assistant Professor of Geoinformation Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: psvgis@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Pavlov Sergey V.

dr. sci. tech., Professor of Geoinformation Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: psvgis@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Pavlova Anna S.

Post-Graduate Student of Management and Control Systems of Chemical Production Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)»,
e-mail: annapavlova90@mail.ru, Moscow, Russian Federation

Petrovski Sergey V.

Leading Engineer of Electrical Station Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University», e-mail: kozlovskiy-76@mail.ru, Samara, Russian Federation

Reshetnyak Sergey N.

cand. sci. tech., Assistant Professor of Energy and Energy Efficiency of Mining Industry Chair, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National University of Science and Technology «MISI»», e-mail: reshetniak@inbox.ru, Moscow, Russian Federation

Saenko Aleksey G.

cand. sci. tech., 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: svshap@ufacom.ru, Ufa, Russian Federation

Sayduganov Arslan R.

Post-Graduate Student of Geoinformation Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: psvgis@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Salikhov Renat B.

dr. sci. tech., 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

Timofeev Aleksandr O.

Post-Graduate Student of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: aleck07@mail.ru, Ufa, 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

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

Fetisov Vladimir S.

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: fet777@mail.ru, Ufa, Russian Federation

Khakimov Dmitry V.

Post-Graduate Student of Measuring Computer Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ulyanovsk State Technical University», e-mail: sense151015@mail.ru, Ulyanovsk, 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

Shapiro Semen V.

dr. sci. tech., Professor of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: svshap@ufacom.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

Yasoveev Vasikh Kh.

dr. sci. tech., Professor, Head of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: yasov@mail.ru, Ufa, 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 работы, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

Памятка авторам

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц. Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.

Requirements for the materials, provided for publication in the journal:

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields – 2.5 cm on each side; font – Times New Roman, font size – 14, line spacing – one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC – in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website 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.