

ISSN 1999-5458

Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 2, т. 9, 2013

Electrical and data processing facilities and systems

№ 2, v. 9, 2013



Подписной индекс:
91824 в каталоге «Пресса России»
18064 в каталоге «Почта России»

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

УГУЭС

№ 2, т. 9, 2013

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

Учредитель

Министерство образования и науки РФ

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

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций» (решение президиума Высшей аттестационной комиссии от 2 марта 2012 года).

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

С.В. Шапиро – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 

Зам. главного редактора:

Ш.З. Валиев – канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 

Члены редакционной коллегии:

В.М. Артюшенко – д-р техн. наук, проф. Финансово-технологической академии (Россия, г. Москва) 

Б.М. Горшков – д-р техн. наук, проф. Поволжского государственного университета сервиса (Россия, г. Тольятти) 

М.Ю. Долomatов – д-р хим. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 

В.Г. Крымский – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного университета 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. Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, г. Уфа) 

Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф.

Уфимского государственного университета 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. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 

М.А. Ураксеев – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, г. Уфа) 

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

Московского государственного университета дизайна и технологии (Россия, г. Москва) 

Ф.Ф. Хизбуллин – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 

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

В.А. Шабанов – канд. техн. наук, проф. Уфимского государственного нефтяного технического университета (Россия, г. Уфа) 

Р.Б. Яруллин – д-р техн. наук, проф. Уфимского государственного университета экономики и сервиса (Россия, г. Уфа) 

Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.С. Некрасова

Подписка во всех отделениях связи: индекс 18064 в объединенном каталоге «Почта России», 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 № ФС77-51448 от 19.10.2012 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2013

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

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 26.06.2013 г. Формат 60×80 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,5. Тираж 1000 экз. Заказ № 73.

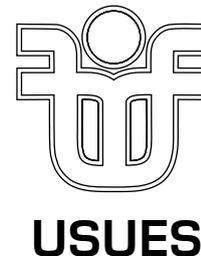
Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы», допускается только с письменного разрешения редакции.

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. 9, 2013

The magazine was founded in 2005. Comes out 4 times a year.

Founder:

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

The magazine is included in "The list of reviewed scientific magazines and editions for publication of the main scientific results of theses" (decision of the Highest certification commission presidium from 2 March, 2012).
International standard serial number ISSN 1999-5458.

Editorial board:

Editor-in-chief:

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

Deputy editor-in-chief:

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

Members of an editorial board:

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

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

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

V.G. Krymsky – Dr.Sci.Tech., prof. of 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 Ufa state aviation technical university (Russia, Ufa) 

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

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

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

F.F. Hizbullin – Dr.Sci.Tech., prof. of 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 Ufa state petroleum technological university (Russia, Ufa) 

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

Assistant editor: A.A. Mukhamadiev

Technical editor: S.S. Nekrasova

Subscription is available in all post offices: Postal code 18064 in the integrated catalog of the "Russian Post",
Postal code 91824 in the integrated catalog of the "Russian Press".

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

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

Mass media registration certificate PI № PHS 77-51448 from 19.10.2012 given by Federal service of supervision in the scope of communication, information technologies and mass media.

© Ufa state university of economics and service, 2013
Edition address: 450078, Ufa, Chernishevskogo St., 145.
Ph.: +7 (347) 228-91-38.

Signed for printing 2013.06.26. Format 60×80 1/8. Offset printing. 16,5 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order №. 73.
Reprinting of information published in the magazine "Electrical and data processing facilities and systems", is allowed only with the written permission of editorial staff.
Information is published in author's edition.
Editorial staff's point of view not always common with authors of published articles.

СОДЕРЖАНИЕ

Электротехнические комплексы и системы

<i>Гизатуллин Ф.А., Салихов Р.М., Чигвинцев В.А., Лобанов А.В.</i> Комбинированный измеритель пробивных напряжений плазменных свечей зажигания газотурбинных двигателей.....	5
<i>Кабашов В.Ю.</i> Исследование условий возможного схлестывания проводов сельских ВЛ 6-10 кВ.....	9
<i>Рогинская Л.Э., Исмагилов Р.Р., Рахманова Ю.В.</i> Согласование выходных параметров инвертора для индукционного нагрева с параметрами нагрузки с помощью ферромагнитного умножителя частоты.....	12
<i>Рогинская Л.Э., Ялалова З.И.</i> Определение электромагнитной мощности фазообразующих трансформаторов преобразовательных установок.....	18
<i>Ураксеев М.А., Левина Т.М.</i> Оптоволоконные трансформаторы как элементы современных электротехнических комплексов и систем.....	23
<i>Хайруллин И.Х., Гиниятуллин Д.М., Пашали Д.Ю.</i> Исследование пространственного распределения магнитного поля в слоистой структуре для применения в теории дефектоскопии.....	29
<i>Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарипова С.Ф.</i> Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения расхода электроэнергии.....	34
<i>Яруллин Р.Б., Линенко А.В.</i> К вопросу динамической характеристики асинхронного двигателя.....	42

Информационные комплексы и системы

<i>Абдрахимов Ю.Р., Федосов А.В., Алексеева И.Э.</i> Проведение профессионального отбора персонала с помощью современных информационных систем.....	47
<i>Ильясов И.Р., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А.</i> Акустооптические измерительные преобразователи для информационно-измерительных систем анализа водной среды.....	50
<i>Киргизов Д.И., Иванов А.А., Шерстюков О.Н.</i> Аппаратное и программное обеспечение беспроводной системы телеметрии для геолого-технологических исследований.....	55
<i>Киргизов Д.И., Садыков А.Р.</i> Информационная система для приема и регистрации информации, передаваемой по каротажным кабелям с приборов, контролирующих нефтяные скважины.....	61
<i>Крымский В.Г., Жалбеков И.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р.</i> Автоматизация управления технологическими процессами в газораспределительных сетях: проблемы, тенденции и перспективы.....	70
<i>Кушнир В.Г.</i> Программа для моделирования притока воды в малобитные водоисточники.....	79
<i>Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г.</i> Алгоритм работы акустооптического измерительного преобразователя температуры.....	84
<i>Павлов С.В., Ефремова О.А., Павлов А.С.</i> Информационно-вычислительная система для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными.....	88
<i>Султанов А.Х., Черных В.В., Мешков И.К., Мешкова А.Г., Ишимьяров А.А.</i> Методика определения оптимального коэффициента скругления спектра в беспроводных цифровых системах связи для устранения межсимвольной интерференции.....	96
<i>Розалиев В.Л., Орлова Ю.А., Штирко А.А., Дорофеев Н.С.</i> Автоматизация построения векторной модели тела человека.....	102

Нанoeлектроника и квантовые информационные системы

<i>Денисова О.А.</i> Один из методов экспериментальных исследований жидких кристаллов.....	107
<i>Доломатов М.Ю., Паймурзина Н.Х.</i> Специфические квантовые эффекты электронной корреляции в органических полупроводниках.....	114
<i>Доломатов М.Ю., Шуляковская Д.О., Паймурзина Н.Х., Шуткова С.А.</i> Оценка электронной структуры углеводородных электропроводящих материалов методом ЭФС.....	121
Об авторах	130

CONTENT

Electrical facilities and systems

<i>Gizatullin F.A., Salikhov R.M., Chigvintsev V.A., Lobanov A.V.</i> Combined measuring breakdown voltage plasma plug gas turbine engines.....	5
<i>Kabashov V.Yu.</i> Research of conditions of possible electric cross wires of village air-lines 6-10 kV.....	9
<i>Roginskaya L.E., Ismagilov R.R., Rakhmanova Yu.V.</i> Coordination of output parameters of the inverter for induction heating with loading parameters by means of the ferromagnetic frequency multiplier	12
<i>Roginskaya L.E., Yalalova Z.I.</i> The definition of electromagnetic power of the phase–reformative transformers of the transforming plants.....	18
<i>Urakseev M.A., Levina T.M.</i> Fiber optic components transformers as modern electrical and complex systems	23
<i>Khairullin I.Kh., Giniyatullin D.M., Pashali D.Yu.</i> Investigation of the magnetic field spatial distribution in layered structures for the defectoscopy theory	29
<i>Shabanov V.A., Khakimov E.F., Sharipova S.F.</i> Efficiency evaluation algorithm of frequency-controlled electric drive main pumps of oil pipelines operated by the criterion reducing of energy consumption	34
<i>Yarullin R.B., Linenko A.V.</i> To the question of the asynchronous motors dynamic characteristic.....	42

Data processing facilities and systems

<i>Abdrahimov Yu.R., Fedosov A.V., Alekseeva I.E.</i> Carrying out professional staff selection by means of modern information systems	47
<i>Ilyasov I.R., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A.</i> Acousto-optic measuring converters for information-measuring systems of the analysis of the water environment.....	50
<i>Kirgizov D.I., Ivanov A.A., Sherstyukov O.N.</i> Hardware and software for wireless mud logging telemetry system	55
<i>Kirgizov D.I., Sadikov A.R.</i> Informational system for data recording that is transmitted from the borehole tools through the logging cable, monitoring the oil wells.....	61
<i>Krymsky V.G., Zhalbekov I.M., Imilbaev R.R., Yunusov A.R.</i> Automation of technological process control in gas distribution networks: challenges, trends and perspectives.....	70
<i>Kushnir V.G.</i> Program for modeling the flow of water to the sources with low-level of flow rate.....	79
<i>Mukhamadiev A.A., Farrakhov R.G.</i> Algorithm of operation of the acousto-optic measuring converter of temperature.....	84
<i>Pavlov S.V., Efremova O.A., Pavlov A.S.</i> Information-computer system for providing regional executive agencies with spatial data.....	88
<i>Sultanov A.Kh., Chernykh V.V., Meshkov I.K., Meshkova A.G., Ishmiyarov A.A.</i> The optimal spectrum rounding index determination methods for wireless digital communication systems to eliminate the intersymbol interference	96
<i>Rozaliev V.L., Orlova Y.A., Shpirko A.A., Dorofeev N.S.</i> Automation of constructing human’s body vector model.....	102

Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Denisova O.A.</i> One of the methods of experimental research liquid crystals	107
<i>Dolomatov M.Yu., Paymurzina N.Kh.</i> Specific quantum effects of electronic correlation in organic semiconductors	114
<i>Dolomatov M.Yu., Shulyakovskaya D.O., Paymurzina N.Kh., Shutkova S.A.</i> Electron structure estimation of the hydrocarbon electroconductive materials according to EPS method	121
About the authors	132

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS



Гизатуллин Ф.А.
Gizatullin F.A.

доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа



Салихов Р.М.
Salikhov R.M.

старший преподаватель, старший научный сотрудник кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного технического университета, Россия, г. Уфа



Чигвинцев В.А.
Chigvintsev V.A.

технический директор – первый заместитель генерального директора ОАО «Уфимское агрегатное производственное объединение», Россия, г. Уфа



Лобанов А.В.
Lobanov A.V.

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа

УДК 621.43.044; 621.317.08

КОМБИНИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПЛАЗМЕННЫХ СВЕЧЕЙ ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Анализируются возможные схемы измерителей динамических и статических пробивных напряжений плазменных свечей. Представлены результаты разработки цифрового измерителя динамических пробивных напряжений и комбинированного измерителя динамических и статических пробивных напряжений. Приведены результаты испытаний комбинированного измерителя в условиях, имитирующих высотный запуск авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

Ключевые слова: динамическое и статическое пробивные напряжения плазменных свечей.

COMBINED MEASURING BREAKDOWN VOLTAGE PLASMA PLUG GAS TURBINE ENGINES

Possible schemes meters of dynamic and static breakdown voltage of the plasma plug. The results of development of digital measuring the dynamic breakdown voltage meter and a combined dynamic and static breakdown voltage. Results of tests of the combined meter in conditions simulating high-altitude start gas turbine engines.

Key words: dynamic and static breakdown voltage of the plasma plug.

Задачи контроля эффективности систем зажигания возникают на различных этапах жизненного цикла, включая разработку, производство и эксплуатацию. Контроль эффективности предполагает, в том числе, оценку общей работоспособности

систем зажигания и оценку фактических значений основных параметров, главными из которых для плазменных систем зажигания являются динамическое и статическое пробивные напряжения свечи, ток дугового разряда и падение напряжения

в разряде. Под динамическим пробивным напряжением плазменной свечи понимается импульсное напряжение пробоя свечи под действием высоковольтного импульса осциллятора, предназначенного для ионизации дугового промежутка перед образованием низковольтного дугового разряда [1].

Задачи контроля пробивных напряжений свечей важны, в том числе, при оценке устойчивости электродуговых процессов в условиях возможных высотных запусков ГТД на режимах авторотации двигателя и на режимах встречного запуска, для которых характерны, соответственно, пониженное и повышенное давление в камерах сгорания [2].

Применительно к плазменным системам зажигания переменного тока, помимо статического пробивного напряжения и импульсного динамического напряжения пробоя под действием осциллятора, важными параметрами являются динамические напряжения зажигания и гашения дуги, соответствующие моментам прохождения разрядного тока через ноль. Динамические напряжения зажигания и гашения дуги в течение каждого полупериода изме-

нения разрядного тока могут фиксироваться осциллографическим методом с использованием делителя напряжения, подключенного к плазменной свече. Соответственно, переменный ток дуги также легко регистрируется осциллографическим методом с использованием датчика – измерительного трансформатора тока.

Известно, что напряжение пробоя газового промежутка под действием короткого импульса напряжения превышает статическое пробивное напряжение. Это связано с тем, что для электрического пробоя под действием импульса необходим не только определенный уровень напряжения, но и время для формирования канала разряда; если время действия приложенного импульса меньше времени запаздывания разряда, то пробоя не происходит, несмотря на то, что уровень напряжения превышает статическое пробивное напряжение.

Для регистрации статических пробивных напряжений плазменной свечи возможно использование известной схемы измерений, структура которой показана на рис. 1 [3].

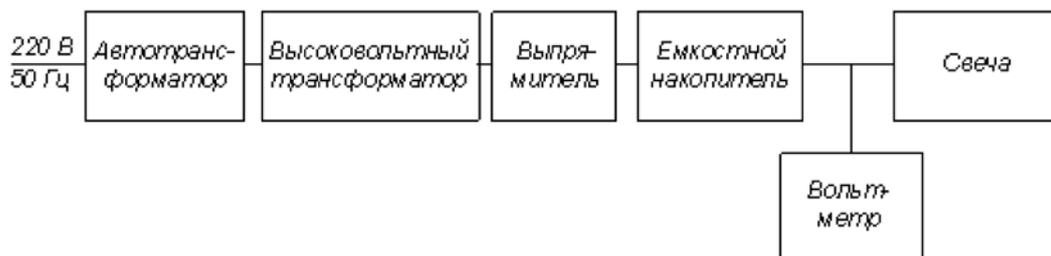


Рис. 1. Структурная схема статического измерителя пробивных напряжений

Автотрансформаторное регулирование позволяет плавно изменять напряжение заряда емкостного накопителя до напряжения пробоя свечи, которое фиксируется с помощью вольтметра.

Регистрация динамических пробивных напряжений под действием импульсных напряжений осциллятора возможна разными способами. Один из возможных вариантов заключается в использовании схемы, структура которой отличается от приведенной на рис. 1 тем, что между емкостным накопителем и свечой устанавливается коммутирующий элемент – разрядник, который принудительно пробивается от источника высокого напряжения. В этой схеме емкостной накопитель заряжается до напряжения, близкого к предполагаемому пробивному напряжению. После этого разрядник принудительно пробивается от отдельного источника высокого напряжения. После пробоя разрядника к свече прикладывается напряжение от емкостного на-

копителя с крутым фронтом нарастания. Если этого напряжения достаточно, происходит пробой свечи. На следующем этапе напряжение заряда накопителя уменьшается и осуществляется следующий принудительный пробой разрядника. Таким образом, определяется минимальное напряжение на накопителе, при котором возможен пробой свечи. Это минимальное напряжение принимается равным пробивному напряжению свечи. Если же при очередном принудительном пробое разрядника свеча не пробивается, напряжение заряда накопителя необходимо увеличить.

Этот способ измерения пробивных напряжений достаточно трудоемок, но является более точным по сравнению со способом, существо которого заключается в следующем.

Емкостной накопитель заряжается от регулируемого источника высокого напряжения до напряжения пробоя разрядника, которое заведомо

выше пробивных напряжений плазменных свечей при всех возможных давлениях и величинах междуэлектродных зазоров. После пробоя разрядника напряжение, прикладываемое к свече, резко нарастает и в момент пробоя фиксируется измерителем амплитудных напряжений. Описанный метод обладает значительной погрешностью, обусловленной особенностями пробоя разрядных промежут-

ков импульсным напряжением; это обстоятельство усугубляется инерционностью измерителя амплитудных напряжений.

Высокой точностью измерений обладает цифровой метод регистрации пробивных напряжений, который может быть реализован по схеме, показанной на рис. 2 [4].

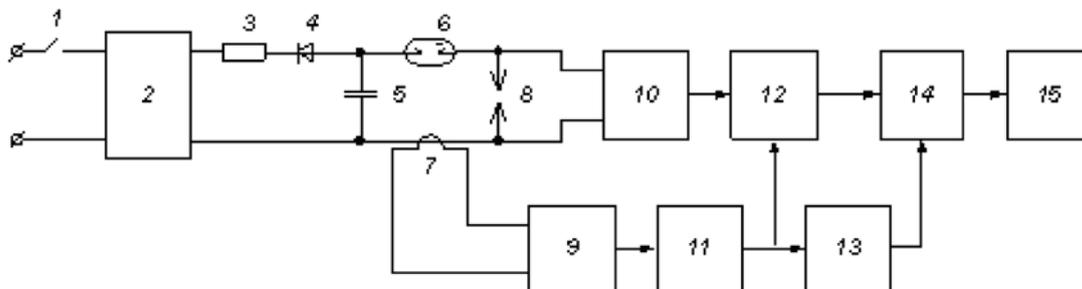


Рис. 2. Структурная схема цифрового измерителя пробивных напряжений

Измеритель работает следующим образом. При замыкании ключа 1 высокое напряжение, выдаваемое преобразователем 2, через резистор 3 и диод 4 заряжает накопительный конденсатор 5 до пробивного напряжения разрядника 6. После пробоя разрядника высокое напряжение прикладывается к свече 8. Напряжение на свече с высокой скоростью нарастает до пробивного. Это напряжение отслеживается устройством выборки-хранения 12 через делитель 10. В момент пробоя свечи ток в цепи резко нарастает. Момент пробоя свечи отслеживается дискриминатором уровня 9, который сравнивает сигнал с датчика тока 7 с уровнем дискриминации. На выходе дискриминатора

уровня формируется цифровой сигнал, который фронтом запускает первый одновибратор 11. Сигнал с первого одновибратора переводит устройство выборки-хранения в режим хранения и запускает второй одновибратор 13. Импульс с выхода второго одновибратора переводит АЦП 14 в режим измерения. Информация об измеренном значении пробивного напряжения передается в блок цифровой индикации 15.

Принципиальная схема другого разработанного измерителя для регистрации динамических и статических пробивных напряжений плазменных свечей показана на рис. 3.

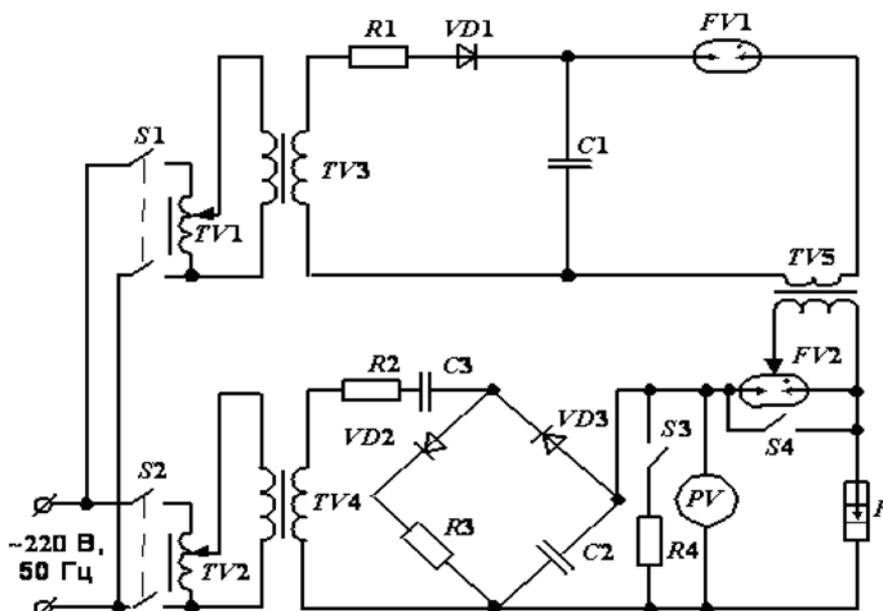


Рис. 3. Принципиальная схема комбинированного измерителя пробивных напряжений плазменных свечей

Принципиальная схема комбинированного измерителя состоит из двух частей: цепи заряда-разряда конденсатора и цепи коммутации трех-электродного разрядника в цепи свечи.

Первая часть схемы включает автотрансформатор TV2, повышающий трансформатор TV4, удвоитель напряжения (R2, C3, VD2, R3, C2, VD3), киловольтметр PV, управляемый разрядник FV2, свечу F.

Вторая часть схемы состоит из автотрансформатора TV1, повышающего трансформатора TV3, элементов R1, VD1, C1, разрядника FV1, импульсного трансформатора TV5.

При измерении динамического пробивного напряжения плазменной свечи емкостный накопитель C2 заряжается до напряжения, близкого к предполагаемому пробивному напряжению. После этого разрядник FV2 принудительно пробивается при разряде конденсатора C1 через разрядник FV1 на первичную обмотку импульсного трансформатора TV5. Если напряжение на емкости C2 достаточно, происходит пробой свечи. На следующем этапе напряжение заряда накопителя C2 уменьшается и осуществляется следующий принудительный пробой разрядника FV2. Таким образом, определяется минимальное напряжение на конденсаторе C2, при котором возможен пробой све-

чи. Это минимальное напряжение принимается равным пробивному напряжению свечи. Если же при очередном принудительном пробое разрядника FV2 свеча не пробивается, напряжение заряда накопителя C2 необходимо увеличить.

При измерении статического пробивного напряжения плазменной свечи схема принудительного пробоя разрядника FV2 не участвует в работе. Для измерения статического пробивного напряжения необходимо зашунтировать разрядник FV2 и плавно увеличивать напряжение заряда конденсатора C2 до пробоя свечи.

Комбинированный измеритель динамических и статических пробивных напряжений плазменных свечей по схеме на рис. 3 изготовлен и испытан в составе специального экспериментального стенда по исследованию устойчивости электродуговых процессов в серийных плазменных свечах в условиях, имитирующих различные режимы запуска авиационных газотурбинных двигателей.

В таблице приведены измеренные значения динамических и статических пробивных напряжений серийной свечи при различных давлениях, соответствующих режиму высотного встречного запуска ГТД. Подтверждено, что динамические пробивные напряжения выше статических и в качественном плане соответствуют закону Пашена.

Таблица

Измеренные значения динамических и статических пробивных напряжений серийной свечи при различных давлениях

	P = 1,01×10⁵ Па	P = 2,02×10⁵ Па	P = 3,75×10⁵ Па
Динамическое пробивное напряжение	4,3 кВ	5,45 кВ	9,3 кВ
Статическое пробивное напряжение	4,1 кВ	5,3 кВ	9,1 кВ

Разработанный комбинированный измеритель предполагается использовать при стендовых испытаниях эффективности плазменных систем зажигания различных типов.

Список литературы

1. Романовский Г.Ф. Плазменные системы газоперекачивающих агрегатов [Текст] / Г.Ф. Романовский, И.Б. Матвеев, С.И. Сербин. – СПб.: Недра, 1992. – 142 с.

2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А. Лефевр – М.: Мир, 1986. – 566 с.

3. Схема измерения электрических параметров [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.avkenargo.ru/avktech/techop/element15068.php> (дата обращения 25.10.2012).

4. А.с. № 1804211СССР. Измеритель пробивного напряжения разрядных устройств [Текст] / Ф.А. Гизатуллин, И.А. Великжанин, Р.Р. Валитов. – опубл. 1992, Бюл. № 3.



Кабашов В.Ю.

Kabashov V.Yu.

доктор технических наук, доцент
Башкирского государственного
аграрного университета,
Россия, г. Уфа

УДК 621.315.1

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗМОЖНОГО СХЛЕСТЫВАНИЯ ПРОВОДОВ СЕЛЬСКИХ ВЛ 6-10 кВ

На основе проведенных исследований получены формулы для определения координат и зоны возможного схлестывания проводов по длине пролета сельских ВЛ 6-10 кВ под действием ветра при разных стрелах провеса. Результаты могут быть использованы при выборе расстояний между проводами и определении мест установки в пролете изолирующих междуфазовых распорок.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, пролет, стрела провеса провода, ветер, схлестывание проводов.

RESEARCH OF CONDITIONS OF POSSIBLE ELECTRIC CROSS WIRES OF VILLAGE AIR-LINES 6-10 KV

On the basis of the conducted research the formulas for determination of the coordinates and zone of possible electric cross wires in length span of village air-lines 6-10 kV under the action of the wind at different arrows slack. The results can be used when you select the distance the wires and the determination of the place of installation in the span isolating phase-to-phase spacers.

Key words: air-line of an electricity transmission, span, arrows slack wire, wind, electric cross wires.

В процессе эксплуатации сельских ВЛ 6-10 кВ раскачивания проводов под действием порывистого ветра вызывают при определенных условиях их взаимные сближения на опасные в изоляционном отношении расстояния и схлестывания. При этом токи короткого замыкания ведут к перегосу и обрыву проводов в пролетах воздушных линий электропередачи, что приводит к аварийным отключениям и нарушению электроснабжения сельских потребителей. В Башкирской энергосистеме аварийные отключения ВЛ 6-10 кВ из-за обрывов и схлестываний проводов составляют более 40% [1].

Многочисленные наблюдения на действующих ВЛ 6-10 кВ показали, что несинхронные колебания проводов, вызывающие их опасные сближения и схлестывания, часто наблюдаются в пролетах с разными стрелами провеса. Для линий этого класса напряжений, имеющих в отличие от ВЛ 35 кВ и выше короткие пролеты и малые стрелы провеса проводов, даже небольшая разница в длинах фазных проводов, возникающая из-за ослабле-

ния или разрушения проволочной вязки, ведет к значительной относительной разрегулировке их стрел провеса [2].

Проведенные исследования [3] показали, что возникающая при эксплуатации ВЛ 6-10 кВ относительная разрегулировка стрел провеса фазных проводов (коэффициент разрегулировки) от 0,2 до 0,6 вызывает изменение частоты маятниковых колебаний на 9...21% и логарифмического декремента внутреннего трения – на 7,8...23,4%, что существенно усиливает несинхронность раскачиваний проводов при ветре и способствует их схлестыванию.

Задача снижения аварийных отключений ВЛ 10 кВ от схлестываний проводов при их несинхронных перемещениях под действием ветра требует проведения исследований по определению условий (координат и зоны) возможного схлестывания проводов по длине пролета с учетом возникающей на практике разрегулировки стрел провеса фазных проводов. Решение этой задачи позво-

лит выявить опасные по длине пролета участки проводов, требующие защиты от возможных схлестываний.

Рассмотрим несинхронные маятниковые раскачивания двух горизонтально расположенных проводов относительно осей, соединяющих точки их подвеса в системе координат $xOyz$ (рис. 1). Выберем направление оси x вдоль прямой, соединяющей точки подвеса провода, оси y – вертикально

вниз, оси z – перпендикулярно плоскости провисания провода при отсутствии ветрового потока. Допустим, что каждый колеблющийся провод является плоской кривой (параболой), расположенной во вращающейся вместе с проводом плоскости, проходящей через точки подвеса. Пусть провода электропередачи расположены друг от друга на расстоянии a и имеют, в общем случае, разные стрелы провеса f_1 и f_2 .

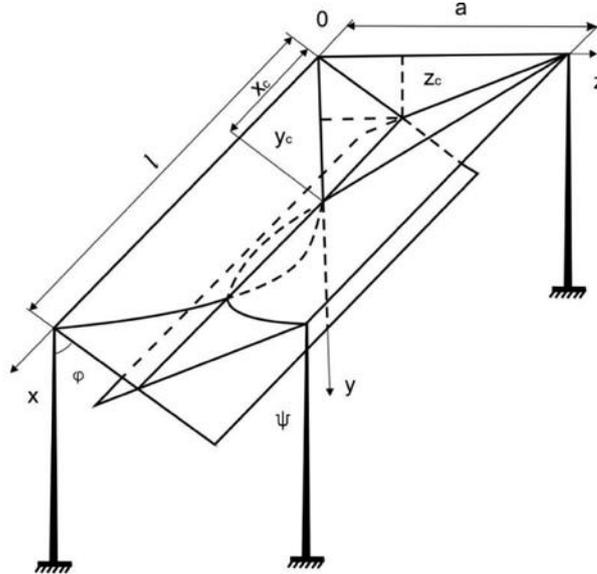


Рис. 1. Схема расположения проводов в пролете ВЛ при их схлестывании

Каждый участок провода электропередачи по длине пролета будет совершать колебания по дуге окружности радиуса y_l [4]:

$$y_l = \frac{4 \cdot f \cdot x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (1)$$

где l – длина пролета; x – текущая координата вдоль пролета.

При схлестывании (касании) проводов, согласно рис. 1, $\frac{4 \cdot f_1 \cdot x_c}{l} \left(1 - \frac{x_c}{l}\right) \cdot \cos \varphi = \frac{4 \cdot f_2 \cdot x_c}{l} \left(1 - \frac{x_c}{l}\right) \cdot \cos \psi$,

$$\frac{4 \cdot f_1 \cdot x_c}{l} \left(1 - \frac{x_c}{l}\right) \cdot \sin \varphi - \frac{4 \cdot f_2 \cdot x_c}{l} \left(1 - \frac{x_c}{l}\right) \cdot \sin \left[-\arccos \left(\frac{f_1}{f_2} \cdot \cos \varphi\right)\right] = a. \quad (3)$$

После соответствующих преобразований уравнение (3) принимает следующий вид:

$$x_c^2 - l \cdot x_c + \frac{a \cdot l^2}{4 \cdot \left(f_1 \cdot \sin \varphi + \sqrt{f_2^2 - f_1^2 + f_1^2 \cdot \sin^2 \varphi}\right)} = 0. \quad (4)$$

Решением уравнения (4) являются координаты x_{c1} и x_{c2} точек касания проводов:

$$x_{c1,2} = \frac{l}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{a}{f_1 \cdot \sin \varphi + \sqrt{f_2^2 - f_1^2 + f_1^2 \cdot \sin^2 \varphi}}}\right). \quad (5)$$

откуда получим следующее соотношение:

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \psi} = \frac{f_2}{f_1}. \quad (2)$$

Будем считать угол отклонения провода электропередачи от положения равновесия против часовой стрелки положительным, по часовой стрелке – отрицательным. Выразив угол ψ через угол φ , получим уравнение

Зону возможного схлестывания проводов по длине пролета определим как разность координат x_{c1} и x_{c2} , т. е. $l_c = x_{c1} - x_{c2}$.

Из выражения (5) следует, что схлестывание проводов возможно при условии:

$$a \leq f_1 \cdot \sin \varphi + \sqrt{f_2^2 - f_1^2 + f_1^2 \cdot \sin^2 \varphi},$$

которое после соответствующих преобразований представим в следующем виде:

$$1 \geq \sin \varphi \geq \frac{a^2 - f_2^2 + f_1^2}{2 \cdot a \cdot f_1}. \quad (6)$$

Из выражения (6) определяется минимальное значение угла φ_{min} , при котором возможно схлестывание проводов.

В качестве примера были рассчитаны координаты $x_{cl,2}$ при различных значениях угла φ для следующих параметров пролета:

$$a = 1,2 \text{ м}, l = 50 \text{ м}, f_1 = 0,7 \text{ м} \text{ (рис. 2)}.$$

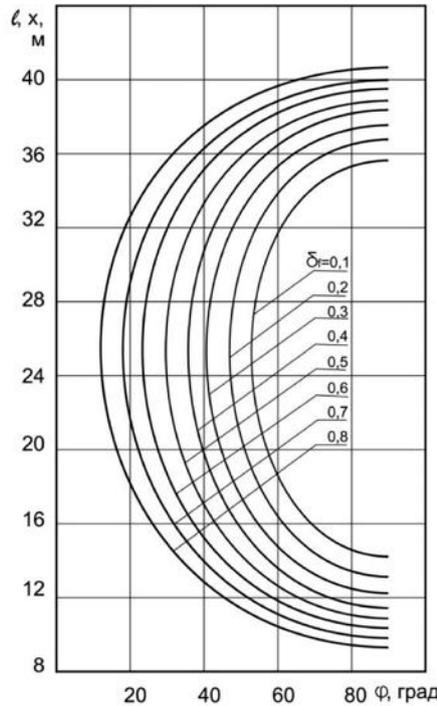


Рис. 2. Зависимость координат $x_{cl,2}$ и зоны схлестывания проводов от углов отклонения φ при разных величинах относительной разрегулировки их стрел провеса

Семейство кривых, изображенное на рис. 2, построено при различных коэффициентах разрегулировки стрел провеса проводов $\delta_f \left(\delta_f = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \right)$ [2]. Из рисунка 2 видно, что при минимальном угле отклонения φ_{min} касание проводов происходит в середине пролета, а при больших углах – в двух точках провода, симметрично расположенных относительно его середины. С увеличением угла отклонения φ координаты схлестывания проводов $x_{cl,2}$ перемещаются вдоль пролета от середины к местам крепления проводов. При одном и том же значении угла φ координаты $x_{cl,2}$ располагаются тем ближе к местам крепления проводов, чем больше коэффициент разрегулировки их стрел провеса δ_f . Так, к примеру, при $\delta_f = 0,1$ $x_{cl} = 35,7$ м, $x_{c2} = 14,3$ м, а при $\delta_f = 0,6$ $x_{cl} = 39,6$ м, $x_{c1} = 10,4$ м. Следует также отметить, что с увеличением коэффициента разрегулировки уменьшается угол φ_{min} , а следовательно, возрастает вероятность схлестывания проводов, что совпадает с выводами, сделанными в работе [5].

Координаты y_c и z_c точек касания проводов при их маятниковых раскачивания определяются из со-

вместного решения системы уравнений:

$$\begin{cases} z^2 + y^2 = \left[\frac{4 \cdot f_1 \cdot x_c}{l} \left(1 - \frac{x_c}{l} \right) \right]^2 & (7) \\ (z - a)^2 + y^2 = \left[\frac{4 \cdot f_2 \cdot x_c}{l} \left(1 - \frac{x_c}{l} \right) \right]^2 & (8) \end{cases}$$

Вычитая уравнение (8) из уравнения (7), получим значение координаты z_c точек касания проводов как функции x_c

$$F_1(x_c) = z_c = \frac{f_1^2 - f_2^2}{2 \cdot a} \left[\frac{4 \cdot x_c}{l} \left(1 - \frac{x_c}{l} \right) \right]^2 + \frac{a}{2}. \quad (9)$$

Подставляя выражение (9) в уравнение (7) и решая полученное уравнение относительно y , получим

$$F_2(x_c) = y_c = \sqrt{\frac{-(f_1^2 - f_2^2)^2}{4 \cdot a^2} \cdot \eta^4 + \frac{f_1^2 + f_2^2}{2} \cdot \eta^2 - \frac{a^2}{4}}, \quad (10)$$

$$\text{где } \eta = \frac{4 \cdot x_c}{l} \left(1 - \frac{x_c}{l} \right).$$

Проведенные исследования позволяют по полученным формулам определить координаты то-

чек касания проводов по длине пролета с учетом возникающей при эксплуатации разрегулировки их стрел провеса, зону возможного схлестывания и исключить аварийные отключения ВЛ 6-10 кВ при воздействии ветра путем установки в этих зонах разработанных междуфазовых демпфирующих распорок [6].

Список литературы

1. *Кабашов В.Ю.* Повреждаемость проводов сельских ВЛ 6-10 кВ [Текст] / В.Ю. Кабашов // Интеграция аграрной науки и производства: состояние, проблемы и пути решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции, 4–6 марта 2008 г. / Башкирский ГАУ. – Уфа, 2008. – Ч. 4. – С. 276–278.

2. *Кабашов В.Ю.* Влияние разрегулировки стрел провеса проводов малых сечений на их повреждаемость [Текст] / В.Ю. Кабашов // Электрификация сельского хозяйства: межвуз. науч. сб. – Уфа: БашГАУ, 2005. – Вып. 4. – С. 22–25.

3. *Кабашов В.Ю.* Экспериментальная оценка сближений проводов ВЛ 6-10 кВ при воздействии ветра [Текст] / В.Ю. Кабашов // Повышение эффективности и устойчивости развития агропромышленного комплекса: материалы Всерос. науч.-практ. конф.: в 4-х ч. – Уфа: БашГАУ, 2005. – Ч. 2. – С. 94–96.

4. *Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства.* [Текст] – М.: ВГПИ и НИИ «Сельэнергопроект», 1977. – Июнь–июль. – 200 с.

5. *Усманов Ф.Х.* О схлестывании проводов сельских линий 6-10 кВ [Текст] / Ф.Х. Усманов, В.Ю. Кабашов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981. – № 6. – С. 31–32.

6. *Кабашов В.Ю.* Защита сельских ВЛ 6-10 кВ от схлестывания проводов при воздействии ветра и гололеда [Текст] / В.Ю. Кабашов, Ю.Ж. Байрамулов // Механизация и электрификация сельского хозяйства [Текст]. – 2009. – № 8. – С. 16–17.



Рогинская Л.Э.
Roginskaya L.E.

доктор технических наук,
профессор кафедры
«Электромеханика»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета, Россия, г. Уфа



Исмагилов Р.Р.
Ismagilov R.R.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электромеханика» Уфимского
государственного авиационного
технического университета,
Россия, г. Уфа



Рахманова Ю.В.
Rakhmanova Yu.V.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электромеханика» Уфимского
государственного авиационного
технического университета,
Россия, г. Уфа

УДК 621.365.5

СОГЛАСОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНВЕРТОРА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С ПАРАМЕТРАМИ НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ ФЕРРОМАГНИТНОГО УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Рассмотрен электротехнологический комплекс для индукционного нагрева металлов. Предлагается для расширения частотного диапазона электротехнического комплекса к выходным клеммам преобразователя частоты подключить ферромагнитный умножитель частоты. Приводятся имитационные модели: ферромагнитный удвоитель частоты и модель мостового симметричного резонансного инвертора совместно с моделью ферромагнитного удвоителя частоты, выполненные в математическом пакете Matlab

при помощи расширения Simulink Simpowersystem. Доказана возможность совместной работы инвертора и ферромагнитного умножителя частоты.

Ключевые слова: преобразователь частоты, ферромагнитный умножитель частоты, индукционный нагрев, имитационные модели.

COORDINATION OF OUTPUT PARAMETERS OF THE INVERTER FOR INDUCTION HEATING WITH LOADING PARAMETERS BY MEANS OF THE FERROMAGNETIC FREQUENCY MULTIPLIER

The electrotechnological complex for induction heating of metals is considered. It is offered for expansion of frequency range of an electrotechnical complex to connect a ferromagnetic frequency multiplier to output plugs of the converter of frequency. It is brought imitating models: ferromagnetic doubler of frequency and model of the bridge symmetric resonant inverter together with model of a ferromagnetic doubler the frequencies executed in a mathematical Matlab package by means of the Simulink Simpowersystem expansion. Possibility of collaboration of the inverter and ferromagnetic frequency multiplier is proved.

Key words: the frequency converter, the ferromagnetic frequency multiplier, induction heating, the simulation models.

Одной из наиболее распространенных областей электротехнологии является индукционный нагрев металлов.

Широкое распространение индукционный нагрев получил благодаря следующим своим преимуществам:

- быстрота нагрева. Точная локализация энергии при нагреве, которая обеспечивает высокую производительность производства;

- нагрев только внутри материала за счет индуктированного тока, обтекающего его по поверхности. При этом сердцевина детали нагревается за счет теплопроводности;

- высокое качество нагрева. Оборудование,

применяемое при индукционном нагреве, позволяет автоматизировать процесс;

- пониженные затраты электроэнергии. Установки для индукционного нагрева, преимущественно, имеют высокий КПД, позволяющий ставить данный вид нагрева в ряд с одними из самых дешевых;

- экологичность. При использовании данного вида нагрева не происходит вредных выделений в окружающую среду, а также дыма и различных смол.

Установки для индукционного нагрева повышенной частоты имеют структурную схему, представленную на рисунке 1.

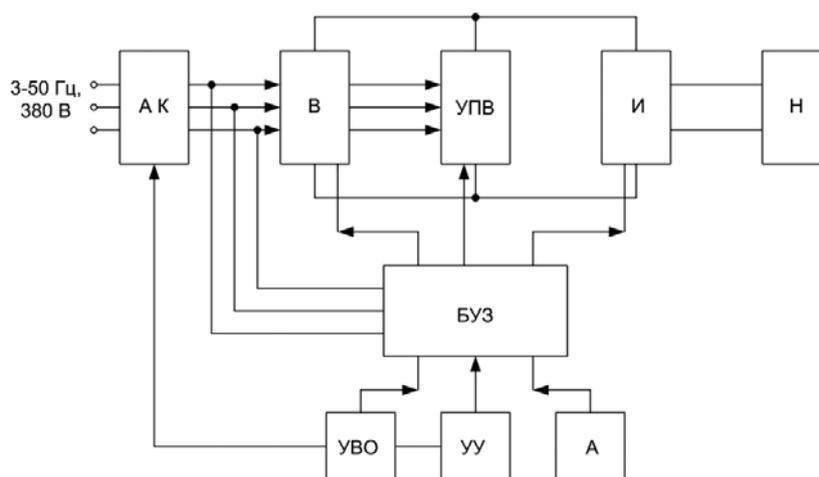


Рис. 1. Общая электрическая структурная схема преобразователя частоты с нагрузкой

Основными элементами преобразователя частоты являются: В – выпрямитель, УПВ – устройство принудительного включения, И – инвертор, БУЗ – блок управления и защиты, Н – нагрузка, А – устройство автоматического поддержания заданных параметров, УВО – устройство включения и отключения, УУ – устройство управления, АК – коммутационная аппаратура [1].

В некоторых случаях применяется трансформатор, который необходим для согласования выходных параметров инвертора с параметрами нагрузки.

В качестве согласующего трансформатора можно применить ферромагнитный умножитель частоты.

Ферромагнитный умножитель частоты приме-

няют в различных областях техники. Важными областями применения ферромагнитных умножителей является металлургия и электротехнология металлов. Принцип действия ферромагнитных умножителей частоты основан на нелинейных свойствах насыщенных магнитопроводов. Их используют для плавного регулирования напряжения, для преобразования частоты и числа фаз, для преобразования формы кривой напряжения и для некоторых других целей [2, 3].

Существует большое количество типов ферромагнитных умножителей частоты, одно из схемотехнических решений приведено в работе [2]. На рис. 2 представлена наиболее распространенная конструкция удвоителя частоты.

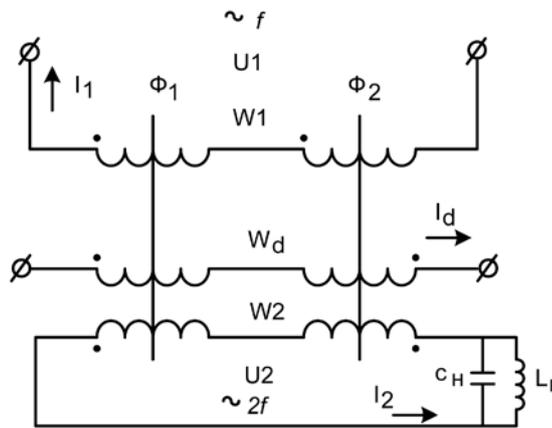


Рис. 2. Физическая модель удвоителя частоты системы Жоли – Эпштейна

Обмотки удвоителя расположены на обоих сердечниках, соединены последовательно. Если обмотки W_1 соединены встречно, то обмотки W_2 и W_d соединены согласно и наоборот. Обмотка подмагничивания подключена к источнику постоянного тока. В общем случае в цепь подмагничивания может включаться фильтр-пробка для подавления в этой цепи тока двойной частоты. На выходе удвоителя включена нагрузка, состоящая из индуктора (L_n) и конденсатора емкостью C_n .

Сердечники 1 и 2 насыщаются поочередно, в течение одного полупериода насыщен магнитопровод 1, в течение другого – магнитопровод 2. Это происходит вследствие того, что в любой момент времени в одном сердечнике складываются, а в другом вычитаются МДС обмоток W_1 , W_d и W_2 . Легко убедиться, что результирующая ЭДС, наводимая в цепи встречно соединенных обмоток W_2 , изменяется с частотой, в 2 раза большей, чем f . Действительно, в первый полупериод волна выходного напряжения U_2 нарастает и спадает, так же как и волна входного напряжения U_1 , а во второй полупериод волна выходного напряжения находится в про-

тивофазе по отношению к волне входного напряжения и, следовательно, повторяет характер изменения U_2 в первый полупериод [2].

$$U_1 = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_2}{dt}$$

$$-w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = i_2 r_2 + U_c,$$

$$F_1 = i_1 w_1 + I_d w_d + i_2 w_2$$

$$F_2 = i_1 w_1 - I_d w_d - i_2 w_2$$

где F_1, F_2 – суммарные МДС магнитопроводов.

$$F_1 + F_2 = 2i_1 w_1, \text{ а } F_1 - F_2 = 2i_2 w_2 + 2I_d w_d.$$

Модель, выполненная в математическом пакете MatLab (рис. 3), работает следующим образом: на выходе сумматора Sum of elements получаем значение $w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}$, далее $\frac{d\Phi_1}{dt}$, которое интегрируем и получаем значение Φ_1 , по зависимости $\Phi_1 = f(F_1)$ (блок Look up Table) определяем F_1 . Аналогичным образом находим F_2 . Складывая или вычитая между собой F_1 и F_2 , в конечном итоге получим значения i_1 и i_2 .

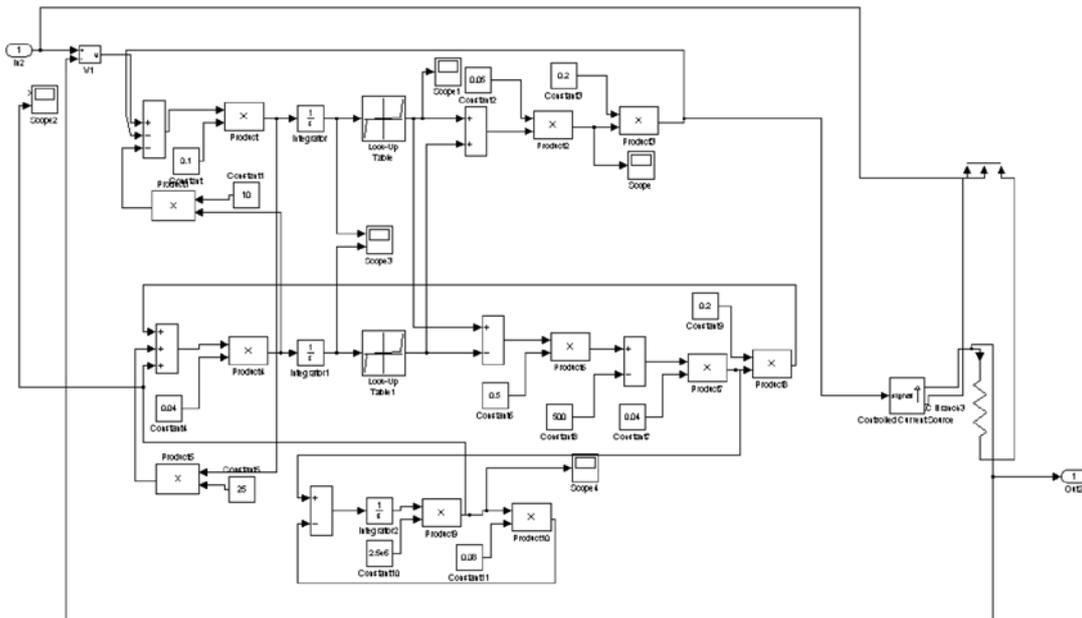


Рис. 3. Имитационная модель ферромагнитного удвоителя частоты (при помощи элементов 1 in и 1 out модель удвоителя подключена к модели преобразователя частоты)

Для построения представленной модели ферромагнитного удвоителя частоты были заданы следующие параметры: $U_{num} = 250\text{--}300$ В, $f_{num} = 10$ кГц, $P = 10$ кВт, которые выбраны таким образом, чтобы эту модель удвоителя частоты можно было приме-

нить как подсистему в модели полупроводникового преобразователя частоты [4, 5–7], и таким образом получить модель преобразователя частоты с ферромагнитным удвоителем частоты (рис. 4).

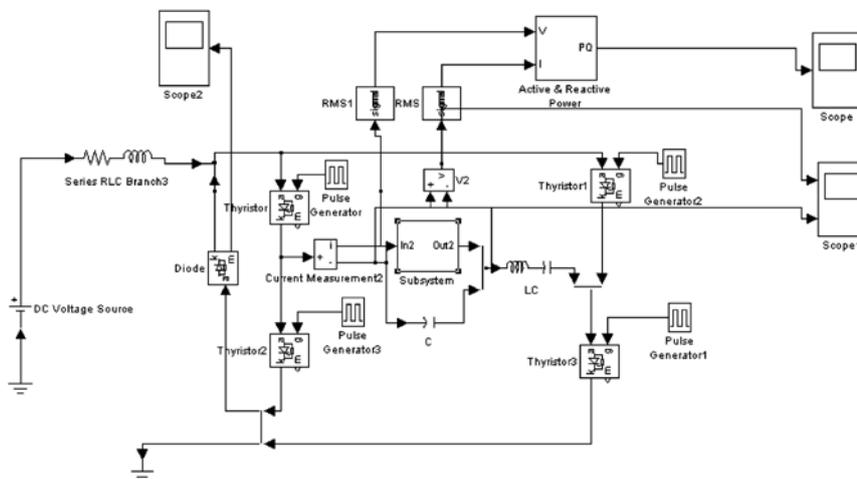


Рис. 4. Модель преобразователя частоты, собранного по схеме мостового симметричного резонансного инвертора [8] совместно с моделью ферромагнитного удвоителя частоты (на рис. представлена в виде блока подсистемы Subsystem):

Scope – осциллограф, Pulse Generator – генератор импульсов, Thyristor – тиристор, Diode – диод, DC Voltage Source – источник постоянного напряжения, Series RLC Branch – RLC сопротивления, Current Measurement – блок для измерения тока, Active & Reactive Power – блок измерения активной и реактивной мощности

При этом получены графики измеряемых величин (рис. 5).

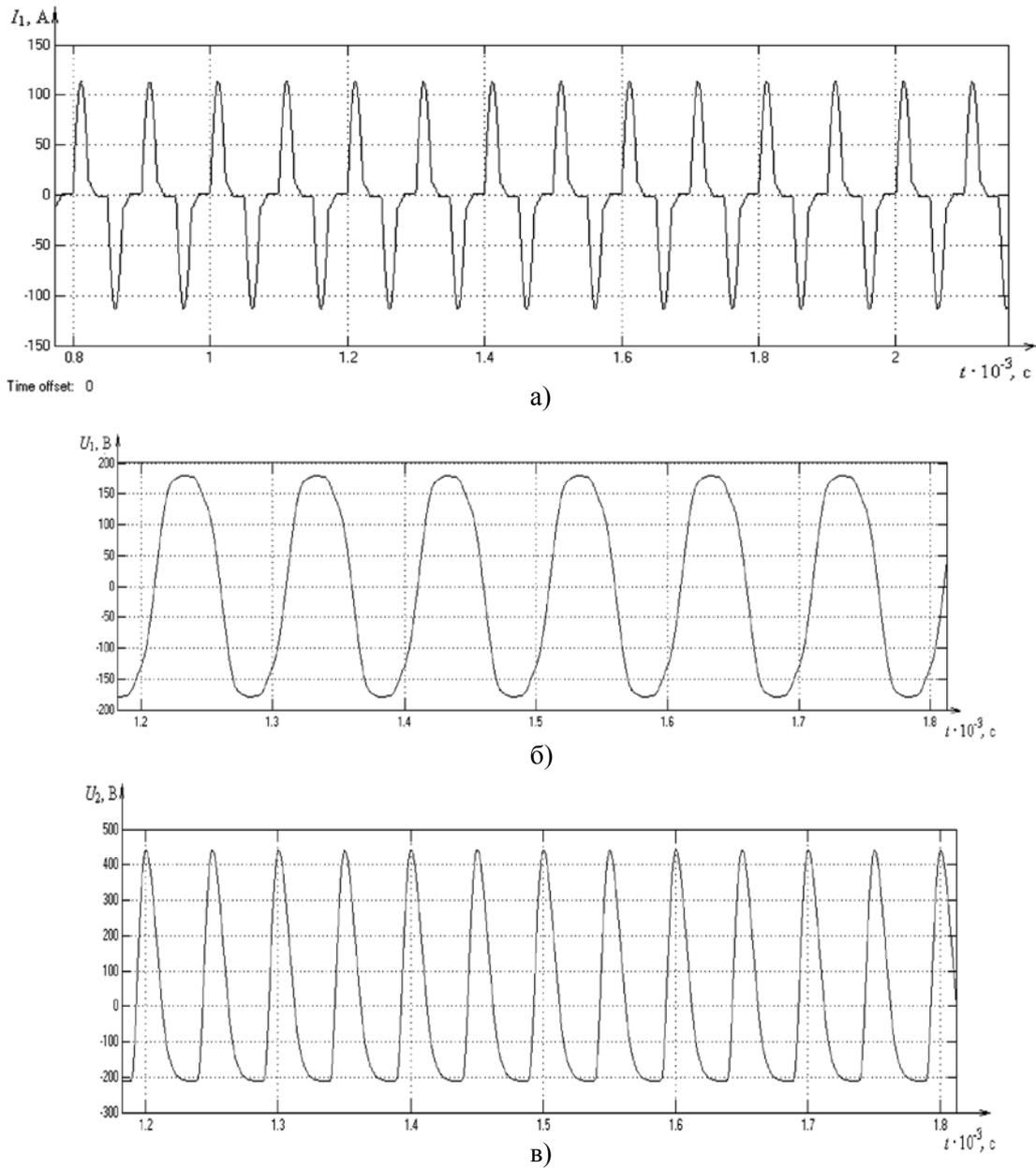


Рис. 5. Измеряемые величины схемы: а) входной ток I_1 ; б) входное напряжение U_1 ; в) выходное напряжение U_1

Регулировочные характеристики, полученные при помощи имитационной модели, приведены на рис. 6.

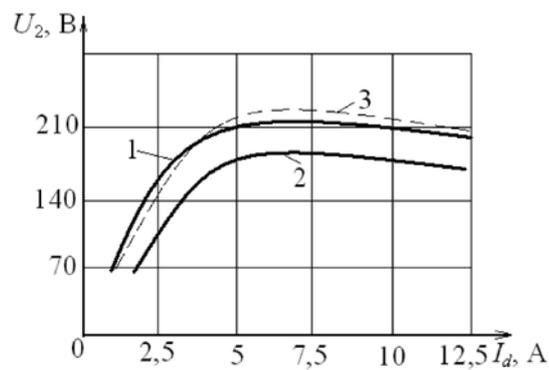


Рис. 6. Регулировочные характеристики: 1 – холостой ход; 2 – номинальная нагрузка; 3 – номинальная нагрузка при автоматизации тока I_d

Согласно рис. 6 возможно как регулирование, так и стабилизация напряжения с помощью изменения тока I_d . С ростом тока подмагничивания напряжение $U_{2н}$ сначала растет, затем при достижении током I_d его номинального значения рост $U_{2н}$ прекращается, и напряжение U_2 уменьшается.

Выводы

1. Совместная работа ферромагнитного и полупроводникового преобразователя частоты позволяет расширить частотный диапазон, осуществить согласование параметров источника питания и нагрузки, получить регулирование и/или стабилизацию выходного напряжения преобразователя.

2. Имитационная модель источника питания совместно с индукторно-конденсаторным модулем позволяет осуществить параметрический синтез системы.

Список литературы

1. Белкин А.К. Тиристорные преобразователи частоты [Текст] / А.К. Белкин, Т.П. Костюкова, Л.Э. Рогинская, А.А. Шуляк. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 263 с.

2. Бамдас А.М. Аналоговое моделирование исполнительных ферромагнитных устройств / А.М. Бамдас, Ю.П. Разуваев, С.В. Шапиро. – М.: Наука, 1975. – 440 с.

3. Патент № 95197 Российская Федерация, МПК⁷ H02M5/16, H02M5/45. Магнито тиристорный преобразователь частоты [Текст] / Р.Р. Исмагилов, М.С. Камалов, Рогинская Л.Э.; заявитель и патен-

тообладатель ГОУ ВПО «Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т» (RU). – № 2010105308/22; заявл. 15.02.2010; опубл. 10.06.2010.

4. Белкин А.К. Комплекс имитационных математических моделей преобразователя частоты для индукционного нагрева [Текст] / А.К. Белкин, Ю.М. Гусев, Р.Р. Исмагилов, Л.Э. Рогинская, А.А. Шуляк // Проблеми сучасної електротехніки. Частина 7. – Київ: НАНУВФТПЕ, 2004 г., – С. 120–124.

5. Patent of USA № 4196468, MKU H02M7/00. Series-type in dependent inverter [Text] / S.V. Shapiro, L.E. Roginskaya, V.A. Okhotnikov, L.I. Gutin, R.N. Kiyamov, V.G. Kazantzev, V.E. Novichkov; assignee Ufimsky Aviatsionny Institut (SU). – № 05/970,991. – Filed: 19.12.1978; Publ. 01.04.1980.

6. Canadian patent № 1105994, MKU H02M7/00. Series-type independent inverter [Text] / S.V. Shapiro, L.E. Roginskaya, V.A. Okhotnikov, L.I. Gutin, R.N. Kiyamov, V.G. Kazantzev, V.E. Novichkov; owners Ufimsky Aviatsionny Institut imeni Ordzhonikidze. – № 318591. – Filed: 22.12.1978; Issued 28.07.81.

7. Konungariket svedige patent № 7813064-8 H02M7/48, B06B1/02. Växelriktareavserietyp [Text] / S.V. Shapiro, L.E. Roginskaya, V.A. Okhotnikov, L.I. Gutin, R.N. Kiyamov, V.G. Kazantzev, V.E. Novichkov. – Filed: 19.12.78. – Publ. 17.03.80 (Publicerings-nummer 412 824).

8. Иванов А.В. Симметричный резонансный инвертор с закрытым входом [Текст] / А.В. Иванов, М.М. Мульменко. – Электротехника. – 1988. – № 10. – С. 53–58.



Рогинская Л.Э.
Roginskaya L.É.

*доктор технических наук,
профессор кафедры
«Электромеханика»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета, Россия, г. Уфа*



Ялалова З.И.
Yalalova Z.I.

*аспирант Уфимского государственного
авиационного технического университета,
Россия, г. Уфа*

УДК 621.314.25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОЩНОСТИ ФАЗОПРЕОБРАЗУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В статье рассматривается методика определения установленной мощности фазопреобразующих трансформаторов. Данные трансформаторы позволяют улучшить электромагнитную совместимость полупроводниковых преобразователей с сетью и нагрузкой. Преимущество данного метода рассмотрено на примере трансформаторного преобразователя числа фаз 3→9. Определены мощности первичной и вторичных обмоток, а также установленная мощность фазопреобразующего трансформатора. Показано, что установленная мощность данного фазопреобразующего трансформатора мало отличается от установленной мощности трехфазного выпрямительного трансформатора.

Ключевые слова: фазопреобразующий трансформатор, трехфазный выпрямительный трансформатор, установленная мощность первичной и вторичных обмоток.

THE DEFINITION OF ELECTROMAGNETIC POWER OF THE PHASE-REFORMATIVE TRANSFORMERS OF THE TRANSFORMING PLANTS

In this article the principles of the determination of the regulation on power of the phase-reformative transformers are considered. These transformers can improve electromagnetic compatibility of the semiconductor converters with the grid and loading. The advantages of this method is considered the example of transformer converter of the number of phases 3→9. The power of the primary and secondary windings is determined and also the power of the phase-reformative transformer is installed.

The installed power of this phase-reformative transformer is little different from the installed power of the three-phase rectifier transformer.

Key words: phase-reformative transformer, three-phase rectifier transformer, the power of the primary and secondary windings.

Проблема электромагнитной совместимости различных потребителей электрической энергии и питающей сети в настоящее время является одной из наиболее важных. Одним из средств достижения электромагнитной совместимости между по-

требителями многофазного переменного тока и источниками питания являются фазопреобразующие устройства на трансформаторах.

Фазопреобразующие трансформаторы или трансформаторные преобразователи числа фаз

(далее ТПЧФ), наряду с согласованием напряжений и частот между сетью и нагрузкой, осуществляют приближение формы кривой потребляемого тока к синусоидальной, уменьшают пульсации выходного выпрямленного напряжения, позволяют более эффективно производить преобразование параметров электроэнергии.

В рассматриваемых устройствах может осуществляться преобразование двух видов: преобразование n -фазной системы токов (магнитных потоков) в m -фазную систему напряжений; преобразование n -фазной системы напряжений в m -фазную систему магнитных потоков и ЭДС; преобразование n -фазной системы в m_1 -фазную, а затем в m -фазную систему [1].

Таким образом, преобразования ТПЧФ можно разделить на:

- 1) n -элементные ТПЧФ _{n} . Первичные обмотки таких преобразователей соединены в звезду или многоугольник, они создают n -фазную систему потоков, а преобразование фаз осуществляется на вторичной стороне;
- 2) m -элементные ТПЧФ _{m} , число стержней магнитопровода в которых равно числу выходных фаз. В них преобразование числа фаз осуществля-

ется на первичной стороне, первичные обмотки создают m -фазную систему магнитных потоков, вторичные же обмотки в преобразовании не участвуют.

Особенности режимов работы и характеристики фазообразующего трансформатора сказываются в первую очередь на параметрах, а также на выборе основных размеров и конструкций обмоток. Рассмотрим подробнее особенности расчета элементов конструкции фазообразующего устройства на примере трансформаторного преобразователя числа фаз 3→9 ($m = 9, n = 3$).

Для формирования девятифазной системы необходимо иметь выходные фазы с числом обмоток $w, 0.396 w, 0.743 w$.

От источника симметричной девятифазной электрической системы может быть получено восемнадцать пульсаций за период при использовании мостовых выпрямителей.

Принципиальная схема восемнадцатипульсного преобразователя представлена на рис. 1, содержит три последовательно включенных вентильных моста, каждый из которых подключен к обмоткам 1–2–3, 1'–2'–3' и 1''–2''–3''.

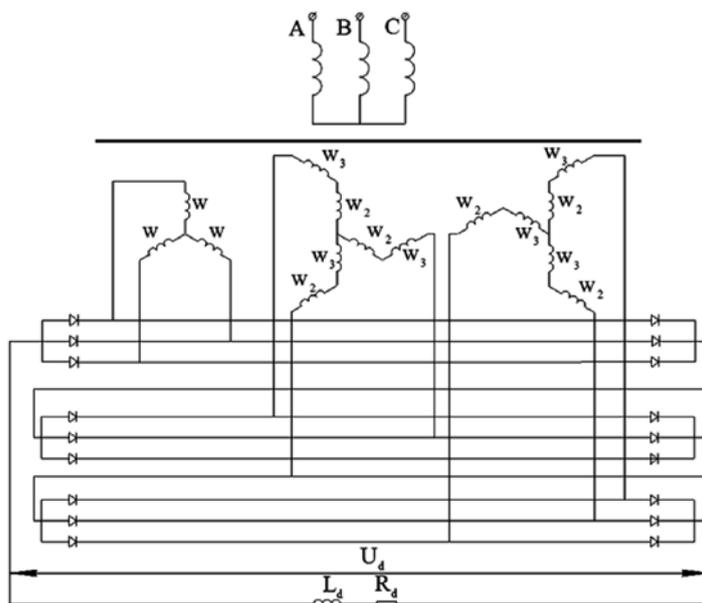


Рис. 1. Принципиальная схема преобразователя 3→9

При включении первичной обмотки в сеть переменного тока в фазах вторичных обмоток индуцируется э.д.с, сдвинутые по фазе на $2\pi/9$. При идеальной коммутации длительность работы каждого вентиля и подключенной к нему обмотки составляет $2\pi/3$. Каждый вентиль выпрямителя отпирается при угле $\alpha = \pi/6$, т. е. одноименные вентили сдвинуты по фазе на угол $2\pi/9$.

Напряжение на выходе U_d в любой момент равно мгновенному значению э.д.с. фазы вторичной обмотки, в которой вентиль открыт, и, следовательно, выпрямленное напряжение имеет вид кривой, огибающей напряжения всех фаз (рис. 2).

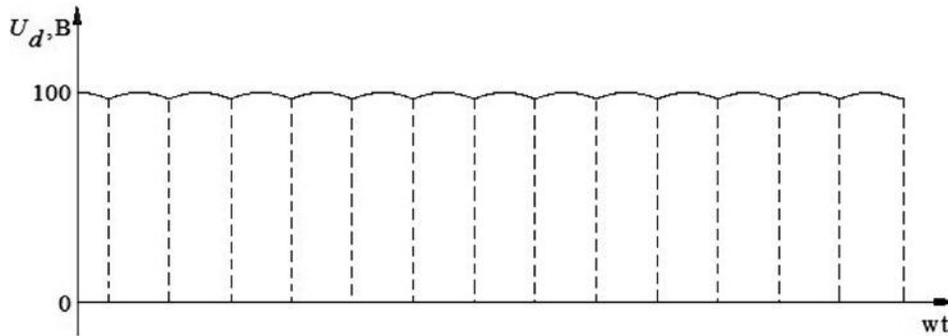


Рис. 2. Кривая выпрямленного напряжения

Для m -пульсного выпрямителя на входе присутствуют гармоники с порядковыми номерами [2]

$$K = m \cdot l \pm 1, \quad (1)$$

где l – ряд целых чисел (1, 2, 3...). Для 9-фазного выпрямителя на входе будут присутствовать высшие гармоники с порядковыми номерами не ниже 17 и 19.

На рис. 3 а–в изображены осциллограммы то-

ков фазы А, формирующиеся обмотками 1–2–3, 1'–2'–3', 1''–2''–3'' [3]. Коммутация считается идеальной, а выпрямленный ток сглаженным. Осциллограмма потребляемого тока фазы А приведена на рис. 3 г. Как видим, его форма близка к синусоидальной и, как следует из формулы (1), порядок высших гармоник не ниже 17 (19).

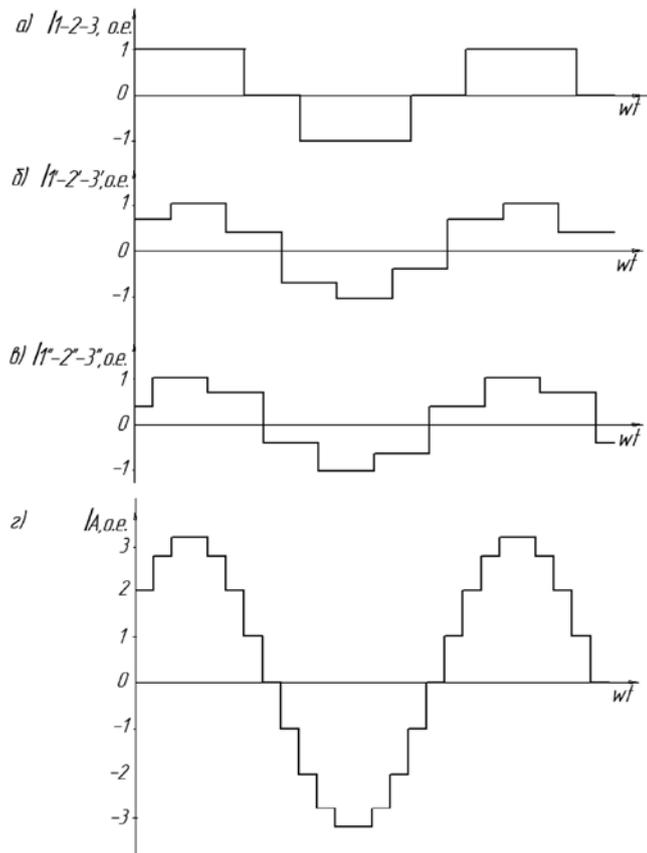


Рис. 3. Осциллограммы токов первичной и вторичной цепи фазы А

Расчет и проектирование проводят при следующих основных допущениях: ток вентильной обмотки идеально сглажен и имеет прямоугольную форму, ток сетевой обмотки имеет прямоугольно-ступенчатую форму; угол управления равен нулю, не учитывают потери холостого хода, а также вли-

яние намагничивающего тока трансформатора.

Первичная и вторичная обмотка преобразователя соединены в звезду, магнитная система уравновешена.

Действующее значение линейного тока вентильной обмотки определяется

$$I_{2л} = k_{cx} \cdot I_d, \quad (2)$$

где k_{cx} – коэффициент схемы, который определяется в зависимости от формы тока, проходящего через обмотку.

1–2–3

$$I_{21л} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/3} k_{cx}^2 I_d^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d; \quad (3)$$

1'–2'–3'

$$\begin{aligned} I_{22л} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} k_{cx}^2 I_d^2 dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\int_0^{\pi/3} 0,743^2 \cdot I_d^2 dt + \int_{\pi/3}^{2\pi/3} 1,1^2 \cdot I_d^2 dt + \int_{2\pi/3}^{\pi} 0,396^2 \cdot I_d^2 dt \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[0,55 \cdot I_d^2 \left(\frac{\pi}{3} - 0 \right) + 1,21 \cdot I_d^2 \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \right) + 0,157 \cdot I_d^2 \left(\pi - \frac{2\pi}{3} \right) \right]} = \sqrt{\frac{1,92}{3}} I_d; \end{aligned} \quad (4)$$

1''–2''–3''

$$\begin{aligned} I_{23л} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} k_{cx}^2 I_d^2 dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\int_0^{\pi/3} 0,396^2 \cdot I_d^2 dt + \int_{\pi/3}^{2\pi/3} 1,1^2 \cdot I_d^2 dt + \int_{2\pi/3}^{\pi} 0,743^2 \cdot I_d^2 dt \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[0,157 \cdot I_d^2 \left(\frac{\pi}{3} - 0 \right) + 1,21 \cdot I_d^2 \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \right) + 0,55 \cdot I_d^2 \left(\pi - \frac{2\pi}{3} \right) \right]} = \sqrt{\frac{1,92}{3}} I_d. \end{aligned} \quad (5)$$

Для мостовой схемы соединения действующее значение фазного напряжения определяется

$$U_{2\phi} = \frac{U_d \cdot \pi}{3\sqrt{6}} = \frac{U_d}{2,34}. \quad (6)$$

Так как преобразование трехфазной системы в девятифазную систему напряжений осуществляется при помощи трех последовательно включенных мостов, то действующее значение фазного напряжения находится:

$$U_{2\phi9} = \frac{U_{2\phi}}{3}. \quad (7)$$

При получении многофазных векторов напряжений на плоскости арифметическая сумма МДС обмоток больше их геометрической суммы. Принцип нахождения векторов напряжения показан на рис. 4 [4].

Коэффициент трансформации определяется по

$$K = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi9}}, \quad (8)$$

Из осциллограмм, приведенных на рис. 3 а–в, находим действующие значения токов вторичных обмоток:

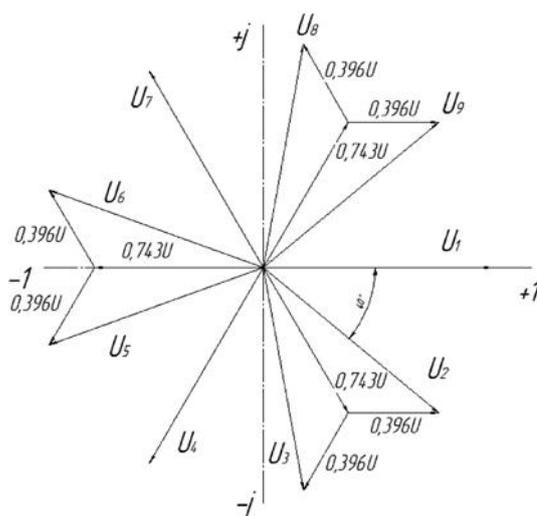


Рис. 4. Принцип нахождения векторов напряжений 9-фазной системы

где $U_{1\phi}$ – действующее значение фазного напряжения первичной обмотки.

Действующее значение линейного тока первичной обмотки

$$I_{1л} = k'_{сх} \cdot \frac{I_d}{K} = \frac{I_d}{K} \sqrt{4 \int_0^{T/4} dt \sum_{\kappa=0}^n (k'_{сх})^2}, \quad (9)$$

где $k'_{сх}$ – коэффициент схемы, который опреде-

ляется в соответствии с формой первичного тока.
Для девятифазной системы в соответствии с рисунком 3 ε действующее значение линейного тока первичной обмотки находится как:

$$I_{1л} = k'_{сх} \cdot \frac{I_d}{K} = \frac{I_d}{K} \sqrt{4 \left(\int_0^{T/36} 0^2 dt + \int_{T/36}^{T/12} 1,1^2 dt + \int_{T/12}^{5T/36} 2,1^2 dt + \int_{5T/36}^{7T/36} 2,8^2 dt + \int_{7T/36}^{T/4} 3,2^2 dt \right)} = \frac{I_d}{K} \cdot \sqrt{5,267} = 2,29 \cdot \frac{I_d}{K} \quad (10)$$

Мощности обмоток рассчитываются по известным значениям выпрямленного напряжения и тока.

Мощность первичной или сетевой обмотки трансформатора

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot I_{1л}. \quad (11)$$

Мощность вторичной или вентильной обмотки трансформатора

$$S_2 = \sqrt{3} \cdot U_{2л} \cdot I_{2л} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2ф9} \cdot I_{2л} \cdot k''_{сх}, \quad (12)$$

где $k''_{сх}$ – коэффициент, учитывающий алгебраическую сумму векторов напряжения (рис. 4).

Мощность вторичных обмоток трансформатора девятифазной системы находится:

для обмотки с числом витков $w_{21} = w, k''_{сх} = 1$

$$S_{21} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2ф9} \cdot I_{21л} \cdot k''_{сх} = 3 \cdot U_{2ф9} \cdot I_{21л}, \quad (13)$$

для обмоток с числами витков $w_{22} = 0,396w, w_{23} = 0,743w, k''_{сх} = 1,14$

$$S_{22} = S_{23} = 3 \cdot U_{2ф9} \cdot I_{22(23)л} \cdot 1,14. \quad (14)$$

Типовая мощность трансформатора определяется как полусумма мощностей всех его обмоток [5]:

$$\begin{aligned} S_{т9} &= 0,5 \cdot (S_1 + S_{21} + S_{22} + S_{23}) = \\ &= 0,5 \cdot (\sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot I_{1л} + 3 \cdot U_{2ф9} \cdot I_{21л} + 3 \cdot U_{2ф9} \cdot I_{22л} \cdot 1,14 + 3 \cdot U_{2ф9} \cdot I_{23л} \cdot 1,14) = \\ &= 0,5 \cdot (\sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot 2,29 \cdot \frac{I_d}{K} + 3 \cdot \frac{U_{2ф}}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} I_d + 3 \cdot \frac{U_{2ф}}{3} \cdot \sqrt{\frac{1,92}{3}} I_d \cdot 1,14 + \\ &+ 3 \cdot \frac{U_{2ф}}{3} \cdot \sqrt{\frac{1,92}{3}} I_d \cdot 1,14) = 0,5 \cdot (\sqrt{3} \cdot U_{1л} \cdot 2,29 \cdot \frac{I_d \cdot U_d}{U_{1ф} \cdot 3 \cdot 2,34} + \frac{U_d}{2,34} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} I_d + \\ &+ \frac{U_d}{2,34} \cdot \sqrt{\frac{1,92}{3}} I_d \cdot 1,14 + \frac{U_d}{2,34} \cdot \sqrt{\frac{1,92}{3}} I_d \cdot 1,14) = 0,5 \cdot (0,56 \cdot U_{1л} \cdot \frac{I_d \cdot U_d \cdot \sqrt{3}}{U_{1л}} + \\ &+ 3,5 \cdot U_d \cdot I_d + 0,39 \cdot U_d \cdot I_d + 0,39 \cdot U_d \cdot I_d) = 0,5 \cdot (0,98 \cdot I_d \cdot U_d + 0,35 \cdot U_d \cdot I_d + \\ &+ 0,39 \cdot U_d \cdot I_d + 0,39 \cdot U_d \cdot I_d) = 1,055 \cdot U_d \cdot I_d \end{aligned} \quad (15)$$

Номинальная мощность преобразователя равна произведению номинального выпрямленного тока на номинальное напряжение:

$$P_d = U_d \cdot I_d. \quad (16)$$

Выводы

1. Применение фазообразующих трансформаторов позволяет повысить электромагнитную совместимость преобразовательных установок с сетью и нагрузкой.

2. При определении электромагнитной мощности фазообразующего трансформатора следует учитывать, что в преобразовательных уста-

новках складывается напряжение выпрямительных мостов и МДС подключенных к ним обмоток.

3. Установленная мощность фазообразующего девятифазного преобразователя составляет 1,055% установленной мощности трехфазного выпрямительного трансформатора.

Список литературы

1. Костюкова Т.П. Определение параметров фазообразующих трансформаторов [Текст] / Т.П. Костюкова, Л.Э. Рогинская, Н.Г. Уразбахтина, С.В. Шапиро // Электротехнические комплек-

сы и системы: межвузовский научный сборник; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 267 с.

2. *Рогинская Л.Э.* Фильтрация высших гармоник с помощью трансформаторного преобразования числа фаз [Текст] / Л.Э. Рогинская, З.И. Ялалова // Технические науки – основа современной инновационной системы: материалы I Международной науч.-практ. конф., 25 апр. 2012 г.: в 2 ч. / Приволжский научно-исследовательский центр. – Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 144 с. – ISSN – 978-5-905371-26-4. – С. 70–73.

3. *Пат. 126232* Российская Федерация, МПК⁷H02M7/10. Многофазный преобразователь на базе фазопреобразующего трансформатора [Текст] / Л.Э. Рогинская, З.И. Ялалова; патен-

тообладатель ФГБОУ ВПО «Уфимс. гос. авиац. техн. ун-т» (RU). – 2012141819/07; заявл. 01.10.2012; опубл. 20.03.2013.

4. *Рогинская Л.Э., Ялалова З.И.* Синтез фазо-преобразующих трансформаторов для преобразования числа фаз [Текст] / Л.Э. Рогинская, З.И. Ялалова // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 2. Машиностроение, электроника, приборостроение: сборник трудов 7-й Всероссийской зимней школы – семинара аспирантов и молодых ученых, 14–16 февраля 2012 г. / Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 38–41.

5. *Фишлер Я.Л.* Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок [Текст] / Я.Л. Фишлер, Р.Н. Урманов, Л.М. Пестряева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.



Ураксеев М.А.
Urakseev M.A.

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа



Левина Т.М.
Levina T.M.

кандидат технических наук, доцент филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, Россия, г. Салават

УДК 321.3.08

ОПТОВОЛОКОННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ КАК ЭЛЕМЕНТЫ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

В статье рассматривается современное состояние электротехнических комплексов и систем. Показано, что измерительные трансформаторы тока и напряжения, применяемые традиционно в цепях релейной защиты и автоматики, имеют ряд недостатков. В связи с этим показано, что оптоэлектронные трансформаторы устраняют недостатки традиционных трансформаторов тока и напряжения, а также являются искро-, взрывобезопасными. В статье рассматриваются оптоэлектронные трансформаторы тока, использующие магнитооптический эффект Фарадея. Рассмотрены принципы, на которых могут быть построены оптоэлектронные трансформаторы тока.

Ключевые слова: волоконная оптика, эффект Фарадея, магнитооптика, трансформаторы тока, оптоэлектронные трансформаторы тока.

FIBER OPTIC COMPONENTS TRANSFORMERS AS MODERN ELECTRICAL AND COMPLEX SYSTEMS

The article discusses the current state of the electric units and systems. It indicates that the current and voltage

measuring transformers traditionally used in the circuits of relay protection and automation have a number of drawbacks. In this regard, it indicates that the optoelectronic transformers eliminate the drawbacks of traditional current and voltage transformers and are also spark and explosion proof. The article discusses optoelectronic current transformers using the magneto-optical Faraday effect. The paper explores the principles upon which optoelectronic current transformers can be built.

Key words: fiber optics, Faraday effect, magneto-optical, electric units, current transformers, optoelectronic current transformers.

Современное состояние электротехнических комплексов и систем направлено на разработку новейших конструкций приборов и оборудования. Известно, что в цепях релейной защиты и автоматики управление высоковольтным (ВВ) оборудованием осуществляется в низковольтной (НВ) части. При этом для преобразования ВВ-сигналов в НВ-сигналы используются измерительные трансформаторы тока (ИТТ) и напряжения (ИТН). Такие ИТТ и ИТН имеют ряд недостатков: явления насыщения, гистерезиса, резонанса, остаточного намагничивания, а также большой вес и габариты. В связи с этим появилась необходимость создания такого нового вида измерительных трансформаторов, как оптоэлектронные. Оптоэлектронные трансформаторы устраняют недостатки традиционных трансформаторов, а также являются искро-, взрывобезопасными и экономически выгодными.

В оптоэлектронных трансформаторах тока (ОТТ) и напряжения (ОТН) используются магнито-оптический эффект Фарадея и электрооптический эффект Поггеля. В данной работе рассматриваются только оптоэлектронные трансформаторы тока.

История оптических трансформаторов тока уходит корнями в середину девятнадцатого века, когда Фарадей опубликовал работы по закону и явлению электромагнитной индукции. Спустя 14 лет, в 1845 г. Фарадей открыл еще одно явление, которое стало одной из основных ступеней в процессе разработки оптических преобразователей тока, – явление поворота плоскости поляризации линейно поляризованного света в постоянном магнитном поле.

Принципиальная схема эффекта Фарадея показана на рисунке 1, в ней использованы следующие обозначения: 1 – лазерный диод; 2 – поляризатор; 3 – элемент Фарадея (скрученное оптическое волокно); 4 – анализатор; 5 – фотодиод; 6 – проводник с током.

Колебания световой волны на выходе поляризатора происходят в плоскости С. На выходе анализатора, с учетом дополнительного поворота плоскости поляризации в элементе Фарадея (ЭФ) на угол φ и угол пропускания пары поляризаторов γ , колебания плоскополяризованной световой волны происходят в плоскости D [1].

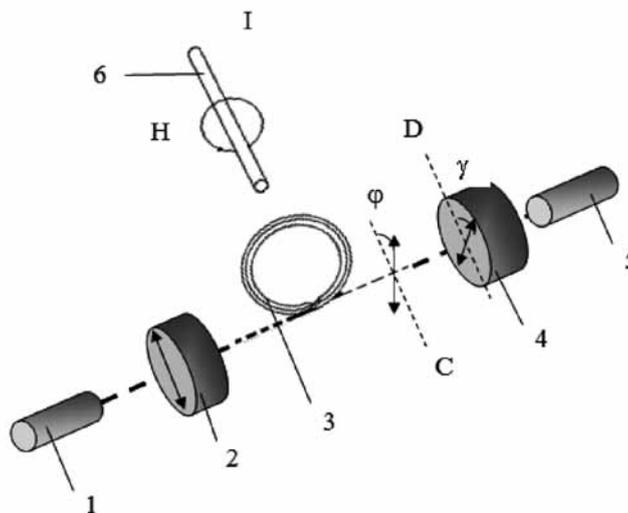


Рис. 1. Принципиальная схема эффекта Фарадея

Если изготовить кольцо из множества витков оптического волокна и намотать на это кольцо провод, то, пропустив электрический ток, можно получить преобразователь магнитного поля, обладающий высокой чувствительностью. При этом угол

вращения плоскости поляризации

$$\varphi = VN_f N_i I,$$

где I – электрический ток; N_f – число витков кольца из оптического волокна; N_i – число пересечений электрического тока с витками волокна [2].

В современных литературных источниках широкую известность подобные технологии получили после того, как были представлены первые удачные прототипы в 2005 году, когда канадская корпорация «NxtPhaseCorporation» представила один из

первых рабочих вариантов оптических преобразователей тока (рис. 2). Несмотря на относительно высокую стоимость данной технологии она без сомнения является одним из ключевых направлений развития ОТТ.

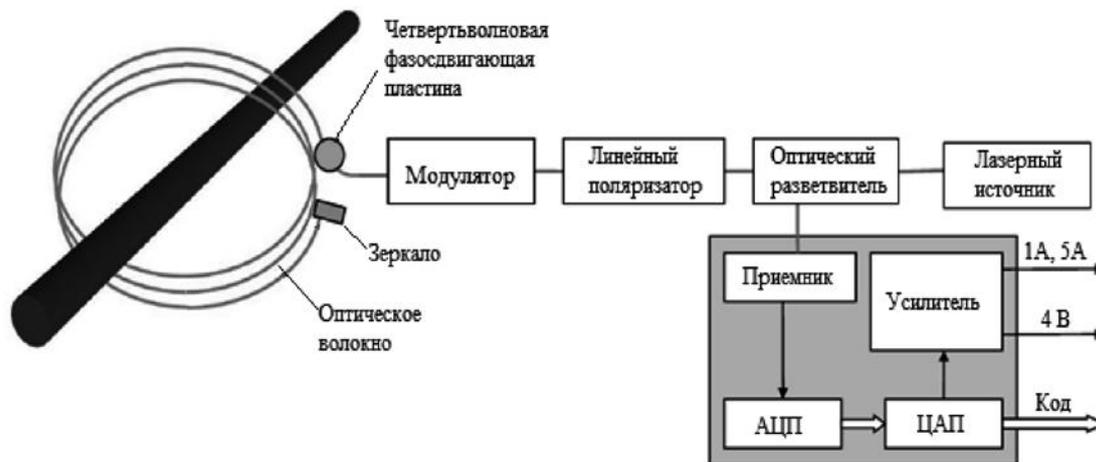


Рис. 2. Функциональная схема оптического трансформатора тока

Рассмотрим более подробно преимущества ОТТ:

- естественная гальваническая развязка первичных и вторичных цепей (чувствительный элемент – оптическое волокно – является диэлектриком);
- отсутствие выноса потенциала с ОРУ (повышение безопасности и электромагнитной совместимости);
- снижение эксплуатационных затрат;
- измерительные оптоэлектронные трансформаторы тока и напряжения не требуют замены/контроля масла или элегаза, регулярного ремонта или проверки, а лишь поверки прибора и его выходных характеристик раз в 6 лет (затраты не превышают 2% от стоимости прибора за все время эксплуатации);
- массогабаритные показатели (от 15 кг) значительно меньше, чем у традиционных трансформаторов (от 100 кг).

А также:

- ОТТ имеют аналоговый и цифровой выходы, а поэтому совместимы, как с существующими вторичными цепями, так и с перспективными информационными системами на базе протокола 61850-9-2;
- высокая точность контроля и учета электроэнергии (превосходит класс точности 0,2S и 0,2).

Энергобезопасность:

- высокая пожаро-, взрывобезопасность и экологичность, так как не содержит масел, бумаги, горючих полимеров и элегаза в высоковольтной изоляции;
- исключение проблем феррорезонанса и опасности размыкания вторичных токовых цепей.

Энергоэффективность:

- применение цифровых ОТТ значительно превышает точность учета;
- при использовании ОТТ с аналоговым выходом устраняются погрешности, связанные с нагрузочными характеристиками трансформаторов, и в значительной степени уменьшаются погрешности из-за потерь в протяженных вторичных цепях;
- при переходе на цифровые интерфейсы ОТТ позволяют снизить объемы неучтенной электроэнергии более чем в 10 раз.

В основе ОТТ лежат следующие принципы построения.

Первый принцип построения заключается в последовательном соединении между собой (n-1) чувствительных элементов световода (рис. 3) [3]. Это устройство используется для измерения однократных импульсов тока с длительностью, лежащей в наносекундном диапазоне, в мощных электрофизических установках типа линейных импульсных ускорителей электронов.

В данном волоконно-оптическом устройстве содержится источник линейно-поляризованного светового излучения 1, который через волоконный световод 2, изготовленный из магнитооптического материала, подключен к началу поляризационно-чувствительного фотоприемника 3, конец которого подсоединен к измерительно-вычислительному блоку 4. Волоконный световод состоит из n чувствительных элементов $S_{1...n}$ в виде одинаковых дуг, образующих замкнутый контур, который охватывает токопровод с измеряемым током.

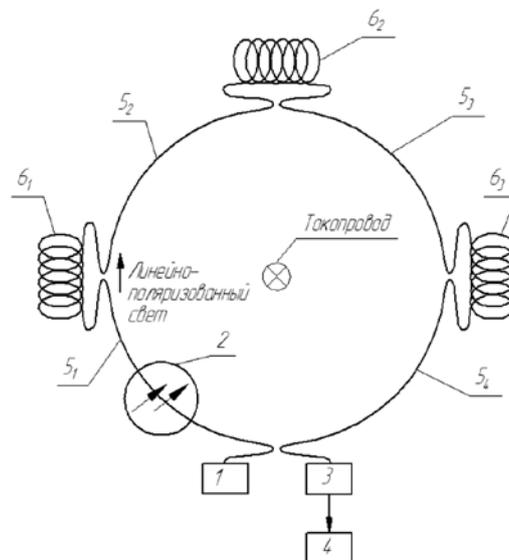


Рис. 3. Волоконно-оптическое устройство для измерения импульсных токов

Элементы последовательно соединены между собой (n-1) одинаковыми волоконно-оптическими линиями задержки $6_{1...n-1}$: начало первого чувствительного элемента подключено к источнику излучения, конец последнего чувствительного элемента подключен ко входу фотоприемника. Волоконно-оптические линии задержки представляют собой катушки с витками световода. Витки катушек расположены так, что плоскости этих витков перпендикулярны силовым линиям магнитного поля, создаваемого измеряемым током.

Второй принцип состоит в том, что выход фото-

приемного устройства связан со входом усилителя постоянного тока и через разделительную емкость со входом усилителя переменного тока представлен на рисунке 4. Его выход связан с первым входом делителя, второй вход делителя связан с первым выходом усилителя постоянного тока. Выход делителя связан со входом регистратора. Второй выход усилителя постоянного тока связан с первым входом сумматора, второй вход которого электрически связан с выходом источника опорного напряжения, а его выход – с затвором с изменяющимся коэффициентом пропускания.

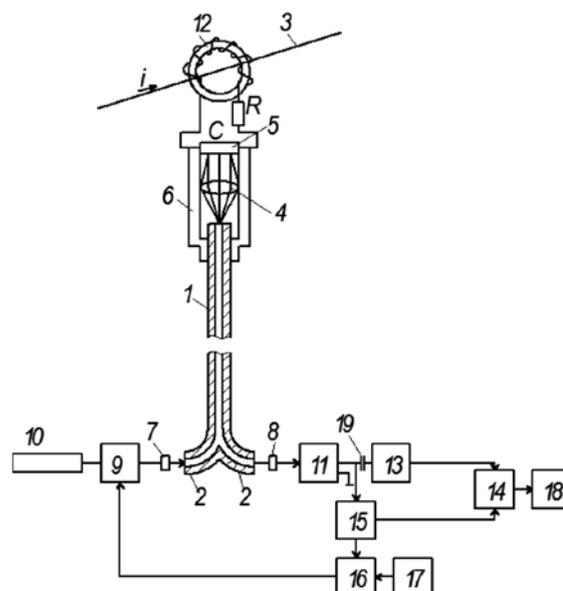


Рис. 4. Датчик тока. Устройство содержит: 1 – волоконно-оптический канал связи; 2 – волоконно-оптический ветвитель; 3 – токовый проводник; 4 – линзу; 5 – пьезокерамическую мембрану с зеркальным покрытием; 6 – корпус модулятора; 7 – первый фокон; 8 – второй фокон; 9 – затвор с изменяющимся коэффициентом пропускания; 10 – ИАГ: Nd+3 лазер; 11 – фотоприемное устройство; 12 – измерительный преобразователь; 13 – усилитель переменного тока; 14 – делитель; 15 – усилитель постоянного тока; 16 – сумматор; 17 – источник опорного напряжения; 18 – регистратор; 19 – емкость.

В статическом состоянии при отсутствии тока в токовом проводнике 3 устройство работает следующим образом. Пучок света от ИАГ:Nd³⁺ лазера, пройдя затвор с изменяющимся коэффициентом пропускания 9 и первый фокон 7, направляется на вход волоконно-оптического ветвителя 2 и через него по волоконно-оптическому каналу связи 1, пройдя линзу 4, поступает на пьезокерамическую мембрану с зеркальным покрытием 5, отразившись от которой вновь через линзу 4, волоконно-оптический канал связи поступает на волоконно-оптический ветвитель 2 и через его выход, пройдя второй фокон 8, поступает на фотоприемное устройство 11, где сигнал поступает на вход усилителя постоянного тока 15 и через емкость 19 на вход усилителя переменного тока 13. С первого выхода усилителя постоянного тока 15 и с выхода усилителя переменного тока 13 электрические сигналы поступают соответственно на первый и второй входы делителя 14. С выхода делителя 14 сигнал, равный отношению сигнала от усилителя постоянного тока 15 и от усилителя переменного тока 13, пропорциональный измеряемому току, поступает на регистратор 18, где и фиксируется. Одновременно электрический сигнал со второго выхода усилителя постоянного тока 15 поступает на первый вход сумматора 16, на второй вход которого поступает сигнал от источника опорного напряжения 17. Сигнал разбаланса с выхода сумматора 16 поступает на затвор с изменяющимся коэффициентом пропускания 9. Таким образом, устанавливается такой уровень интенсивности лазерного излучения в световоде, при котором обеспечивается необходимый для нормального режима работы уровень освещенности на фотоприемном устройстве 11.

При проявлении тока в контролируемой цепи электрический сигнал с выхода измерительного преобразователя 12 поступает на пьезокерамическую мембрану с зеркальным покрытием 5, вызывая ее деформацию, что вызывает изменение пространственно-угловых характеристик лазерно-

го излучения, поступающего на нее по волоконно-оптическому каналу связи 1. В свою очередь, изменение пространственно-угловых характеристик излучения, отраженного от пьезокерамической мембраны с зеркальным покрытием, при его вводе в волоконно-оптический канал связи 1, вызывает изменения условий его ввода, вызывая таким образом модуляцию лазерного излучения, поступающего на фотоприемное устройство света 11. Возникающий таким образом сигнал на выходе приемника света фиксируется регистратором 18.

При воздействии внешних факторов на волоконно-оптический канал связи 1 (ионизирующее излучение, механические нагрузки, температурный нагрев и т. д.) или изменении уровня потерь, вносимых оптическими разъемами при повторной сборке устройства, изменяется величина лазерного сигнала, поступающего на фотоприемное устройство 11, однако в связи с тем, что мощность света, поступающего на него, можно представить в виде

$$P = P_0(1 + m),$$

где P – среднее значение мощности, m – глубина модуляции, а на выходе усилителя переменного тока 13 выделяется переменная составляющая сигнала, пропорционально только глубине модуляции, и не зависит от дестабилизирующих факторов.

Тем самым компенсируется влияние внешних факторов на прохождение информационного сигнала от передающего блока к регистратору. Таким образом, устройство позволяет повысить точность и большую устойчивость измерения путем информации от передающего блока к регистратору [4].

Далее рассмотрим третий принцип, в котором преобразователь предназначен для измерения силы тока в мощных электрофизических установках (рис. 5). Он содержит: источник линейно поляризованного светового излучения 1; два витка световодов 2, 3; поляризационно-нечувствительный соединитель световодов 4; анализатор 5 и регистратор 6. Витки световодов охватывают токопровод с измеряемым током в противоположных направлениях.

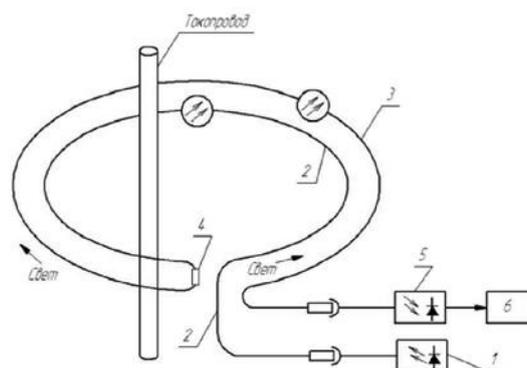


Рис. 5. Устройство для измерения больших токов

Источник светового излучения оптически подключен ко входу первого световода, выход которого через соединитель световодов оптически подключен ко входу второго световода, выход второго световода оптически подключен к анализатору, который, в свою очередь, подключен к регистратору. Световоды выполнены из магнитооптических материалов с постоянными Верде соответственно V_1, V_2 .

Устройство предназначено для измерения силы токов в мощных электрофизических установках. Оно должно позволять измерять силу тока до 10 МА

$$I_{\max} = \frac{2\pi}{2(V_1 - V_2)}.$$

При постоянной Верде $V_1 = 4,71 \cdot 10^{-6}$ рад/Аи $V_2 = 4,54 \cdot 10^{-6}$ рад/А максимальное значение измеряемого тока будет равно 18 МА [7].

Приведем пример четвертого принципа построения, структурная схема которого приведена на рисунке 6.

При протекании электрического тока I по проводнику создается контролируемое магнитное поле напряженностью H . Это поле воздействует на элемент Фарадея (скрученное оптическое волокно) ЭФ. Создаваемое лазерным диодом ЛД когерентное мо-

нохроматическое излучение J_1 в поляризаторе P поляризуется в линейно поляризованную световую волну J_2 . В ЭФ под действием внешнего магнитного поля происходит вращение плоскости поляризации света, распространяющегося вдоль направления магнитного поля. Световой поток J_3 с выхода ЭФ проходит через анализатор A и попадает на фотодиод ФД, затем на измерительный блок ИБ, который состоит из усилителя U . Далее происходит преобразование сигнала через аналого-цифровой преобразователь АЦП и на жидкокристаллическом индикаторе ЖКИ получаем значение контролируемого магнитного поля. Поляризатор P и анализатор A находятся в скрещенном положении. Таким образом, существует возможность фиксировать слабое изменение интенсивности светового потока на входе в фотодиод [5].

Наиболее важным элементом в данной схеме является чувствительный ЭФ, в котором при воздействии магнитного поля на некоторые материалы в них возникает индуцированная оптическая активность. Этот эффект достигается в результате взаимодействия магнитных полей света и электронных орбиталей [6].

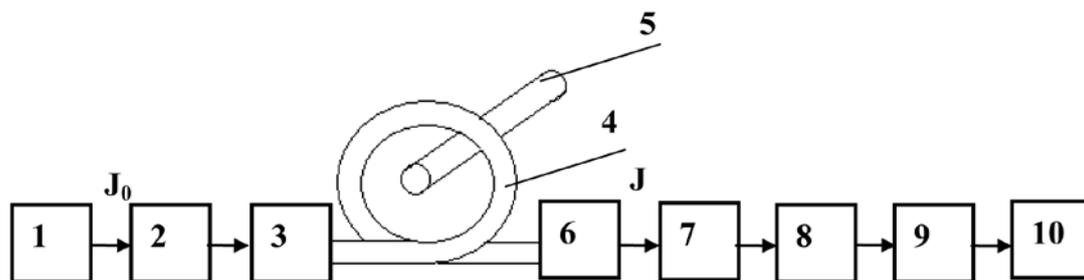


Рис. 6. Структурная схема четвертого принципа построения ОТТ

1 – лазерный диод; 2 – соединительное оптическое волокно; 3 – поляризатор; 4 – чувствительный элемент (виток оптического волокна); 5 – проводник с током, создающий магнитное поле; 6 – анализатор; 7 – фотодиод (ФД); 8 – операционный усилитель (ОУ); 9 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 10 – жидкокристаллический индикатор (ЖКИ)

Основными достоинствами ЧЭ четвертого принципа построения являются его малая инерционность (время установления меньше 10^{-9} с), а также диамагнитная константа Верде, слабо зависящая от температуры.

В результате комплексного анализа принципов построения современных оптоэлектронных трансформаторов тока можно сделать вывод, что развитие оптической технологии преобразования представляется наиболее перспективным направлением как с точки зрения науки, так и в экономическом плане.

Список литературы

1. Бонерт Клаус. Прорыв в области измерения сильных постоянных токов [Текст] / Клаус Бонерт,

Петер Гугенбах // АББ Ревю. – 2005. – № 1. – С. 6–10.

2. Левина Т.М. Информационно-измерительная система контроля магнитного поля: монография [Текст] / Т.М. Левина, М.А. Ураксеев. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, Saarbrucken, Germany, 2012.

3. Левина Т.М. Применение электробезопасных датчиков в системе управления технологическим процессом обессоливания нефти [Текст] / Т.М. Левина, Ю.А. Жаринов, Ф.Ф. Шамаев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии – 2012. – № 4. – С. 18–23.

4. Патент № 2262709 Российская Федерация МПК7G01R15/24. Волоконно-оптическое устройство для измерения импульсных токов [Текст] /

Ю.П. Казачков, А.В. Пименов; заявитель и патенто-обладатель ФГУП «Научно-исследовательский институт импульсной техники» (RU). – 2004126421/28; заявл. 30.08.2004; опубл. 20.10.2005.

5. *Патент № 2171996* Российская Федерация МПК7G01R19/00. Датчик тока [Текст] / И.Г. Кирин; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет (RU). – 99125305/09; заявл. 02.12.1999; опубл. 10.08.2001.

6. *Патент № 2208798* Российская Федерация МПК7G01R33/032. Устройство для измерения больших токов [Текст] / Ю.П. Казачков;

заявитель и патентообладатель ФГУП «Научно-исследовательский институт импульсной техники» (RU). – 2001134908/09; заявл. 25.12.2001; опубл. 20.07.2003.

7. *Патент № 62712* Российская Федерация МПК7G01R29/00. Информационно-измерительное устройство контроля электрического тока и магнитного поля [Текст] / М.А. Ураксеев, Т.М. Левина, И.В. Галиуллин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т» (RU). – 2006143955/22; заявл. 11.12.2006; опубл. 27.04.2007.



**Хайруллин И.Х.
Khairullin I.Kh.**

*доктор технических наук,
профессор кафедры
«Электромеханика»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета, Россия, г. Уфа*



**Гиниятуллин Д.М.
Giniyatullin D.M.**

*инженер
ООО «ОБО Беттерманн»*



**Пашали Д.Ю.
Pashali D.Yu.**

*кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электромеханика»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета, Россия, г. Уфа*

УДК 620.179.142

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕОРИИ ДЕФЕКТОСКОПИИ

В представленной статье исследовано пространственное распределение изменяющегося электромагнитного поля в обобщенной пятислойной модели. Получены выражения для расчета трех составляющих магнитного поля в каждом слое. Разработанная модель имеет широкие перспективы применения в теории дефектоскопии и экранирования.

Ключевые слова: электромагнитное поле, многослойная структура, вектор магнитной индукции, дефектоскопия, экранирование.

INVESTIGATION OF THE MAGNETIC FIELD SPATIAL DISTRIBUTION IN LAYERED STRUCTURES FOR THE DEFECTOSCOPY THEORY

The article investigates the spatial distribution of the changing electromagnetic field in a generalized multilayer

model. There were obtained the expressions for calculating the three components of the magnetic field in each layer. The developed model has a broad application prospects in the theory of fault detection and screening.

Key words: electromagnetic field, multi-layered structure, the magnetic induction vector, defectoscopy, the screening.

Введение

В течение всего периода эксплуатации систем с распределенными параметрами вследствие воздействия эксплуатационных нагрузок, а также по причине технологических изъянов, могут возникать различные виды дефектов в их деталях и узлах. Основными видами дефектов являются усталостные трещины, стресс-коррозионные растрескивания, нарушения сплошности или однородности материала, различные виды коррозии. Одной из главных задач контроля как в производстве, так и при эксплуатации таких систем является своевременное обнаружение дефектов на ранней стадии их развития.

Как правило, большинство функциональных систем с распределенными параметрами представляет собой многослойную структуру из электропроводящих и непроводящих материалов. Число слоев в отдельных случаях может достигать нескольких десятков.

Одним их эффективных, при таких условиях, является токовихревой метод диагностики, позволяющий судить о наличии дефектов по изменению магнитного поля. Но существующие на сегодня методы токовихревой дефектоскопии позволяют исследовать только небольшие зоны поверхности тестируемого материала, что значительно замедляет обследование крупногабаритных устройств и аппаратов.

Таким образом, создание математического описания магнитного поля как диагностического признака агрегатов с распределенной вторичной системой и его исследование с целью развития методов и средств токовихревой диагностики больших по площади объектов является актуальной научной задачей.

Построение математической модели пространственного распределения магнитного поля в пятислойной структуре

Распределение поля в многослойной среде характеризуется большой сложностью, и это диктует необходимость постоянного повышения точности соответствующих электромагнитных расчетов при достаточно строгой постановке модельных задач. Несмотря на многообразие конструктивных форм и функциональных особенностей устройств, можно выделить обобщенную модель, охватывающую широкий круг основных типов многослойных систем.

Данная модель представляет собой пятислойную структуру (рис. 1) и включает целый ряд прикладных задач расчета электромагнитных полей, создаваемых внешними пространственно-периодическими источниками, в частности в теории дефектоскопии и теории экранирования.

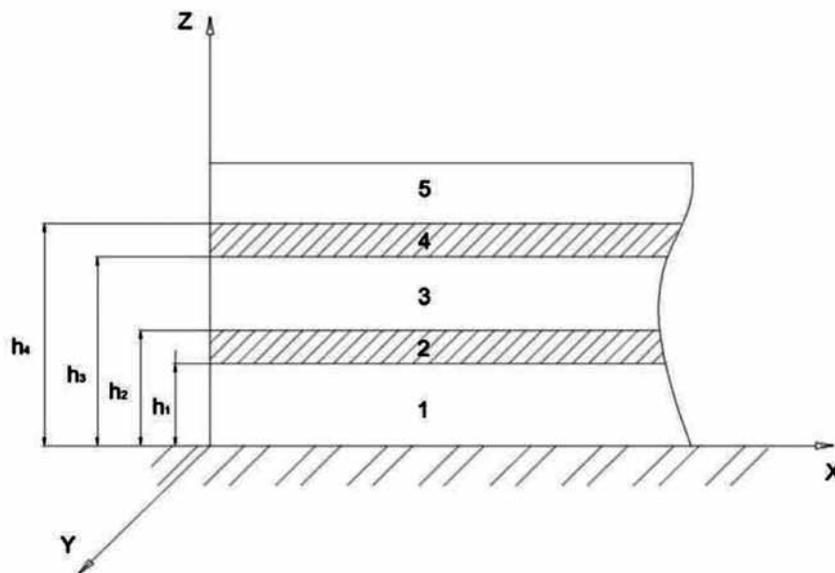


Рис. 1. Обобщенная модель пятислойной структуры (h_n – расстояние до индуктора)

Запишем исходные уравнения в общем виде для различных зон:

$$\begin{cases} \Delta \bar{H}_1 = 0 \\ \Delta \bar{H}_2 - \mu_0 \mu_2 \sigma_2 \frac{\partial \bar{H}_2}{\partial t} = 0 \\ \Delta \bar{H}_3 = 0 \\ \Delta \bar{H}_4 - \mu_0 \mu_4 \sigma_4 \frac{\partial \bar{H}_4}{\partial t} = 0 \\ \Delta \bar{H}_5 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где \bar{H}_n – напряженность магнитного поля, σ_n – удельная электрическая проводимость, μ_0 – магнит-

ная проницаемость вакуума, μ_n – магнитная проницаемость соответствующего проводящего слоя [1].

Для решения системы уравнений (1) зададим допущения:

1) размеры исследуемой системы и индуктора в направлении осей OX и OY бесконечны;

2) электропроводность воздушных промежутков 1, 3, 5 (рис. 1) равна нулю;

3) поле создается бесконечно тонким токовым слоем, изменяющимся во времени по гармоническому закону в направлении осей OX и OY.

Решая систему уравнений (1) методом разделения переменных, при принятых выше допущениях, получаем:

Для зоны 5:

$$\begin{cases} H_{5x} = \sin(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_{25} \cdot sh(\gamma_5 \cdot z) + C_{26} \cdot ch(\gamma_5 \cdot z)) \\ H_{5y} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot y) \cdot (C_{27} \cdot sh(\gamma_5 \cdot z) + C_{28} \cdot ch(\gamma_5 \cdot z)) \\ H_{5z} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_{29} \cdot sh(\gamma_5 \cdot z) + C_{30} \cdot ch(\gamma_5 \cdot z)) \\ B_{5z} = \mu_0 \cdot H_{5z} \end{cases} \quad (2)$$

Для зоны 4:

$$\begin{cases} H_{4x} = \sin(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_{19} \cdot sh(\gamma_4 \cdot z) + C_{20} \cdot ch(\gamma_4 \cdot z)) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ H_{4y} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot y) \cdot (C_{21} \cdot sh(\gamma_4 \cdot z) + C_{22} \cdot ch(\gamma_4 \cdot z)) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ H_{4z} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_{23} \cdot sh(\gamma_4 \cdot z) + C_{24} \cdot ch(\gamma_4 \cdot z)) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ B_{4z} = \mu_0 \cdot \mu_4 \cdot H_{4z} \end{cases} \quad (3)$$

Для зоны 3:

$$\begin{cases} H_{3x} = \sin(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_{13} \cdot sh(\gamma_3 \cdot z) + C_{14} \cdot ch(\gamma_3 \cdot z)) \\ H_{3y} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot y) \cdot (C_{15} \cdot sh(\gamma_3 \cdot z) + C_{16} \cdot ch(\gamma_3 \cdot z)) \\ H_{3z} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_{17} \cdot sh(\gamma_3 \cdot z) + C_{18} \cdot ch(\gamma_3 \cdot z)) \\ B_{3z} = \mu_0 \cdot H_{3z} \end{cases} \quad (4)$$

Для зоны 2:

$$\begin{cases} H_{2x} = \sin(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_7 \cdot sh(\gamma_2 \cdot z) + C_8 \cdot ch(\gamma_2 \cdot z)) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ H_{2y} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot y) \cdot (C_9 \cdot sh(\gamma_2 \cdot z) + C_{10} \cdot ch(\gamma_2 \cdot z)) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ H_{2z} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_{11} \cdot sh(\gamma_2 \cdot z) + C_{12} \cdot ch(\gamma_2 \cdot z)) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ B_{2z} = \mu_0 \cdot \mu_2 \cdot H_{2z} \end{cases} \quad (5)$$

Для зоны 1:

$$\begin{cases} H_{1x} = \sin(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_1 \cdot sh(\gamma_1 \cdot z) + C_2 \cdot ch(\gamma_1 \cdot z)) \\ H_{1y} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot y) \cdot (C_3 \cdot sh(\gamma_1 \cdot z) + C_4 \cdot ch(\gamma_1 \cdot z)) \\ H_{1z} = \cos(\alpha \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot y) \cdot (C_5 \cdot sh(\gamma_1 \cdot z) + C_6 \cdot ch(\gamma_1 \cdot z)) \\ B_{1z} = \mu_0 \cdot H_{1z} \end{cases} \quad (6)$$

где H_n – напряженность магнитного поля; C_n – постоянная интегрирования;

$$\gamma_5 = \gamma_3 = \gamma_1 = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}; \gamma_4 = \gamma_2 = \sqrt{k^2 + \alpha^2 + \beta^2}; k^2 = j\mu\sigma\omega;$$

$$\alpha = \frac{\pi}{a}, \beta = \frac{\pi}{b}, \gamma_4 = \gamma_2 = \alpha \sqrt{j\varepsilon + 1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2}};$$

a и b – шаг ячейки индуктора по оси OX и OY соответственно; $\varepsilon = \frac{\mu\sigma\omega a^2}{\pi^2}$ – магнитное число Рейнольдса; ω – угловая частота первичного поля [2].

Решаем данную систему уравнений с использованием следующих граничных условий:

$$\begin{cases} z = \infty : H_{5x} = 0; H_{5y} = 0; B_{5z} = 0 \\ z = h_4 : H_{5x} = H_{4x}; H_{5y} = H_{4y}; B_{5z} = B_{4z} \\ z = h_3 : H_{4x} = H_{3x}; H_{4y} = H_{3y}; B_{4z} = B_{3z} \\ z = h_2 : H_{3x} = H_{2x}; H_{3y} = H_{2y}; B_{3z} = B_{2z} \\ z = h_1 : H_{2x} = H_{1x}; H_{2y} = H_{1y}; B_{2z} = B_{1z} \\ z = 0 : H_{1x} = \cos(\pi \cdot y) \cdot \delta_{пмy}; H_{1y} = \cos(\pi \cdot x) \cdot \delta_{пмx} \end{cases} \quad (7)$$

где $\delta_{пмy}$ и $\delta_{пмx}$ – плотность токов по оси OY и OX соответственно.

После ряда преобразований, выполненных в математическом программном пакете символьной математики *Wolfram Mathematica 8*, находим постоянные интегрирования и, соответственно, все составляющие электромагнитного поля. Используя полученную математическую модель и с учетом приведенных выше допущений, построим графики распределения индукции электромагнитного поля для пятислойной структуры:

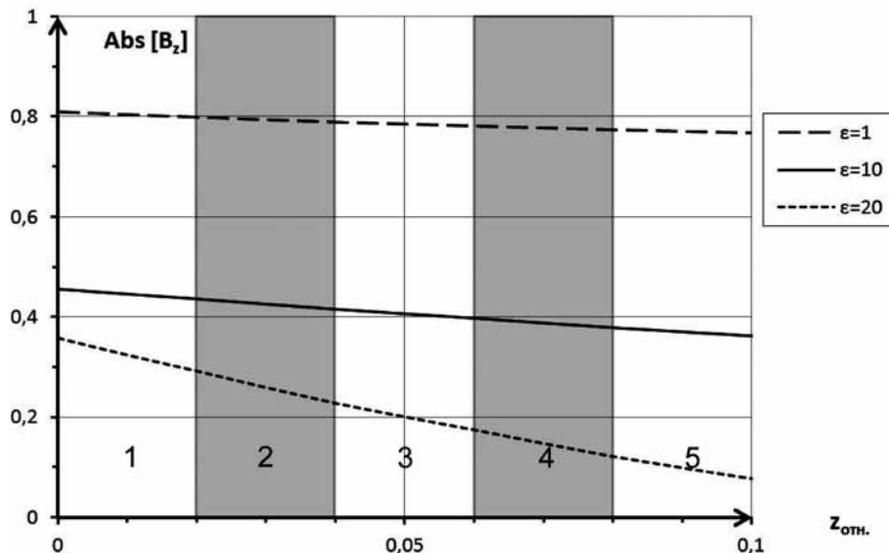


Рис. 2. Изменение нормальной составляющей вектора индукции магнитного поля для различных значений магнитного числа Рейнольдса (ε) для $\mu_{отн.} = 1$ (1, 3, 5 – непроводящие слои; 2, 4 – электропроводящие слои)

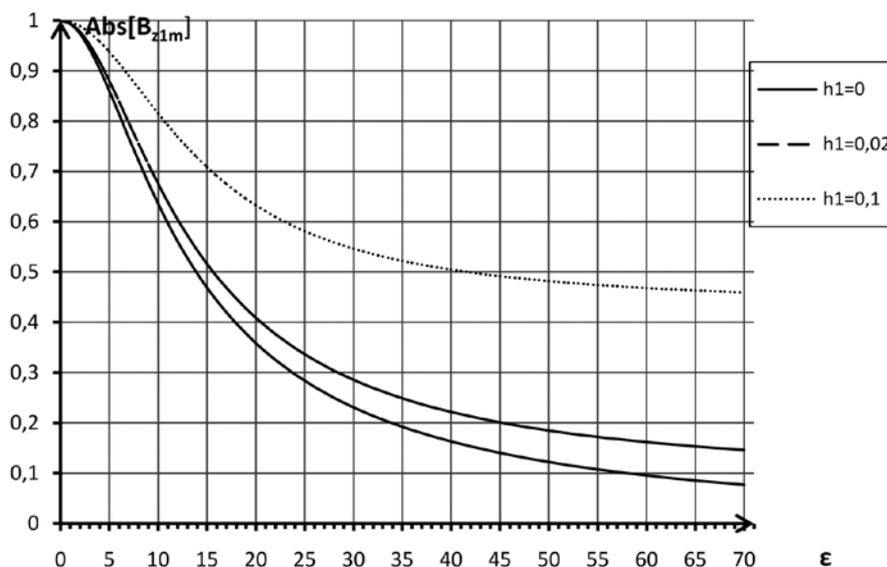


Рис. 3. Изменение нормальной составляющей вектора индукции магнитного поля на поверхности индуктора от различных значений магнитного числа Рейнольдса (ϵ) при $\mu_{\text{отн.}} = 1$ (h_1 – расстояние от индуктора до проводящего слоя 2)

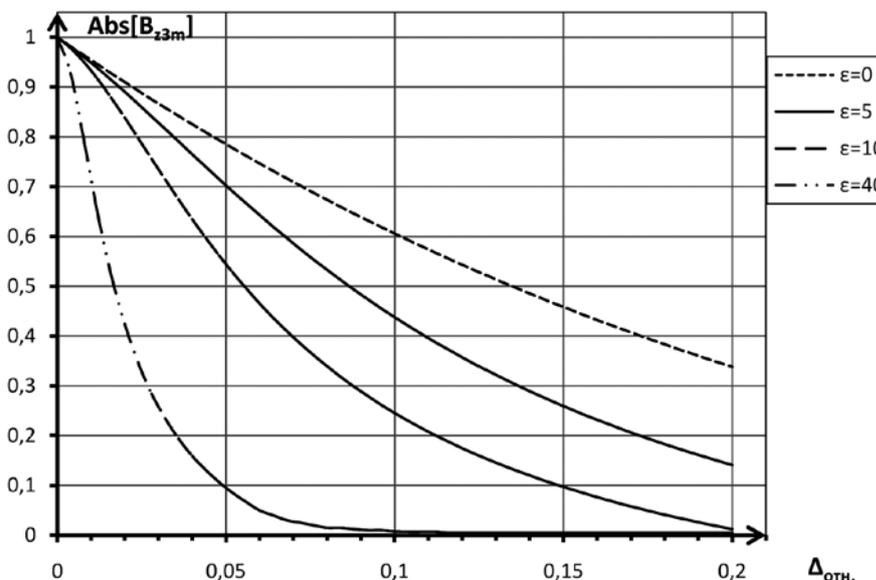


Рис. 4. Изменение нормальной составляющей вектора индукции магнитного поля в воздушном слое 3 от толщины проводящего слоя 2 для различных значений магнитного числа Рейнольдса (ϵ) ($\Delta_{\text{отн.}} = h_2 - h_1$)

Анализ полученных выражений

Анализ полученных зависимостей показывает, что изменение толщины тестируемого материала является достаточно верным диагностическим признаком и может свидетельствовать о наличии трещин, коррозии, наклепа и пр. Таким образом, сравнивая значение составляющей магнитной индукции в зоне возникновения таких дефектов со значением в неповрежденной зоне, можно идентифицировать наличие и характер повреждения.

При отсутствии немагнитного промежутка между индуктором и проводящим слоем, влияние реакции вихревых токов наибольшее и уменьшается по мере увеличения воздушного слоя, ввиду того что

первичное поле затухает в немагнитном пространстве и, соответственно, заметно ослабевает, достигая границы проводящего слоя. Так, при толщине воздушного промежутка, соизмеримой с габаритами индуктора, размагничивающее действие реакции вихревых токов несущественно и мало меняется с ростом магнитного числа Рейнольдса.

Заключение

Полученная математическая модель описывает принципы распределения магнитного поля в многослойной структуре, на основе которых можно построить датчики дефектоскопов, позволяющих исследовать большие по площади поверхности тестируемого материала как в ходе технической проверки,

так и при производстве и эксплуатации электромагнитных экранов, крупногабаритных емкостей и т. п.

Список литературы

1. *Электромагнитные* расчеты в электрических машинах: учеб. пособие [Текст] / И.Х. Хайруллин. – Уфа, 1988. – 72 с.
2. *Хайруллин И.Х.* Исследование пространственного распределения магнитного поля в слоистой структуре [Электронный ресурс] / И.Х. Хайруллин,

Д.М. Гиниятуллин // *Современные проблемы науки и образования.* – 2012. – № 3. – URL: www.science-education.ru/103-6169 (дата обращения: 27.05.2013).

3. *Охременко Н.М.* Магнитное поле плоского индукционного насоса [Текст] / Н.М. Охременко // *Электричество.* – 1964. – № 8. – С. 18.

4. *Охременко Н.М.* Основы теории и проектирования линейных индукционных насосов для жидких металлов [Текст] / Н.М. Охременко. – М.: Атомиздат, 1968. – 396 с.



Шабанов В.А.
Shabanov V.A.

*кандидат технических наук,
доцент, заведующий кафедрой
«Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета,
Россия, г. Уфа*



Хакимов Э.Ф.
Khakimov E.F.

*студент Уфимского государственного нефтяного технического университета,
Россия, г. Уфа*



Шарипова С.Ф.
Sharipova S.F.

*аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета,
Россия, г. Уфа*

УДК 621.31; 62.03

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ ПО КРИТЕРИЮ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В статье рассматривается оценка эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов по критерию снижения энергозатрат на перекачку нефти по технологическому участку эксплуатируемого нефтепровода. Приведена структурная схема программы на компьютере для определения снижения энергозатрат на перекачку нефти и срока окупаемости преобразователей частоты на эксплуатируемых нефтеперекачивающих станциях.

Ключевые слова: магистральный насос, нефтепровод, частотно-регулируемый электропривод, коэффициент полезного действия, нефтеперекачивающая станция.

EFFECYVENESS EVALUATION ALGORITM OF FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE MAIN PUMPS OF OIL PIPELINES OPERATED BY THE CRITERION REDUCING OF ENERGY CONSUMPTION

The article deals with evaluation of frequency-controlled electric main pumps by reducing energy for pumping

oil through the pipeline operated. Shows the block diagram of the program on the computer to determine the reduction of energy for pumping oil and payback period of frequency converters on oil pumping stations operated

Key words: main pump, oil pipeline, frequency-adjustable electric drive, efficiency, oil pumping station.

В настоящее время основным способом регулирования режима работы магистральных нефтепроводов является изменение числа насосов в пределах технологического участка [1, 2]. При подборе числа насосов производительность трубопровода может отличаться от номинальной подачи насосов, при этом магистральные насосы (МН) работают не в оптимальном режиме и их коэффициент полезного действия снижается по сравнению с номинальным значением. В случае, если подбором числа насосов невозможно установить требуемую производительность, используются регуляторы давления, которые устанавливаются на выходах нефтеперекачивающих станций (НПС), или циклическая перекачка. Как подбор числа МН, так и использование регуляторов давления приводят к дополнительным потерям мощности и дополнительному непроизводительному расходу электроэнергии [3, 4]. Поэтому актуальной для НПС задачей является разработка плавного экономически эффективного способа регулирования режимов перекачки. Наиболее экономичным и перспективным способом регулирования режимов работы магистрального нефтепровода является применение высоковольтного частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) магистральных насосов [5, 6]. Целью статьи является разработка алгоритма и программы на компьютере для оценки эффективности ЧРП по критерию снижения энергозатрат на перекачку нефти по технологическому участку эксплуатируемого магистрального нефтепровода.

Основными эксплуатационными документами, содержащими информацию о режимах перекачки эксплуатируемых нефтепроводов, являются карта технологических режимов (КТР) и сведения о соблюдении режимов. В КТР приводится перечень всех возможных режимов перекачки. Для каждого режима указывается производительность нефтепровода и способ его реализации. В том числе указывается схема нефтепровода, число включенных подпорных и магистральных насосных агрегатов, значения давлений на входе НПС $p_{вх}$, в коллекторе $p_{кол}$ и на выходе НПС $p_{вых}$ и т. д. При эксплуатации нефтепровода используется только часть режимов, приведенных в КТР. Режимы, при которых фактически осуществлялась перекачка нефти, и измеренные параметры режима перекачки (производительность, давления на входах и выходах НПС, длительность работы на каждом из режимов, рас-

ход электроэнергии и т. д.) приводятся в сведениях о соблюдении режимов. Для эксплуатируемых нефтепроводов представляет интерес, как изменятся параметры режимов перекачки, указанные в сведениях о соблюдении режимов, и, в первую очередь, расход электроэнергии, если регулирование режимов осуществлять с помощью ЧРП магистральных насосов.

При ЧРП магистральных насосов снижение расхода электроэнергии достигается за счет двух основных факторов: исключение регуляторов давления (дресселирования) и повышение коэффициентов полезного действия (КПД) насосов и электродвигателей при снижении их частоты вращения [7, 8]. При использовании регуляторов давления имеют место дополнительные потери мощности на регулирование в дресселирующих задвижках $\Delta P_{др}$, пропорциональные величине потерь давления в регуляторе ΔP_{op}

$$\Delta P_{op} = \Delta p_{op} \cdot Q_c, \quad (1)$$

$$\Delta p_{op} = p_{кол} - p_{вых}, \quad (2)$$

Q_c – производительность из карты режимов в м³/с.

При использовании ЧРП регулирование давления производится путем изменения частоты вращения МН и потери мощности ΔP_{op} на регулирование давления исключаются.

При номинальной частоте вращения коэффициент полезного действия МН не остается постоянным. При отклонении производительности нефтепровода от значения, равного номинальной подаче насоса, КПД насосов снижается, что сопровождается дополнительными потерями мощности. При изменении частоты вращения максимум графика зависимости КПД насоса от подачи смещается в область меньших подач. Вследствие чего КПД насоса при работе с пониженной производительностью и пониженной частотой вращения оказывается выше, чем при той же подаче, но при номинальной частоте вращения. В результате мощность, потребляемая насосом, от электродвигателя снижается на величину

$$\Delta P_{КПД} = P_{диф} \cdot Q_c \cdot \left(\frac{1}{\eta_{нep}} - \frac{1}{\eta_{рег}} \right), \quad (3)$$

где $P_{диф}$ – дифференциальное давление в Н/м², равное разности давлений на выходе и входе насоса по КТР:

$$P_{диф} = p_{вых} - p_{вх}; \quad (4)$$

$\eta_{нep}$ – КПД насоса при номинальной частоте вращения; $\eta_{рег}$ – КПД насоса при пониженной частоте вращения.

При снижении подачи или частоты вращения КПД насосов может быть определен по выражению [4]

$$\eta_n = \eta_{ном} - (q - v)^2 \cdot \eta_{ном} \cdot v^2, \quad (5)$$

где $\eta_{ном}$ – номинальный КПД; $q = Q/Q_{ном}$ – относительное значение подачи насоса; Q и $Q_{ном}$ – подача и номинальная подача насоса, соответственно; $v = \omega/\omega_{ном}$ – относительная скорость вращения насоса; ω – частота вращения; $\omega_{ном}$ – номинальная частота вращения.

Снижение мощности, потребляемой из электрической сети при использовании ЧРП, при этом рав-

но сумме потерь мощности по выражениям (1) и (3):

$$\Delta P_{ЧРП} = \Delta P_{др} + \Delta P_{КПД} \quad (6)$$

Для анализа энергоэффективности ЧРП на эксплуатируемых нефтепроводах на основе информации из КТР и сведений о соблюдении режимов был разработан алгоритм оценки эффективности ЧРП по критерию снижения энергозатрат на перекачку нефти по технологическому участку эксплуатируемого магистрального нефтепровода. Основные операции и расчеты по разработанному алгоритму с использованием табличного процессора Excel представлены в виде структурной схемы на рисунке 1.

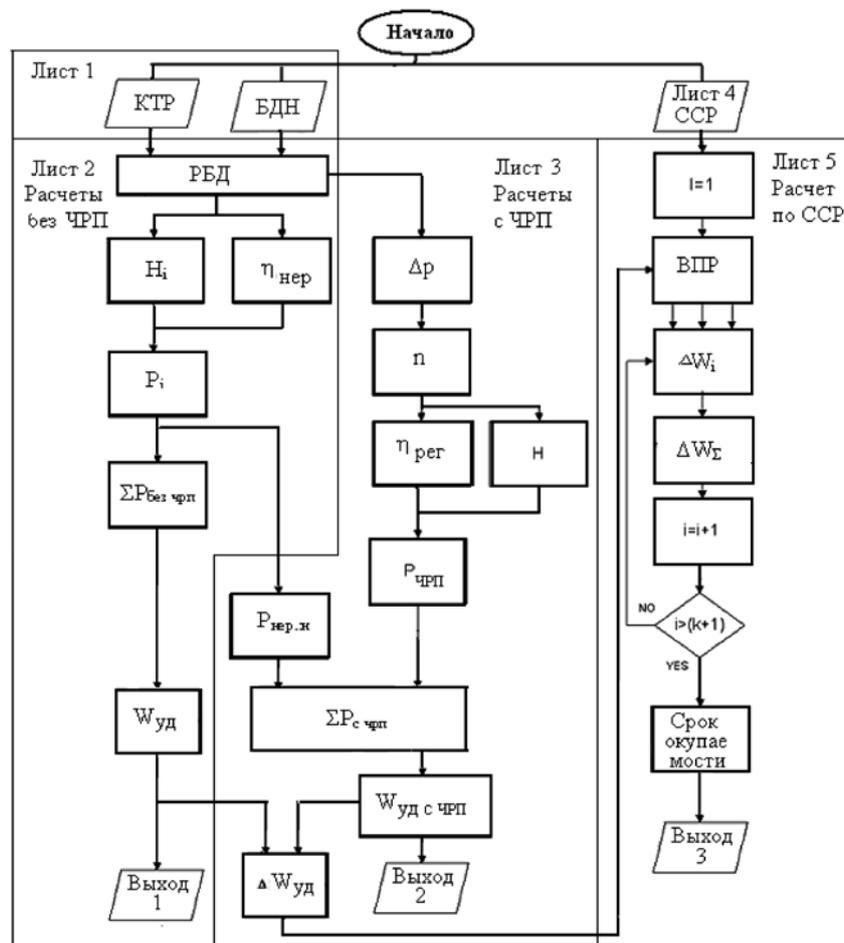


Рис. 1. Структурная схема программы для расчета эффективности ЧРП по критерию снижения расхода электроэнергии

Разработанная программа оценки эффективности ЧРП по критерию снижения расхода электроэнергии при использовании данных из КТР и сведений о соблюдении режимов содержит следующие основные блоки и этапы расчетов.

1. Создаются базы исходных данных (в табличном процессоре Excel создается «лист 1»).

1.1. На основе карты технологических режимов для исследуемого трубопровода создается база

данных «КТР». Фрагмент карты режимов в составе листа 1 для технологического участка «Ленинск – Нурлино» приведен в таблице 1.

В КТР в первом столбце указан режим 001(Сх1) (007). Цифры 001 означают, что на всех пяти НПС технологического участка в работе только один магистральный насос. Во втором столбце указывается производительность трубопровода (пропускная способность) за год, сутки и за два часа. Для

Фрагмент КТР листа 1 для одного из режимов

Вязкость нефти $\eta = 14,43802$ мм ² /с, плотность нефти $\rho = 865,4$ кг/м ³									
№ режима	Пропускная способность	Наименование показателя	ЛПДС «Ленинск»	НПС «Бердяуш»	НПС «Кропачево»	НПС «Улу-Теляк»	НПС «Черкассы-2»	Удельное потребление электроэнергии	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	млн. т./год							кВт·ч/тн	
	тыс. т/сут.							кВт·ч/тыс. км	
	т/2ч								
001(Сх1) (007)	33,15	Тип и кол-во НА	НМ10000х210; 1	-	-	-	-	1,58	
	94,70	Схема работы НА	1п+№ 2(3)	-	-	-	-	4,65	
	7891,67	Рвх. кг/см ²	9,2	11,3	9,9	11,5	1,0		
		Рколл. кг/см ²	33,7	11,3	9,9	11,5	1,0		
		Рвых. кг/см ²	26,0	11,3	9,9	11,5	1,0		
		Мощность, кВт		6225					

каждой из НПС приводятся тип (НМ10000х210) и количество (1) насосных агрегатов (НА): 1п + № 2 (3), что означает, что в работе один подпорный НА и один (№ 2 или № 3) магистральный НА, а также давления на входе, в коллекторе и на выходе каждой НПС. В таблице 1 давление в коллекторе ЛПДС «Ленинск» 33,7 кг/см² не равно давлению на выходе 26,0 кг/см². Это означает, что на ЛПДС «Ленинск» в данном режиме используется регулирование давления и часть давления (7,7 кг/см²) теряется в регуляторе давления. В базу данных листа 1 информация из КТР переносится за весь исследуемый период (например, месяц, год и т. д.).

1.2. Создается база данных по насосным агрегатам (БДН на рис. 1), в которую, кроме паспорт-

ных данных, вносятся коэффициенты аппроксимированных напорных характеристик.

2. Создается лист 2 «Расчеты по КТР без ЧРП», в составе которого создается рабочая база данных (РБД на рис. 1). Рабочая база данных заполняется путем фильтрации. При этом из листа 1 в лист 2 переносятся данные, необходимые для выполнения расчетов по разработанной методике: вид режима, производительность трубопровода в тоннах за два часа, тип и количество насосных агрегатов, давления на входе НПС $p_{вх}$, в коллекторе $p_{кол}$ и на выходе НПС $p_{вых}$.

Примеры ввода исходных данных приведены в таблицах 2, 3 и 4.

Таблица 2

Пример ввода исходных данных по МН

Режим	Q (т/2ч)	Тип и количество НА на НПС				
		НПС 1	НПС 2	НПС 3	НПС 4	НПС 5
004(Сх1)(001)	15750,0	НМ10000x210; 2	НМ10000x210; 1		НМ10000x210 1	
001(Сх1)(203)	10666,7	НМ10000x210; 1				
001(Сх1)(007)	7891,7	НМ10000x210; 1				

Таблица 3

Пример ввода схемы включения НА (для режимов таблицы 2)

Схема работы НА на НПС 1	Схема работы НА на НПС 2	Схема работы НА на НПС 3	Схема работы НА на НПС 4	Схема работы НА на НПС 5
2п + № 1(4),3(2)	№ 3(4)	-	№ 3(4)	-
2п + № 2(3)	-	-	-	-
1п + № 2(3)	-	-	-	-

Таблица 4

Пример ввода давлений на входе $p_{вх}$ и выходе $p_{вых}$ НПС

Режим	$P_{вх1}$	$P_{вх2}$	$P_{вх3}$	$P_{вх4}$	$P_{вх5}$	$P_{вых1}$	$P_{вых2}$	$P_{вых3}$	$P_{вых4}$	$P_{вых5}$
004(Сх1)(001)	9	19,6	19	14,4	11,7	44,2	41,9	19	36,5	12,1
001(Сх1)(203)	10	18,9	10,7	18,6	3,5	33,2	18,9	10,7	18,6	3,5
001(Сх1)(007)	9,2	11,3	9,9	11,5	1	26	11,3	9,9	11,5	1

3. Выполняются расчеты в табличном процессоре Excel в формате листа 2. Для переноса информации из рабочей базы данных в автоматическом режиме используются функции фильтрации и вертикального просмотра. Кроме формул (1)–(6) в расчетах используются формулы, приведенные в [7].

3.1. В блоке H_i по дифференциальному давлению, найденному по выражению (2), и плотности перекачиваемой жидкости ρ определяются напоры каждого насоса

$$H = \Delta p_{диф} / (\rho \cdot g), \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения.

3.2. В блоке $\eta_{пер}$ по формуле (5) при $v = 1$ определяются КПД магистральных и подпорных насосов. При этом номинальная производительность $Q_{ном}$ вводится из исходной базы данных по номеру насоса.

3.3. В блоке P_i определяется мощность, потре-

бляемая электроприводом каждого насоса из электрической сети. При расчетах определяется мощность нагрузки $P_{з.д.}$, коэффициент загрузки $k_{з.д.}$ и КПД каждого электродвигателя.

3.4. В блоке $\sum P_{без}$ ЧРП определяется сумма потребляемых мощностей P_{Σ} по всем магистральным и подпорным насосам. В блоке $W_{уд}$ определяется удельное потребление электроэнергии за один час, отнесенное к производительности нефтепровода в тоннах за час:

$$W_{уд} = \frac{P_{\Sigma}}{Q_{г}}. \quad (8)$$

Результаты всех расчетов заносятся в ячейки листа 2. Пример расчетов расхода электроэнергии на НПС технологического участка (фрагмент листа 2) без использования ЧРП приведен в таблице 5.

Пример расчетов без использования ЧРП (фрагмент листа 2)

Режим	Напор МН по (7), м	КПД МН по (5)	Мощность на валу ЭД, кВт	Коэффициент загрузки ЭД	Мощность из сети без учета потерь в РД, кВт	Мощность из сети на потери в РД, кВт	Суммарная мощность из сети P_{Σ} , кВт	$W_{уд}$ по (8), кВт/т/ч
004(Сх1) (001)	233,76	0,88	5682,3	0,90	5878,4	1512,9	26282,7	3,33
001(Сх1) (203)	267,81	0,76	5128,3	0,81	4925,7	0	7349,3	1,37
001(Сх1) (007)	282,82	0,63	4853,3	0,77	4519,4	1101,4	5937,1	1,50

Примечание. В таблице 5: ЭД – электродвигатель; РД – регулятор давления.

4. В табличном процессоре Excel создается лист «Расчеты по КТР с ЧРП» (лист 3). Организуется автоматический перенос необходимой информации (вид режима, производительность) из листа 2 «Расчеты по КТР без ЧРП» в лист 3 «Расчеты по КТР с ЧРП». В формате листа 3 выполняются следующие расчеты.

4.1. В блоке Δp определяются потери давления и напора на дросселирование на каждой НПС.

$$\Delta H_{op} = \Delta p_{op} / (\rho \cdot g). \quad (9)$$

4.2. В блоке n определяется относительная частота вращения регулируемых МН для исключения дросселирования по выражению.

$$v = \sqrt{1 - \frac{\Delta H_{op}}{a}}. \quad (10)$$

4.3. В блоке $\eta_{пер}$ по формуле (5) определяется КПД насосов с ЧРП.

4.4. В блоке H определяются напоры, развиваемые МН с ЧРП, по формуле

$$H = a \cdot v^2 - b \cdot Q^2. \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) a и b – коэффициенты напорных характеристик насосов.

4.5. В блоке $P_{чрп}$ определяется мощность, потребляемая из сети насосами, на которых устанавливается ЧРП. Расчеты выполняются с учетом КПД преобразователей частоты.

4.6. В блоке $\Sigma P_{нер.н}$ определяется суммарная мощность, потребляемая из сети насосами, на которых ЧРП не устанавливается. Данные по потребленной мощности каждым из МН без ЧРП и подпорными насосами формируются из таблицы «Расчеты по КТР без ЧРП» (лист 2).

В блоках $P_{нер.н}$ и $P_{чрп}$ НПС и МН фильтруются по признаку использования ЧРП и дросселирования (регулирования давления). При фильтрации используется косвенный признак: величина частоты вращения МН: если относительная частота вращения МН на НПС не равна единице, то такой НПС присваивается индекс «1». В блоке $P_{нер.н}$ учитывается также мощность, потребляемая подпорными насосами.

4.7. Определяются суммарные мощности, потребляемые всеми насосами технологического участка как с ЧРП ($P_{чрп}$), так и без ЧРП ($P_{нер.н}$). Суммирование выполняется в блоке $\Sigma P_{с чрп}$.

4.8. В блоке $W_{уд с чрп}$ определяется удельное потребление электроэнергии всеми насосами технологического участка за один час при использовании ЧРП.

Фрагмент расчетов расхода электроэнергии на НПС технологического участка (фрагмент листа 3) при использовании ЧРП для режимов таблицы 5 приведен в таблице 6.

Таблица 6

Пример расчетов при использовании ЧРП (фрагмент листа 3)

Режим	Q, (т/2ч)	$\Delta p_{др}$, кг/см ²	$\Delta H1=$ $\Delta P1/(g \cdot p)$, м	Скорость вращения МН, V	$\Sigma P_{с ЧРП}$, кВт	Удельный расход с ЧРП $W_{уд}$, кВт/(т/ч)
004(Сх1)(001)	15750,00	5,3	61,1	0,87	24827,5	3,15
001(Сх1)(203)	10666,67	0,0	0,0	1	7349,3	1,37
001(Сх1)(007)	7891,67	7,7	88,9	0,81	3746,1	0,95

Из сравнения таблиц 5 и 6 следует, что в режиме 004(Сх1)(001) удельный расход электроэнергии за счет использования ЧРП снизился на 0,18 кВт · ч/т или на 23,8%. В режиме 001(Сх1)(007) удельный расход электроэнергии снизился на 0,55 кВт · ч/т или на 36,6%.

5. Определяется разность значений удельного потребления электроэнергии в режимах перекачки без использования ЧРП и с использованием ЧРП. Эта разность определяется в блоке $\Delta W_{уд}$ и представляет собой снижение расхода электроэнер-

гии на перекачку нефти за один час в результате использования ЧРП.

6. Выполняются расчеты с использованием сведений о соблюдении режимов.

6.1. На основе сведений о соблюдении режимов для исследуемого трубопровода создается база данных (ССР на рис. 1). Для этого в табличном процессоре Excel создается «лист 4». Фрагмент сведений о соблюдении режимов в составе листа 4 приведен в таблице 7.

Таблица 7

Фрагмент данных «Сведения о соблюдении режимов»

Дата	Технологические режимы		Время работы, час		Производительность, тыс. т/сут.	
	план	факт	план	факт	план	факт
Технологические режимы за январь						
12.01	001(Сх1)(007)	001(Сх1)(007)	10	10	37,9	38,6
13.01	002(Сх2)(514)	002(Сх2)(514)	5	5	33,5	32,9
17.01	004(Сх1)(001)	001(Сх5)(002)	18	18	141,8	142

6.2. Создается лист «Расчет по ССР» (лист 5). Организуется автоматический перенос из листа 4 в лист 5 информации о режимах перекачки за рассчитываемый период.

6.3. С помощью функции «вертикальный просмотр» (ВПР на рис. 1) в лист 5 из листа 2 вносится информация о разности удельных значений электроэнергии в режимах без ЧРП и с ЧРП. В блоке ΔW_i определяется снижение расхода электроэнергии в i-м режиме перекачки в режимах с ЧРП по сравнению с режимами без ЧРП. В блоке ΔW_{Σ} про-

изводится суммирование значений ΔW_i за все режимы от первого до i-го.

6.4. В блоке ΔW_{Σ} суммированием по всем режимам и по всем суткам исследуемого периода (например, за месяц или год) определяется снижение расхода электроэнергии. Значение ΔW_{Σ} представляет собой сумму потерь электроэнергии на дросселирование и дополнительных потерь в МН вследствие снижения КПД насосов при производительности трубопровода ниже номинальной подачи насосов.

6.5. В блоке «Срок окупаемости» определяется снижение затрат на электроэнергию и срок окупаемости преобразователя частоты.

Фрагмент расчетов по пункту 6 приведен в таблице 8. Затраты на электроэнергию определены при тарифе 3 руб./кВт·ч.

Таблица 8

Фрагмент расчетов экономии электроэнергии (фрагмент листа 5)

Дата	Режим	$\Delta W_{уд}$, кВт·ч	Q, т/2ч	Время работы на режиме, t, час	Снижение расхода за время t, ΔW , кВт·ч	Снижение затрат за время t, тыс. руб.
01.01.2011	004(Сх1) (001)	0,185	15750,00	7	10186,6	30,6
01.01.2011	001(Сх1) (203)	0	10666,67	17	0	0
...
12.01.2011	001(Сх1) (007)	0,564	7891,67	10	22244,3	66,7
...
Итого за месяц					298000,0	893,0
...
Итого за год						6220,0

В результате расчетов технологического участка «Ленинск – Нурлино» было найдено, что при установке ЧРП только на ЛПДС «Ленинск» экономия затрат на электроэнергию за год будет равна 6,22 млн. руб. При этом срок окупаемости преобразователя частоты при стоимости 50 млн. руб. составит 8 лет.

Выводы

1. Разработан алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов по критерию снижения энергозатрат на перекачку нефти по технологическому участку эксплуатируемого нефтепровода.

2. Разработана структурная схема и компьютерная программы для определения снижения энергозатрат на перекачку нефти и срока окупаемости преобразователей частоты на эксплуатируемых нефтеперекачивающих станциях, основанная на использовании карты технологических режимов и сведений о соблюдении режимов.

Список литературы

1. Коршак А.А. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. для вузов [Текст] / А.А. Коршак, А.М. Нечваль. – Уфа.: ООО «Дизайн-ПолиграфСервис», 2001. – 571 с.

2. Зайцев Л.А. Регулирование режимов магистральных нефтепроводов [Текст] / Л.А. Зайцев, Г.С. Ясинский. – М.: Недра, 1980. – 187 с.

3. Шабанов В.А. Достоинства и перспективы использования частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на НПС [Текст] / В.А. Шабанов, О.В. Кабаргина // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2011. – Т. 2. – С. 63–66.

4. Туманский А.П. Оптимизация режимов перекачки по магистральным трубопроводам с перекачивающими станциями, оборудованными частотно-регулируемым приводом [Текст] / Туманский А.П. // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2005. – № 8. – С. 11–14.

5. Шабанов В.А. Оценка эффективности частотного регулирования магистральных насосов по эквивалентному коэффициенту полезного действия [Электронный ресурс] / В.А. Шабанов, О.В. Кабаргина, З.Х. Павлова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 6. – С. 24–29. – URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_8.pdf.

6. Шабанов В.А., Ахметгареев А.А. К вопросу о выборе оптимального режима работы магистрального насоса при частотно-регулируемом приводе [Текст] / В.А. Шабанов, А.А. Ахметгареев // Транс-

порт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2012. – № 3. – С. 7–10.

7. *Шабанов В.А.* Анализ энергоэффективности частотно-регулируемого электропривода на действующих НПС за счет повышения КПД магистральных насосов [Текст] / В.А. Шабанов, Э.Ф. Хакимов, Н.Л. Пирожник // Нефтегазовое дело. – 2012. – Том 10. – № 2. – С. 55–60.

8. *Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф.* К вопросу об оценке энергоэффективности частотно-регулируемого электропривода на действующих НПС [Текст] / В.А. Шабанов, Э.Ф. Хакимов // Materialy VIII mezinarodnivedecko – praktickakonference «Ve deckyprumyslevropskeho kontinentu – 2012». – Dil 25. Technickevedy. – Praha: PublishingHouse «Education and Science» s.r.o. – С. 20–24.



Яруллин Р.Б.
Yarullin R.B.

*доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Машины, аппараты,
приборы и технологии сервиса» Уфимского
государственного университета экономики
и сервиса, Россия, г. Уфа*



Линенко А.В.
Linenko A.V.

*кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электрические машины и электрооборудование»
Башкирского государственного аграрного
университета, Россия, г. Уфа*

УДК 629.423.1

К ВОПРОСУ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Статья посвящена сравнению математических моделей асинхронного двигателя по уравнениям А.Н. Левина, воспроизводящих его нелинейную статическую характеристику и динамические моменты при пуске и по дифференциальным уравнениям Парка – Горева. Для расчета динамики пуска использован метод визуального моделирования в программном пакете SIMULINK (приложение к Matlab). Анализ динамических характеристик двигателя показывает, что математическая модель, реализованная по дифференциальным уравнениям Парка – Горева, является наиболее оптимальной по предъявленным к ним критериям среди других подобных моделей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, математическая модель, визуальное моделирование, динамическая характеристика.

TO THE QUESTION OF THE ASYNCHRONOUS MOTORS DYNAMIC CHARACTERISTIC

The article is devoted to a comparison of mathematical models of asynchronous motor according to Levins equations. The equations reproduce nonlinear static characteristics and dynamic torque in starting and according to Park-Gorevs differential equations. To calculate starting dynamic the method of visual modeling in software package SIMULINK (application for Matlab) is used. The analysis of motors dynamic characteristics demonstrates that the mathematical model is the most optimized in comparison with other similar models.

Key words: asynchronous motor, mathematical model, visual modeling, dynamic characteristic.

Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электродвигателе оказывают большое влияние на надежность работы электроприводов. Вопросы, связанные с учетом больших пиков электромагнитного момента двигателя, стабильностью времени протекания переходных процессов и т. п., очень важны при проектировании конкретных систем асинхронного электропривода. Действие электромагнитных переходных процессов особенно необходимо учитывать для механизмов, работающих с колебательным движением рабочих органов, в повторно-кратковременных режимах, при импульсном регулировании скорости и других режимах работы асинхронного двигателя [1, 2, 3].

Исследования электромагнитных переходных процессов в асинхронной машине с исчерпывающей полнотой осуществлены во многих работах [4, 5, 6]. При этом система дифференциальных уравнений Парка – Горева, полученная через потокосце-

пления или токи для идеализированной двухфазной машины, может быть решена с достаточной точностью путем применения современных программных продуктов, но для этого требуется определение всех сопротивлений обмоток статора и ротора. Прежде чем приступить к математическому моделированию, уравнения асинхронной машины следует привести к удобному виду, т. е. преобразовать их таким образом, чтобы при минимальном объеме модели точность моделирования была максимальной. Кроме того, и это особенно важно, по виду получающихся дифференциальных уравнений невозможно судить о характере протекающих процессов [6]. Записанные относительно потокосцеплений дифференциальные уравнения асинхронной машины в ортогональной двухфазной системе координат, к примеру, в синхронно вращающихся координатных осях O, X, Y , состоят не менее чем из 5 уравнений, осложняющих их реализацию:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Psi}_{1x} &= U_{1x} - \frac{R_1 X_2'}{X_1 X_2' - X_{12}^2} \Psi_{1x} + \frac{R_1 X_{12}}{X_1 X_2' - X_{12}^2} \Psi_{2x} + \omega_o \Psi_{1y}; \\ \dot{\Psi}_{1y} &= U_{1y} - \frac{R_1 X_2'}{X_1 X_2' - X_{12}^2} \Psi_{1y} + \frac{R_1 X_{12}}{X_1 X_2' - X_{12}^2} \Psi_{2y} + \omega_o \Psi_{1x}; \\ \dot{\Psi}_{2x} &= -\frac{R_2' X_1}{X_1 X_2' - X_{12}^2} \Psi_{2x} + \frac{R_2' X_{12}}{X_1 X_2' - X_{12}^2} \Psi_{1x} + (\omega_o - \omega) \Psi_{2y}; \\ \dot{\Psi}_{2y} &= -\frac{R_2' X_1}{X_1 X_2' - X_{12}^2} \Psi_{2y} + \frac{R_2' X_{12}}{X_1 X_2' - X_{12}^2} \Psi_{1y} - (\omega_o - \omega) \Psi_{2x}; \\ M_{\text{д}} &= \frac{p X_{12}}{X_1 X_2' - X_{12}^2} (\Psi_{1y} \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \Psi_{2y}); \quad \dot{\omega} = \frac{p}{J} (M_{\text{д}} - M_{\text{с}}), \end{aligned} \right\}$$

где $\Psi_{1x}, \Psi_{1y}, \Psi_{2x}, \Psi_{2y}$ – составляющие потокосцеплений статора и ротора в осях X, Y ; U_{1x}, U_{1y} – составляющие напряжения статора; R_1, X_1 – соответственно активное и индуктивное сопротивления статора; R_2', X_2' – соответственно активное и индуктивное сопротивления ротора, приведенные к обмотке статора; X_{12} – сопротивление взаимной индукции между статором и ротором; ω_o – скорость вращения координатных осей; ω – скорость вращения ротора; $M_{\text{д}}$ – электромагнитный момент двигателя; $M_{\text{с}}$ – приведенный к валу двигателя момент сопротивления; p – число пар полюсов; J – приведенный к валу двигателя момент инерции электропривода.

А.Н. Левиным предложено, за счет преобразования формулы Кlossa, динамическую характеристику асинхронного двигателя, воспроизводящую его нелинейную статическую характеристику, и динамические моменты при пуске и торможении противовключением, представить в следующем виде [7]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_{\text{д}} &= (\omega_o - p\omega) M_{\text{в}} - \frac{1}{T_{\text{с}}} M_{\text{д}}, \\ \dot{M}_{\text{в}} &= \frac{2}{T_{\text{с}}} M_{\text{к}} - \frac{1}{T_{\text{с}}} M_{\text{в}} - (\omega_o - p\omega) M_{\text{д}}, \end{aligned} \right\}$$

где ω_o – угловая частота переменного тока; p – число пар полюсов; $T_{\text{с}}$ – электромагнитная постоянная времени, $T_{\text{с}} = \frac{1}{\omega_o s_{\text{к}}}$; $M_{\text{в}}$ – вспомогательная переменная, имеющая размерность момента; $s_{\text{к}}$ и $M_{\text{к}}$ – критические скольжение и момент двигателя.

В этом случае коэффициенты при переменных определяются просто на основе доступной информации, которая дается в каталогах. Результаты расчетов механической характеристики по формуле Кlossa дают явно заниженные до 30 % значения пускового и номинального моментов для двигателя по статической характеристике и не учитывают вогнутость в неустойчивой части. Корректировка ме-

ханической характеристики по пусковому моменту превышает значения моментов номинального на 60% и минимального на 25% [6]. Поэтому механическую характеристику, проходящую через 4 характерные точки, полученные на основе данных из каталога (при $s = 0; s_n; s_k; 1$), предлагается В.Н. Андриановым определять по аппроксимирующей функции [8]:

$$M_D = \frac{M_K (2 + q_m)}{s/s_k + s_k/s + q_m},$$

где q_m – переменный коэффициент, равный:

$$q_m = q_{mn} + \frac{q_{mn} - q_{mn}}{(1 - s_n)^\gamma} (1 - s)^\gamma,$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_D &= (\omega_0 - p\omega)M_B - \frac{1}{T_\Omega} M_D, \\ \dot{M}_B &= \frac{2 + q_m}{T_\Omega} M_K - \frac{1}{T_\Omega} M_B - \left[(\omega_0 - p\omega) - \frac{q_m}{T_\Omega} \right] M_D \end{aligned} \right\}$$

В связи с вышесказанным встает вопрос сравнительной оценки точности получаемых динамических характеристик описанных математических моделей асинхронной машины и тем самым возможности применения уточненной математической модели А.Н. Левина.

В настоящее время удобным инструментом анализа динамических режимов работы электромеханических систем является аппарат структурных схем, широко применяемый при исследовании электроприводов и систем управления ими. Данный подход эффективно использует метод визуального моделирования в программном пакете типа Simulink (приложение к Matlab) с ориентацией на современную вычислительную технику [9, 10].

Описанные математические модели были реализованы в среде визуального моделирования Simulink, и система дифференциальных уравнений Парка – Горева для асинхронного двигателя в синхронно вращающихся координатных осях О, X, Y имеет вид, представленный на рисунке 1.

где $q_{m(n,n)}$ – коэффициент при номинальном и пусковом режимах, равный:

$$q_{m(n,n)} = ((s_{(n,n)}/s_k + s_k/s_{(n,n)}) M_{(n,n)}^* - 2\mu_k) / \mu_k - M_{(n,n)}^*$$

где $M_{(n,n)}^*$ – относительный момент ($M_n^* = 1$ и $M_n^* = \mu_n$); μ_k – кратность критического момента; γ – показатель степени (при $q_{mn} < q_{mn}$ $\gamma = 0,5$; при $q_{mn} > q_{mn}$ $\gamma = 1,5$).

Тогда с учетом последнего уточненная динамическая характеристика асинхронного двигателя будет иметь вид:

В качестве объекта исследования был выбран асинхронный двигатель А051-4 со следующими параметрами схемы замещения: $R_1 = 1,2$ Ом; $R'_2 = 0,95$ Ом; $X_1 = 2,64$ Ом; $X'_2 = 3,91$ Ом; $X_{12} = 62,4$ Ом; $U = 220$ В; $\omega_0 = 314$ рад/с. Математические модели были широко исследованы, и в качестве примера на рисунке 2 приведены динамические характеристики двигателя при его пуске вхолостую по уравнениям А.Н. Левина и Парка – Горева.

Вывод. Анализ полученных данных показывает, что математическая модель А.Н. Левина учитывает в основном только статическую характеристику двигателя и является упрощенным подходом к изучению динамики асинхронной машины и тем самым не может быть применена для изучения переходных процессов при проектировании конкретных систем асинхронного электропривода. Кроме того, по уравнениям А.Н. Левина невозможно исследовать динамику асинхронного двигателя при несимметричном режиме его работы, в том числе несимметрии питающего напряжения.

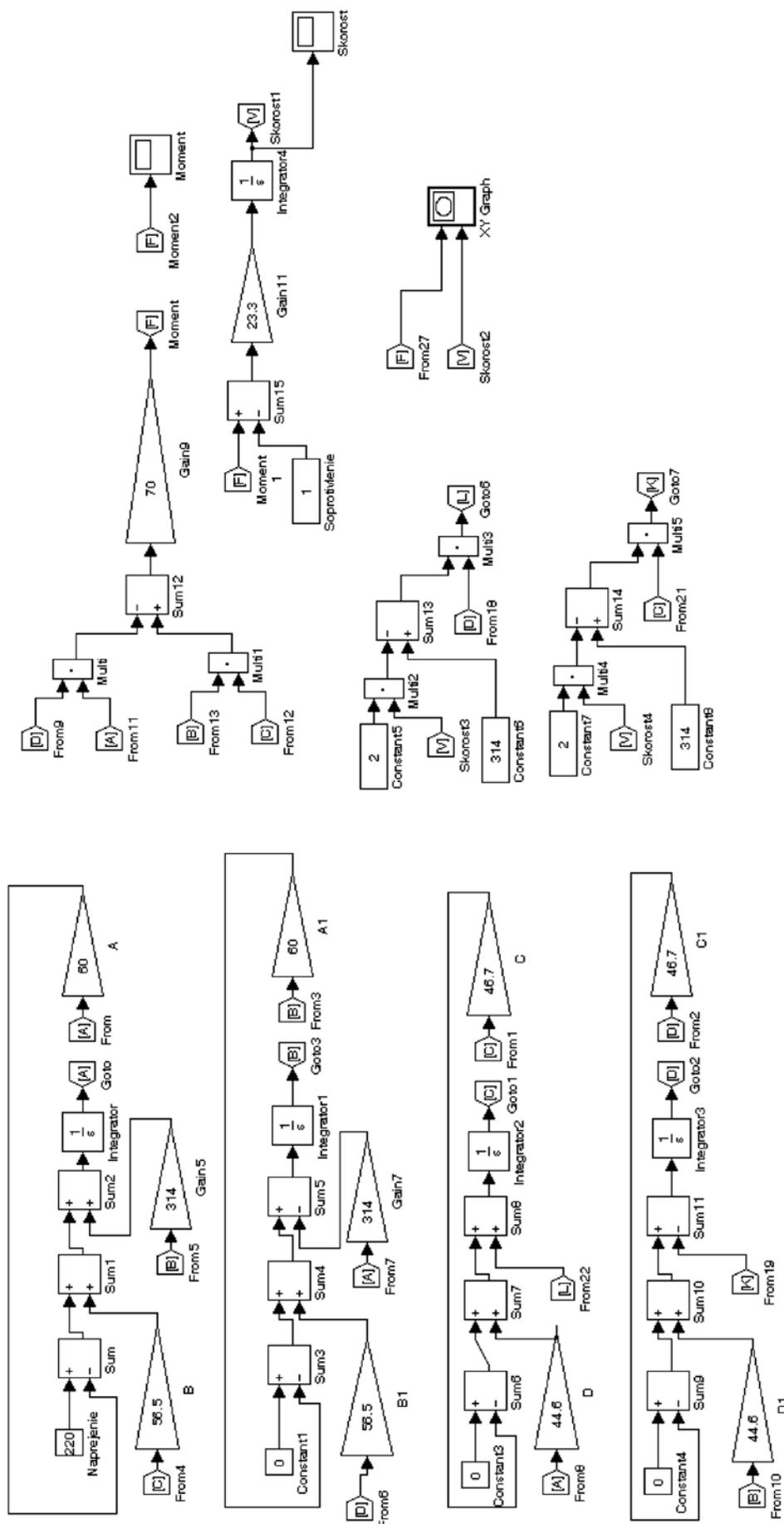


Рис. 1. Вид математической модели асинхронного двигателя по уравнениям Парка – Горева в среде Matlab [Simulink]

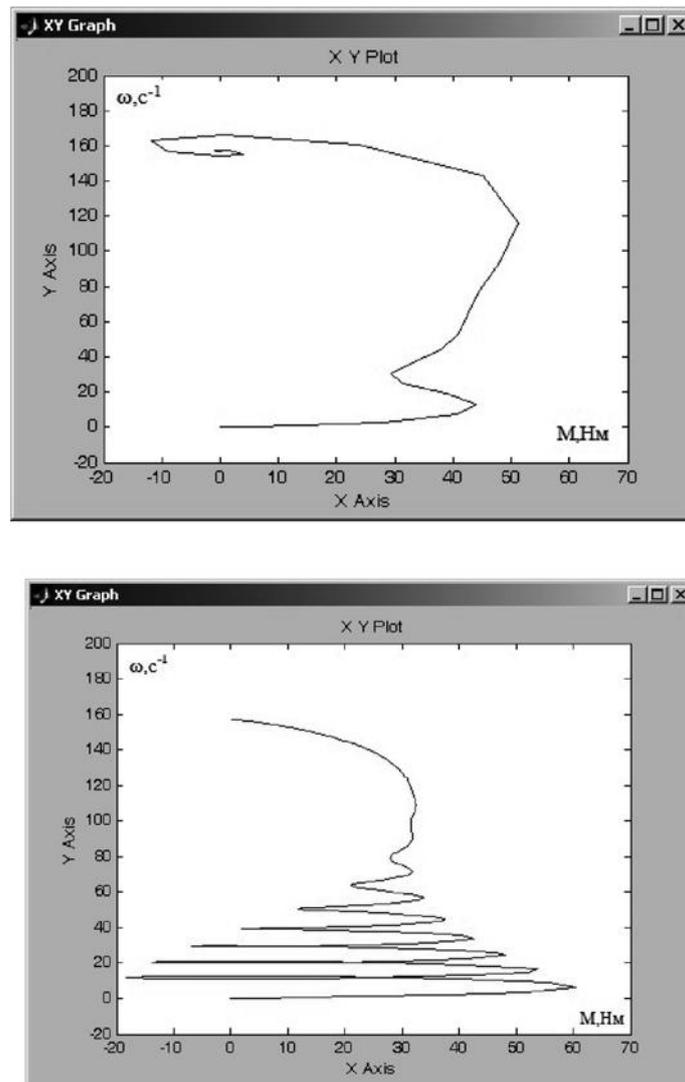


Рис. 2. Динамические механические характеристики асинхронного двигателя при его пуске вхолостую:

а) по уравнениям А.Н. Левина; б) по уравнениям Парка – Горева

Список литературы

1. Яруллин Р.Б. Уравнение движения асинхронного электропривода виброзерноочистительной машины с регулируемыми параметрами [Текст] / Р.Б. Яруллин // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 5. – С. 10–12.
2. Яруллин Р.Б. Асинхронный электропривод многорешетной виброзерноочистительной машины с регулируемыми параметрами [Текст] / Р.Б. Яруллин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 1. – С. 52–60.
3. Линенко А.В. Моделирование работы линейного асинхронного электродвигателя [Текст] / А.В. Линенко, В.Ф. Гильванов // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2010. – № 3. – С. 19–21.
4. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов [Текст] / И.П. Копылов. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2004. – 607 с.

5. Сипайлов Г.А. Математическое моделирование асинхронных машин [Текст] / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.
6. Петров И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода [Текст] / И.И. Петров, А.М. Мейстель. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.
7. Левин А.Н. Математическое моделирование приводов машин – орудий. Динамика машин [Текст] / А.Н. Левин. – М.: Наука, 1980. – С. 94–99.
8. Регулируемые асинхронные электродвигатели в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В.Н. Андрианов, Д.Н. Быстрицкий, А.В. Павлов, Е.М. Чебуркина. – М.: Энергия, 1975. – 400 с.
9. Дьяконов В. Математические пакеты расширения МАТЛАБ. Специальный справочник [Текст] / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: – Питер, 2001. – 480 с.
10. Дьяконов В. Simulink 4: Специальный справочник [Текст] / В. Дьяконов. – СПб.: – Питер, 2002. – 528 с.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS



Абдрахимов Ю.Р.
Abdrahimov Yu.R.

доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Промышленная
безопасность и охрана труда»
Уфимского государственного
нефтяного технического
университета,
Россия, г. Уфа



Федосов А.В.
Fedosov A.V.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Промышленная
безопасность и охрана труда»
Уфимского государственного
нефтяного технического
университета,
Россия, г. Уфа



Алексева И.Э.
Alekseeva I.E.

студентка
Уфимского государственного
нефтяного технического
университета,
Россия, г. Уфа

УДК 004.9:658

ПРОВЕДЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОТБОРА ПЕРСОНАЛА С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В статье рассмотрен вопрос периодического психофизиологического обследования. В качестве решения данного вопроса предлагается рассмотреть аппаратный комплекс СМОДИК. Оценены положительные стороны комплекса и его практическое применение в целях психофизиологического обследования.

Ключевые слова: психофизиологический отбор, аппаратный комплекс, глаза, макроскопическое изображение, физиологические затраты.

CARRYING OUT PROFESSIONAL STAFF SELECTION BY MEANS OF MODERN INFORMATION SYSTEMS

In this article were reserved questions of physical survey. As a solution to this issue is proposed to consider the hardware system SMODIK. Appreciated the positive side of the complex and its practical application to psychophysiological examination.

Key words: psychophysiological selection, hardware system, eyes, macroscopic image, psychophysiological selection.

Две трети аварий и несчастных случаев происходит по вине человеческого фактора. Оценка психофизиологических качеств человека является одной из актуальных задач для обеспечения безопасности. Учитывая это, при работе на опасных производственных объектах целесообразно проводить психофизиологическое обследование.

Система мониторинга, диагностики и коррекции потенциала трудоспособности работников (СМОДИК) была создана в результате многолетней научной и практической работы в области психофизиологии с помощью новой технологии ранней диагностики, основанной на теории функциональных систем академика П.К. Анохина. В настоящее время

на базе этой системы разработано техническое оснащение на современной электронной базе для выявления начальных стадий отклонений психофизиологических функций у работников, определяющих состояние их трудоспособности. Использование метода СМОДИК позволяет полностью решить проблему доклинической диагностики и коррекции нарушений здоровья работника в реальных производственных условиях.

Приборы телевизионной системы СМОДИК состоят из специальной видеокамеры сверхвысокой чувствительности, увеличивающей изображение передних участков глаза при сохранении естественной цветопередачи и оптических узлов, создающих освещение с безвредными характеристиками освещения (рис. 1, 2).

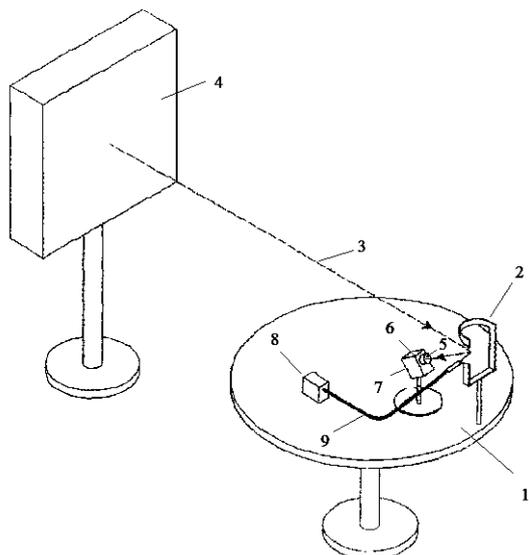


Рис. 1. Структура аппаратного комплекса:

- 1 – инструментальный столик; 2 – опора для головы;
3 – линия зрительной оси человека; 4 – экран (монитор);
5 – объектив камеры; 6 – камера; 7 – регулируемый штатив;
8 – источник света; 9 – световод



Рис. 2. Аппаратный комплекс системы мониторинга, диагностики и коррекции потенциала трудоспособности работников

Исследование проводят с помощью анализа микроскопического изображения передней части глаза по динамическим изменениям цветовых тонов и структуры их распределения.

Голову человека фиксируют на опоре для головы, установленной на инструментальном столике, в которой имеется возможность изменения высоты. К опоре крепится подвижное устройство, позволяющее подводить к лицу и фиксировать световод, который направляет свет на обследуемую зону. К обследуемой зоне направляется объектив камеры, позволяющей получать изображение на низкой освещенности и иметь объектив с переменным фокусным расстоянием. Камера может формировать изображения с различным масштабом, регистрирует разницу в цветовом тоне симметричности структуры и представляет изображение на экране в виде голограммы. Параметры освещения играют важную роль в получении необходимых диагностических признаков и одновременно безвредны для глаз, так как приближены к естественному природному солнечному освещению ($E = 300 \text{ Лк}$, $T_{\text{ц}} = 3200 \text{ К}$). Угол падения света регулируется специалистом в ходе обследования. Питание производится через понижающий трансформатор (на чертеже не показан) [2].

Изображение снимают и выводят на экран (рис. 3, 4), определяют степень отклонения исследуемых систем функционирования организма человека от нормы. Затем воздействуют внешними раздражителями, добиваются их возвращения к нормальному состоянию и наблюдают изменения цвета глаз.



Рис. 3. Глаз больного человека

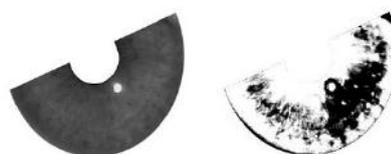
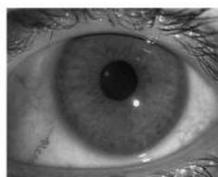


Рис. 4. Глаз здорового человека

Телевизионное макроскопическое изображение цветной голографической картины глаза на экране монитора производит на обследуемого положительное психофизиологическое воздействие, а в дальнейшем при осуществлении нелекарственной коррекции позволяет ему самому оценивать свое состояние по изменению насыщенности цветных тонов.

Программа позволяет осуществлять количественную обработку снимаемых физиологических

показателей и таким образом формализовать степень физиологических затрат каждого работника в относительных условных единицах, относя его к одному из четырех уровней по критерию физиологических затрат, и данные отображаются в отчете (рис. 5).

Степень физиологических затрат на производственную деятельность каждого обследованного работника количественно отражает возможности его профессиональной трудоспособности (табл. 1, 2).

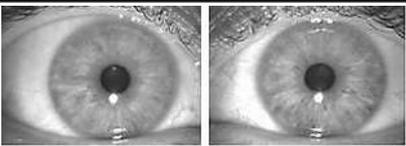
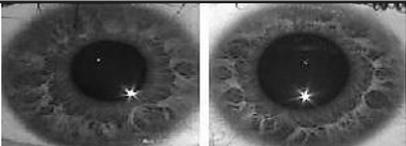
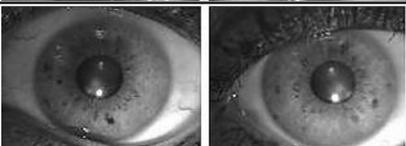
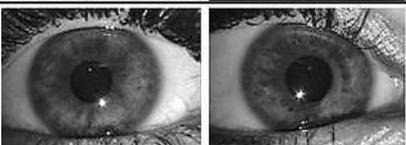
Таблица 1

Соотнесение физиологических затрат на профессиональную деятельность обследуемых работников и стадий развития адаптации

Стадии развития адаптационного синдрома		Уровни физиологических затрат на профессиональную деятельность (утомление – переутомление)	
Класс	Состояние	Уровень	Физиологические затраты
Первый	Удовлетворительное	Первый	Низкие
Второй	Напряженное	Второй	Средние
Третий	Перенапряженное – неудовлетворительная адаптация	Третий	Значительные – переутомление
Четвертый	Преморбидное – срыв адаптационных процессов	Четвертый	Максимальные – переутомление, «группа риска»

Таблица 2

Определение уровней здоровья

Уровень I		Здоров. Устойчив к влиянию внешней среды
Уровень II		Не устойчив к влиянию внешней среды
Уровень III		Хроническая усталость, группа риска
Уровень IV		Группа риска

Это позволяет по соотношению показателей (в процентах) определять уровень профессионального риска работников структурных подразделений и производственного риска нефтедобывающего предприятия в целом.

В момент проведения мониторинга диагностическая информация заносится на электронные носители и в последующем обрабатывается по специально разработанной вспомогательной экспертной программе.

Диагностическое время в режиме мониторинга одного работника с помощью аппаратуры модуля СМОДИК составляет в среднем 3–6 мин. Последующая подробная обработка данных мониторинга с созданием персонального файла по различным показателям, определяющим профессиональную трудоспособность работника, занимает не более 30 мин. После мониторинга трудоспособности работников с каждым из них проводится нелекарственная реабилитация, направленная на возвращение физиологических показателей к норме, а также специальная поведенческая коррекция – обучение приемам и навыкам адекватного поведения.

Таким образом, применение аппаратного комплекса СМОДИК позволяет реагировать на начальные стадии нарушения дисфункции в организме человека при отсутствии каких-либо выраженных

клинических симптомов заболевания, опережая клинические обследования, и потери трудоспособности.

Список литературы:

1. *Безопасность жизнедеятельности*. Производственная безопасность и охрана труда: учебн. пособие для вузов [Текст] / П.П. Кукин и др. – М.: Высшая школа, 2001. – 416 с.

2. *Патент* РФ № 2236164, МПК А 61 В 3/00, А 61 М 21/00. Способ исследования состояния и коррекции систем функционирования организма человека и устройство для осуществления этого способа [Текст] / А.Б. Фролов, Л.Н. Артюх – № 2000131736/09; заявл. 21.04.03; опубл. 20.09.04, бюл. № 23 (II ч.). – 8 с.

3. *СМОДИК-система оздоровления*: [Электронный ресурс]. – URL: [http:// www.cmodik.ru](http://www.cmodik.ru) (дата обращения: 14.05.2013 г.).



Ильясов И.Р.

Ilyasov I.R.

геолог

ОАО «Газпромнефть-
Ноябрьскнефтегаз»,
Россия, г. Ноябрьск



Мухамадиев А.А.

Mukhamadiev A.A.

кандидат технических наук,
доцент кафедры

«Информационно-измерительная
техника»

Уфимского государственного
авиационного технического
университета,
Россия, г. Уфа



Ураксеев М.А.

Urakseev M.A.

доктор технических наук,
профессор кафедры

«Информационно-измерительная
техника»

Уфимского государственного
авиационного технического
университета,
Россия, г. Уфа

УДК 004.9:658

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ АНАЛИЗА ВОДНОЙ СРЕДЫ

Предложено использование акустооптического измерительного преобразователя для количественного и качественного анализа состава водной среды. Описан принцип действия акустооптического измерительного преобразователя для анализа водной среды. Представлен алгоритм работы акустооптического измерительного преобразователя. Приведено программное обеспечение, реализующее данный алгоритм.

Ключевые слова: акустооптический измерительный преобразователь, количественный состав, качественный состав, водная среда, акустооптический перестраиваемый фильтр.

ACOUSTO-OPTIC MEASURING CONVERTERS FOR INFORMATION-MEASURING SYSTEMS OF THE ANALYSIS OF THE WATER ENVIRONMENT

Usage of the acousto-optic measuring converter for quantitative and qualitative analysis of composition of the water environment is offered. The principle of action of the acousto-optic measuring converter for the analysis of the water environment is described. The algorithm of operation of the acousto-optic measuring converter is presented. The software implementing given algorithm is resulted.

Key words: the acousto-optic measuring converter, the quantitative composition, qualitative composition, the water environment, the acousto-optic tunable filter.

В последние годы индустриальное воздействие и жизнедеятельность человека оказывают все большее негативное воздействие на водную среду. Также ситуация осложняется уменьшением годовой суммы осадков в сочетании с нарастанием продолжительности и степени выраженности сухого периода, что приводит к понижению уровня грунтовых вод, а следовательно, к истощению водной среды. В этих условиях необходимо обеспечить высокое качество мониторинга водной среды, что требует постоянного контроля экологической обстановки для своевременного принятия неотложных мер по сохранению в допустимых пределах уровня ее загрязнения. В связи с этим возникает необходимость постоянного количественного и качественного анализа состава водной среды. Для обеспечения подобного анализа необходимы информационно-измерительные системы анализа водной среды, важнейшим элементом которых являются измерительные преобразователи.

Применяемые в настоящее время измерительные преобразователи не отвечают в полной мере возросшим требованиям к устройствам измерения по точности, надежности, быстродействию, номенклатуре измеряемых веществ, стабильности характеристик, чувствительности и т. д. В связи с этим важной научной задачей является совершенствование измерительных преобразователей.

Для решения данной задачи авторами предлагается использовать акустооптический измерительный преобразователь для количественного и качественного анализа состава водной среды. Ключевым элементом является акустооптический перестраиваемый фильтр, обладающий большим количеством положительных характеристик. Акустооптические перестраиваемые фильтры позволяют исследовать спектральный состав электромагнитного излучения по длинам волн в оптическом диапазоне, найти спектральные характеристики излучателей и объектов, взаимодействующих с излучением. Их перестройка осуществляется путем «сви́пирования» несущей частоты акустической волны. Основное предназначение – выделение из широкого спектра

составляющей с узким спектральным диапазоном и перестройка центральной волны этого диапазона в соответствии с управляющим сигналом [3, 6].

Целью данной работы является разработка акустооптических измерительных преобразователей для информационно-измерительных систем анализа водной среды.

Необходимо разработать измерительные преобразователи, удовлетворяющие требованиям государственных стандартов и превосходящие по некоторым параметрам существующие аналоги.

В ходе выполнения работы авторами разработан акустооптический измерительный преобразователь для количественного и качественного анализа состава водной среды, отличающийся повышенными технико-эксплуатационными характеристиками.

Достоинства акустооптического измерительного преобразователя связаны с тем, что акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ), являющийся ключевым элементом, заменяет движущие элементы конструкции (зеркала, призмы и т. п.). Очевидны следующие достоинства: быстродействие (исключена инерционность механических элементов); надежность (нет перемещения, следовательно, нет трения и вызванных им поломок); точность (нет люфтов, малая чувствительность к вибрации); возможность измерения в реальном режиме времени; миниатюрность (можно выполнить стационарную систему в переносном варианте); многофункциональность (обладает рядом новых свойств, например, управляемостью характеристик) [2].

Акустооптический измерительный преобразователь количественного и качественного анализа состава водной среды работает следующим образом (рис. 1). Источник излучения I создает световое излучение, падающее на исследуемую водную среду 2. Излучение затем проходит через кювету с исследуемой жидкостью, где часть излучаемой энергии поглощается в зависимости от природы вещества, находящегося в водной среде. Далее излучение попадает на акустооптический измерительный преобразователь, представляющий собой АОПФ и многоэлементный фотоприемник.

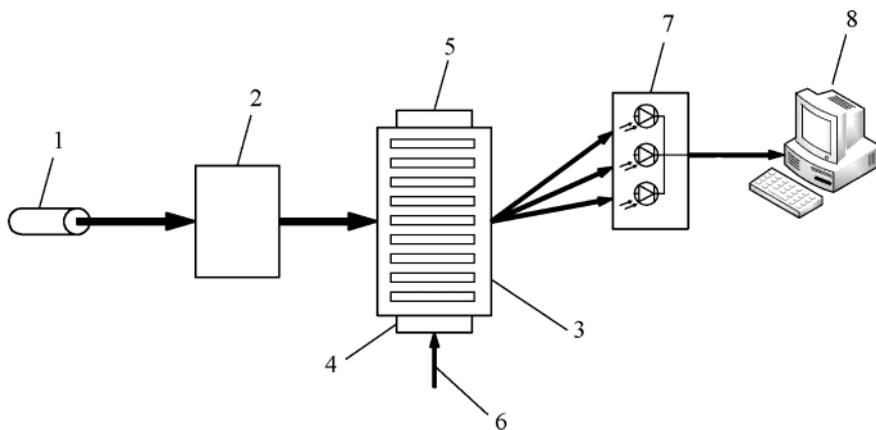


Рис. 1. Принцип действия АОС

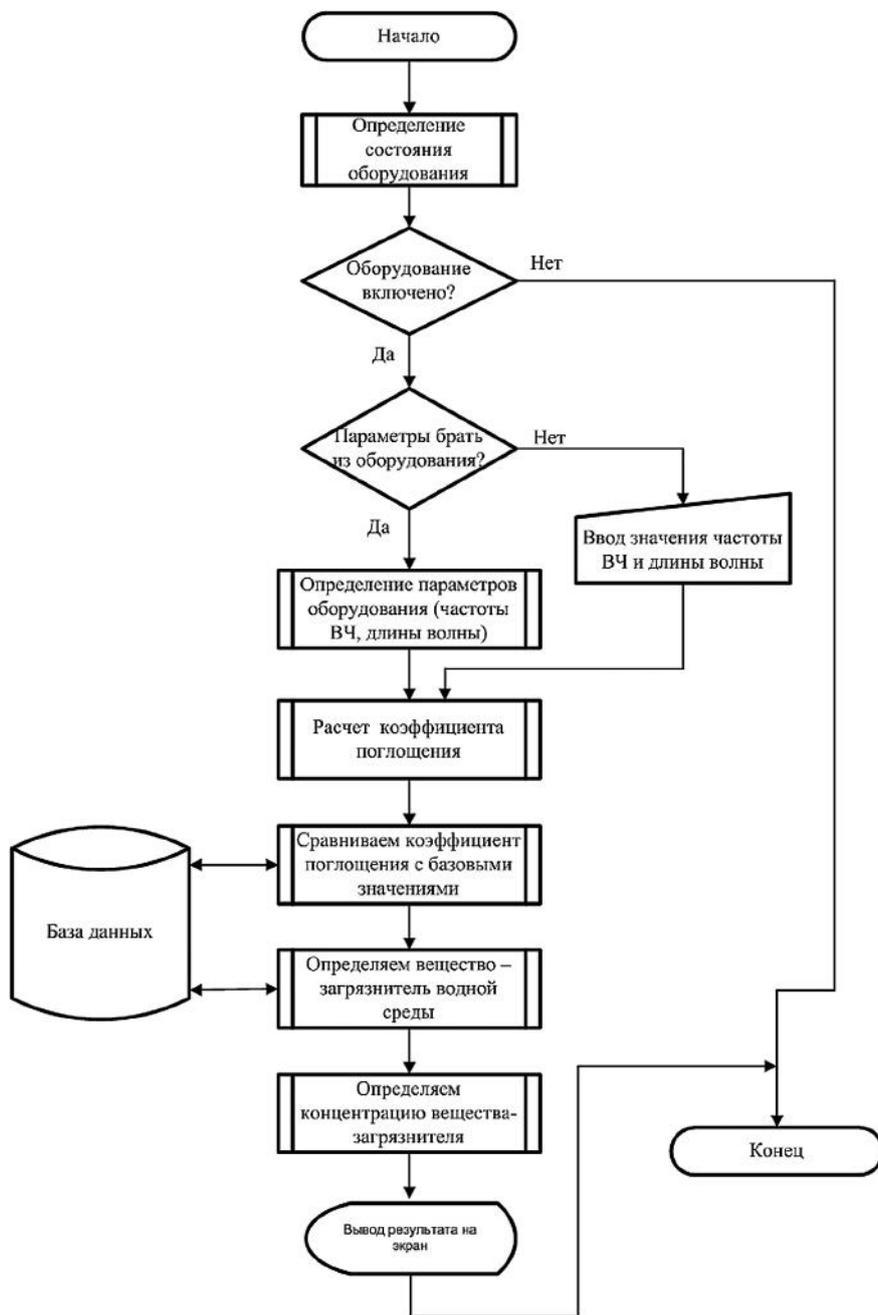


Рис. 2. Обобщенный алгоритм работы

по сигналам от блока управления на базе микроконтроллера АТ90S8515 14. Электрический сигнал, полученный от фотоприемника 9, усиливается усилителем 10, коэффициент передачи которого устанавливается (подбирается) с блока управления 14, детектируется синхронным детектором 11 и поступает в блок обработки и индикации 12.

Трансформирующий объектив 17 применяется при дистанционных измерениях. Возвращаемый угловым отражателем 6 световой пучок вновь трансформируется по угловой и пространственной апертуре к исходным размерам.

Таким образом, применение акустооптического водоанализатора позволяет повысить точность измерения состава воды, увеличить быстродействие и чувствительность, уменьшить массу и габаритные размеры существующих устройств анализа воды и получить возможность проведения экологического мониторинга как с отбором проб в полевых условиях, так и дистанционно.

Практическая значимость результатов исследований заключается в следующем: разработан новый класс устройств – акустооптические измерительные преобразователи, разработан обобщенный алгоритм работы и программное обеспечение, обеспечивающее его корректную работу.

Список литературы

1. *Ильясов И.Р.* Математическая модель акустооптического преобразователя для информационно-измерительной системы анализа водной среды [Текст] / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев // Датчики и системы. – 2012 – № 12. – С. 35.
2. *Ильясов И.Р.* Основные этапы становления и развития акустооптики в XX веке [Текст] / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов, М.А. Ураксеев // История науки и техники. – 2010. – № 3, спецвыпуск № 1. – С. 34–37.
3. *Ильясов И.Р.* Принципы построения акустооптических спектрометров для информационно-измерительных систем анализа водной среды [Текст] / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев // Датчики и системы. – 2011. – № 9. – С. 26.
4. *Ильясов И.Р.* Система мониторинга водной среды на основе акустооптического спектрометра [Текст] / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 7. – С. 46–48.
5. *Ильясов И.Р.* Современные методы и аппаратные средства для систем экологического мониторинга водной среды [Текст] / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев // Экологические системы и приборы. – 2010. – № 5. – С. 20–23.
6. *Ильясов И.Р.* Становление и развитие акустооптических методов и средств информационно-измерительных систем экологического мониторинга водной среды [Текст] / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев // История науки и техники. – 2010. – № 6, спецвыпуск № 2. – С. 132–136.
7. *Патент* РФ № 101194 на ПМ. Акустооптический водоанализатор [Текст] / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – Заявка № 2010128152/28 от 07.07.2010 г.
8. *Патент* РФ № 101213 на ПМ. Акустооптический спектрометр для экологического мониторинга водной среды [Текст] / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет». – Заявка № 2010127992/28 от 06.07.2010 г.
9. *Свидетельство* об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012615310. Управление, анализ и обработка результатов измерения акустооптическим преобразователем / И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев; заявители и правообладатели И.Р. Ильясов, А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев. – Заявка № 2012611806 от 12.03.2012 г.



Киргизов Д.И.
Kirgizov D.I.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Естественно-
научные дисциплины»
Бугульминского филиала «Казанский
национальный исследовательский
технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ»,
Россия, г. Бугульма



Иванов А.А.
Ivanov A.A.

руководитель группы
ООО «ТНГ-Групп»,
Россия, г. Бугульма



Шерстюков О.Н.
Sherstyukov O.N.

доктор физико-математических
наук, профессор,
зав. кафедрой «Радиофизика»
Казанского (Приволжского)
федерального университета,
Россия, г. Казань

УДК 550.8.028

АППАРАТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ ДЛЯ ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Описывается модульно-сетевой подход, примененный при разработке программного обеспечения автоматизированной интеллектуальной системы геолого-технологических исследований (ГТИ), основанной на беспроводной системе сбора данных с датчиков. Модульно-сетевая архитектура позволила создать гибкую масштабируемую систему ГТИ с возможностью динамического подключения различных функциональных аппаратных и программных модулей для сбора и обработки данных.

Описываются радиопередающие модули, являющиеся основой аппаратного обеспечения автоматизированной интеллектуальной системы геолого-технологических исследований, а также средства управления и мониторинга основных технологических параметров.

Ключевые слова: геолого-технологические исследования, радиопередающие модули, автономное питание.

HARDWARE AND SOFTWARE FOR WIRELESS MUD LOGGING TELEMETRY SYSTEM

It is described a modular network approach applied while the development of the automated intellectual system software for Mud Logging operations based on wireless system of data recording from the sensors. Modular network architecture has allowed generating of a flexible scalable Mud Logging system with the ability of dynamic hooking up to the different functional software and hardware modules for data recording and processing.

Radio transmitting modules are described being the basis of the hardware of the automated intellectual system for Mud Logging as well as the controlling and monitoring means of the main technological parameters.

Key words: Mud Logging, radio transmitting modules, self-contained power supply.

Введение

В работе описывается модульно-сетевой подход, примененный при разработке автоматизированной интеллектуальной системы сбора, хранения и передачи геолого-технологических и геофизических дан-

ных (далее АИС). Описываемая система представляет собой аппаратно-программный комплекс (АПК), решающий большой спектр задач по автоматизации геолого-технологических исследований (ГТИ) в процессе строительства скважины, включая измерения

и регистрацию первичных физических параметров, комплексную обработку результатов измерения, оперативный мониторинг бурения скважины, расчет технологических и экономических параметров, генерацию отчетов и построение геологических разрезов.

Рассматриваемая система АИС решает следующие основные задачи:

- прием данных с беспроводной сети датчиков ГТИ посредством радиоканала;
- первичная и вторичная обработка данных;
- расчет и визуальное наблюдение основных параметров ГТИ;
- регистрация значений всех параметров в единой базе данных как функции от времени и от глубины (с учетом задержки);
- прием и регистрация данных с других источников: хроматографа, LWD-системы;
- возможность подключения программных модулей для сопряжения с другими источниками данных;
- построение ствола скважины в режиме реального времени по данным забойной телеметрической системы;
- поддержка беспроводных информационных табло;
- создание графических отчетов для временных и глубинных зависимостей;
- создание табличных отчетов;
- удаленный мониторинг отдельной скважины или группы скважин через сеть Интернет.

Рассматриваемая система имеет следующие технические преимущества:

- отсутствие сигнальных кабелей между центром сбора данных и датчиками;
- автономное электропитание большинства датчиков ГТИ (отсутствие питающих кабелей);
- быстрое время развертывания (не надо прокладывать кабель);
- высокая степень модульности и легкость интеграции дополнительных аппаратных или программных модулей;
- применение гибкой сетевой технологии и модели «клиент – сервер»;
- низкая стоимость требуемого системного программного обеспечения (операционная система и сервер хранения данных).

В работе описывается аппаратное обеспечение автоматизированной интеллектуальной системы сбора, хранения и передачи геолого-технологических и геофизических данных (далее – АИС ГТИ), содержащее в своем составе:

1) комплект датчиков геолого-технологических исследований для измерения основных параметров при бурении;

2) комплект радиопередающих модулей, предназначенных для передачи данных с датчиков ГТИ по радиоканалу;

3) координатор радиосети.

Из особенностей АИС ГТИ следует отметить возможность организации беспроводной сети сбора данных с датчиков, а также возможность автономного электропитания датчиков от электрохимических элементов, расположенных непосредственно в радиопередающих модулях (далее РПМ).

При разработке аппаратного обеспечения АИС ГТИ требовалось обеспечить автономную работу каждого датчика и соответствующего РПМ от одного комплекта элементов питания в течение интервала времени не менее 10 суток. Учитывая необходимость электропитания не только датчика ГТИ, но и самой схемы РПМ, возникает необходимость использования режима крайней экономии электроэнергии.

Структура АИС

На рис. 1 представлена общая структура АИС. Основная часть системы располагается на станции ГТИ, включающей сервер регистрации и обработки данных, рабочие места геолога и оператора ГТИ, координатор радиосети датчиков, газоаналитическое оборудование, оборудование локальной компьютерной сети, систему спутниковой или сотовой связи для доступа в глобальную сеть. На буровой установке, насосных агрегатах, в емкостной системе и на других вспомогательных объектах устанавливаются датчики ГТИ. В системе возможно использование большого ассортимента существующих промышленных датчиков различных производителей с аналоговыми и цифровыми выходами. Для автономного питания датчика и передачи с него данных на станцию ГТИ к датчику подключается радиопередающий модуль. В корпус РПМ устанавливается батарея автономного электропитания самого модуля и датчика. В системе также предусмотрена совместная работа с оборудованием забойной телеметрической системы, располагаемым на станции MWD и LWD.

В офисе сервисной компании устанавливается центральный сервер сбора данных (ЦССД) с серверным ПО, к которому подключаются по высокоскоростному каналу компьютеры супервайзеров.

Сбор данных с датчиков происходит по радиоканалу посредством асинхронной передачи информационных пакетов. Каждый РПМ имеет свой уникальный адрес, который оператором привязывается к определенному датчику ГТИ, в результате имеется возможность связывания первичных измеряемых физических параметров с адресом РПМ – источника

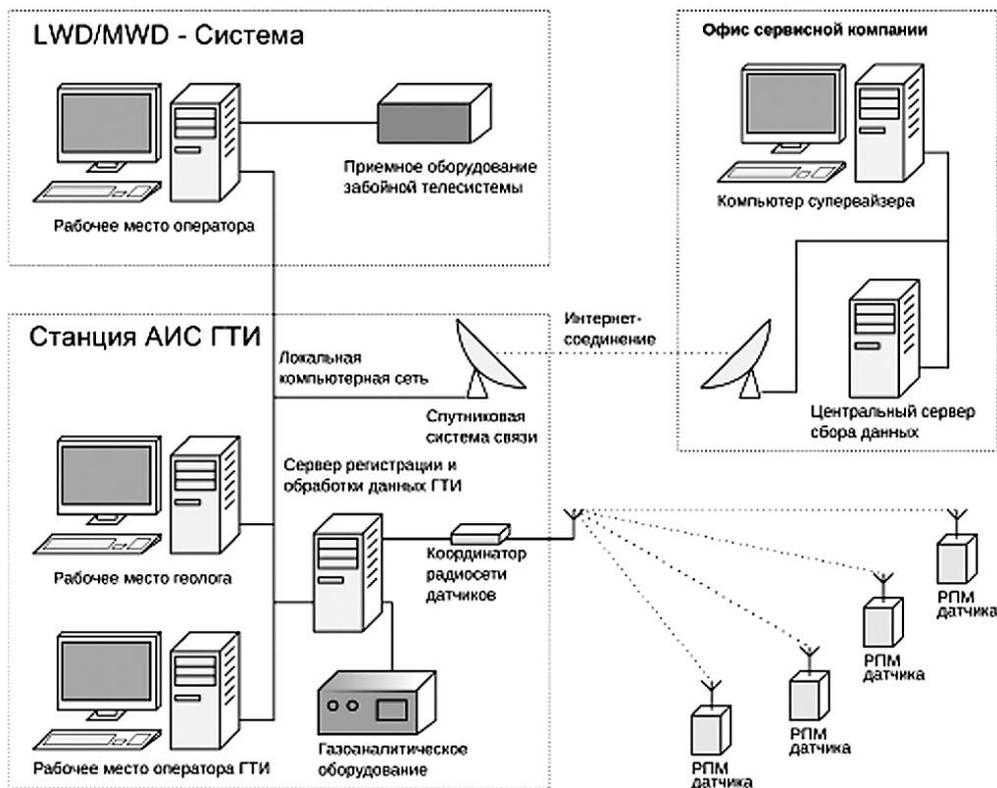


Рис. 1. Структура АИС

данных. Период опроса и передачи данных с датчика устанавливается в каждом РПМ независимо. В системе также предусматривается дистанционная диагностика и мониторинг напряжения на батареях РПМ по радиоканалу. Благодаря беспроводной технологии построения сети датчиков возникает возможность быстрого подключения новых датчиков без какого-либо вмешательства в конфигурацию уже существующей сети. Новые РПМ определяются автоматически, и оператору остается только связать новый датчик с физическим параметром.

Архитектура программного обеспечения

Рассмотрим архитектуру программного обеспечения (ПО) АИС (рис. 2). Основной особенностью предлагаемой архитектуры является модульный принцип функционирования и сетевая организация обмена данными. На локальном уровне станции ГТИ центральной частью ПО является собственно сервер обработки и регистрации данных (СРД). Сервер обменивается информацией с «клиентами» – модулями обработки данных или пользовательскими программами с графическим интерфейсом.

Перечислим основные функции сервера:

1) получение данных по измерениям из модулей сопряжения с какими-либо внешними устройствами (например, с координатором радиосети датчиков или газоаналитическим комплексом);

2) организация подключения «клиентов» и их взаимодействия на основе передачи настроек, параметров и других объектов;

3) отправка «клиентам» текущего состояния радиосети датчиков (например, уровень заряда батарей питания), а также передача управляющих команд на датчики (например, смена периода измерения);

4) применение калибровок измерительных каналов датчиков;

5) первичная обработка данных на основе программируемых схем обработки;

6) регистрация всех изменяемых данных на магнитном носителе;

7) организация авторизованного доступа клиентов к данным сервера и настройкам;

8) прием команд настройки сервера от клиента, хранение настроек;

9) передача новых данных на другие подключенные модули для последующей обработки;

10) обработка запросов на получение любых ранее зарегистрированных данных;

11) контроль свободного дискового пространства, а также обработка аварийных (технических) ситуаций с последующей отправкой сообщений «клиентам»;

12) передача управляющих команд и данных на модули сопряжения с внешними информационными



Рис. 2. Модульно-сетевая архитектура программного обеспечения АИС

табло (например, «Пульт бурильщика»). СРД взаимодействует с «клиентами» (модулями или пользовательскими программами), представляющими собой отдельные процессы, посредством стандартного механизма сетевых сокетов, основанного на стеке протоколов TCP/IP. В предложенной схеме взаимодействия фактически обязательным является только сервер, следовательно, при отключении одного или нескольких модулей, что может произойти в результате программного сбоя, система не перестает работать и продолжает регистрировать все доступные данные. Таким образом, АИС представляет собой отказоустойчивую систему с возможностью легкой интеграции нового ПО – модулей сервера, которые можно подключать или отключать, не останавливая сервер и не прерывая процесс регистрации и обработки данных. Это выгодно отличает АИС от аналогичных систем. Однако в этом случае особое внимание следует уделить программному коду, стабильности работы и тестированию самого СРД, а также наиболее важных модулей, выполняющих вычисления важнейших технологических или геологических параметров.

Аппаратная часть

Согласно структуре АИС ГТИ РПМ должен обеспечивать работу с аналоговыми, импульсными и цифровыми датчиками, а также возможное интеллектуальное управление электропитанием подключаемого датчика с выбором оптимального режима измерения.

Анализ конструкторских и схемотехнических особенностей ряда типовых промышленных датчиков ГТИ, включая датчики с аналоговым выходом (температура, давление, вес, электропроводность

и т. п.), импульсные датчики (датчик ходов насоса, оборотов ротора) и датчики с микропроцессорным управлением (ультразвуковые расходомеры, газоанализаторы) показал следующее:

- 1) отдельная группа датчиков может совместно работать с РПМ в режиме автономного батарейного питания без каких-либо изменений в конструкции или схемотехнике;
- 2) отдельная группа датчиков может совместно работать с РПМ в режиме автономного батарейного питания при условии изменения схемотехники и внесения конструктивных изменений;
- 3) отдельная группа датчиков, в силу специфики физических явлений, лежащих в основе применяемых методов измерения, имеет значительную потребляемую мощность и не может использоваться в режиме автономного батарейного электропитания.

В общем случае РПМ для передачи данных с датчиков ГТИ представляет собой блок размерами 171 x 121 x 55 мм, включающий электронную плату, преобразователь напряжения и внутренний источник питания. Блок-схема РПМ приведена на рис. 3.

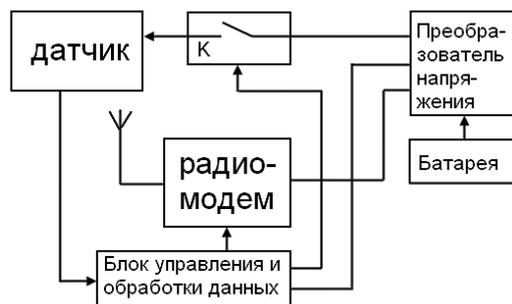


Рис. 3. Блок-схема РПМ для передачи данных с датчиков ГТИ

Также этот блок выполняет функции обработки поступающих с датчика данных (оцифровку аналоговых сигналов, обработку импульсных и цифровых сигналов с соответствующих датчиков). Радиомодем передает обработанные данные по радиоканалу на координатор радиосети.

Внешний вид РПМ приведен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид РПМ для передачи данных с датчиков ГТИ

К РПМ для передачи данных с аналогового датчика через стандартный 4-проводный интерфейс может быть подключен датчик с аналоговым выходом по напряжению (диапазон 0...5 В) или току (диапазон 4...20 мА). РПМ обеспечивает питание датчика стабилизированным напряжением +12 В и током до 100 мА. При автономном питании аналоговых датчиков применяется импульсный режим питания. При таком режиме средний ток потребления можно сократить более чем на порядок, а время автономной работы довести до нескольких месяцев. При этом, учитывая, что саморазряд применяемых элементов питания практически отсутствует, от одного элемента можно питать датчик в процессе нескольких циклов работы буровой установки. С установленным оператором АИС периодом (от 250 мс с шагом 250 мс) РПМ оцифровывает сигнал с датчика и передает данные по радиоканалу на координатор радиосети.

РПМ для передачи данных с импульсного датчика позволяет измерять период следования импульсов, поступающих с подключенного через 4-проводный интерфейс датчика ходов насоса. При поступлении импульса с датчика РПМ передает значение 16-разрядного счетчика времени по радиоканалу на координатор радиосети. По разности значений счетчика определяется период следования импульсов.

РПМ для передачи данных с цифрового датчика предназначен для совместной работы с датчиком оборотов лебедки (ДОЛ), питание которого осуществляется только от РПМ с применением электронной схемы управления. К РПМ через 7-проводный интерфейс может быть подключен датчик с

оптическим энкодером угловых перемещений с возможностью определения направления вращения, выдающий 128 импульсов на один оборот вала. РПМ обеспечивает питание датчика стабилизированным напряжением +5 В и током до 50 мА. РПМ с периодом 500 мс передает значение 16-разрядного реверсивного счетчика импульсов по радиоканалу на координатор радиосети.

Для оперативного мониторинга основных технологических параметров в рамках АИС ГТИ разработан макет мобильного беспроводного информационного пульта. Пульт представляет собой портативный прибор, имеющий автономный источник питания, электронную плату, алфавитно-цифровой жидкокристаллический дисплей (ЖКИ). Пульт имеет радиомодем, аналогичный применяемому в РПМ, и при включении питания автоматически подключается к радиосети всех РПМ системы. Информация на пульт передается через радиоканал с координатора радиосети с задаваемыми оператором ГТИ содержанием и периодичностью.

Пульт позволяет контролировать определенные параметры системы, в том числе технологические параметры бурения и диагностические параметры радиосети.

На рис. 5 показан внешний вид макета пульта. В состав комплекса АИС ГТИ может входить несколько пультов, в этом случае в системе предусмотрена независимая настройка каждого пульта.



Рис. 5. Внешний вид макета пульта мобильного беспроводного информационного пульта

Для диагностики беспроводной сети сбора данных написана программа Radiomon. Radiomon позволяет отслеживать основные параметры РПМ:

- 1) состояние соединения;
- 2) сетевой адрес;
- 3) время приема последнего пакета;
- 4) заряд батареи питания;
- 5) напряжение батареи питания;
- 6) уровень радиосигнала;
- 7) установленный период измерения параметра ГТИ;
- 8) количество принятых пакетов;

- 9) количество потерянных пакетов;
- 10) показания АЦП.

Интерфейс программы приведен на рис. 6 и представляет собой таблицу, отображающую параметры РПМ, приведенные выше. Список отображаемых

программой параметров можно настраивать. В случае потери связи с каким-либо РПМ происходит оповещение оператора. Помимо мониторинга сети программа предоставляет возможность управления РПМ путем отправки им командных сообщений.

Соединение	ID	Родительский ID	Время	Заряд	Упит	Питание	Уст. период	Период	RSSI	АЦП0	АЦП1	АЦП2	АЦП3
	0000F454	00000000	16:24:31		7.10	Cable power 5V	321	432		28	4671	0	0
	0000F450	0000F454	16:24:35		7.10	Cable power 5V	321	432		1	4671	0	0
	0000F451	0000F450	16:24:37		7.10	Cable power 5V	321	432		57	4671	0	0
	0000F452	0000F450	16:24:32		7.10	Cable power 5V	321	432		66	4671	0	0
	0000F453	0000F452	16:24:37		7.10	Cable power 5V	321	432		62	4671	0	0
	0000F455	0000F451	16:24:24		7.10	Cable power 5V	321	432		84	4671	0	0

Рис. 6. Интерфейс программы Radiomon

Заключение

Разработаны РПМ с возможностью подключения датчиков ГТИ, выполняющие следующие основные функции:

- 1) электропитание в экономичном режиме подключаемого к нему датчика ГТИ (при наличии физической возможности);
- 2) аналого-цифровое преобразование сигнала с аналогового датчика;
- 3) измерение периода следования импульсов с импульсного датчика;
- 4) передачу цифрового значения одного или нескольких параметров по радиоканалу на координатор радиосети.

Для оперативного мониторинга основных технологических параметров в режиме on-line разработан макет мобильного беспроводного информационного пульта, который позволяет отображать информацию с датчиков о ходе процесса строительства скважины на территории буровой, покрытой радиосетью.

Для диагностики беспроводной сети сбора данных написана программа Radiomon, позволяющая отслеживать основные параметры датчиков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2010-218-01-192).



Киргизов Д.И.
Kirgizov D.I.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Естественно-научные дисциплины»
Бугульминского филиала «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ»,
Россия, г. Бугульма*



Садыков А.Р.
Sadykov A.R.

*инженер
ООО «ТНГ-Групп»,
Россия, г. Бугульма*

УДК 550.8.028

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРИЕМА И РЕГИСТРАЦИИ ИНФОРМАЦИИ, ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПО КАРОТАЖНЫМ КАБЕЛЯМ С ПРИБОРОВ, КОНТРОЛИРУЮЩИХ НЕФТЯНЫЕ СКВАЖИНЫ

Статья посвящена результатам разработки системы регистрации геофизической информации, передаваемой с геофизических глубинных приборов по линии связи (каротажному кабелю). Представлены структура и принципиальные схемы некоторых узлов геофизического регистратора, программное обеспечение, алгоритмы работы и результаты компьютерного моделирования каротажного кабеля и телеметрии.

Ключевые слова: геофизические исследования, геофизический регистратор, программа, каротажный кабель.

INFORMATIONAL SYSTEM FOR DATA RECORDING THAT IS TRANSMITTED FROM THE BOREHOLE TOOLS THROUGH THE LOGGING CABLE, MONITORING THE OIL WELLS

The article is devoted to the results of the geophysical data recording system development transmitted through the communication lines (logging cable) from the deep bottom hole tools. It is presented the structure and the elementary diagrams some of the assemblies of the geophysical recorder, software, operation algorithm and computer modeling of the logging cable and the telemetry.

Key words: geophysical survey, geophysical recorder, software, logging cable.

Геофизическая техника и аппаратура относится к числу тех производственных областей нефтегазового комплекса, без которой немислимо не только его дальнейшее развитие, но и текущая рентабельная разработка любого месторождения. При этом невозможно добиться высокого качества и большей информативности получаемых при геофизических исследованиях данных совершенствованием только лишь глубинных приборов. Поэтому в последнее время все больше внимания уделяется автоматизации и повышению надежности процесса каротажа.

Важнейшую роль при этом играет совершенствование наземной регистрирующей аппаратуры и программного обеспечения. В качестве телеметрической линии передачи информации из скважины в наземную регистрирующую систему наибольшее распространение получил каротажный одножильный геофизический кабель, который является одной из разновидностей коаксиального кабеля с концентрическим расположением жилы (прямого провода) внутри брони (обратного провода). В качестве внешней оплетки каротажный кабель имеет

броню без поверхностной изоляции. Следовательно, высокочастотный информационный сигнал, проходящий через каротажный кабель, подвергается искажению и ослаблению под действием сопротивления и емкости кабеля. При этом степень искажения

зависит как от длины линии связи (каротажного кабеля), так и от частоты информационного сигнала. В [1, 2] приводится простая электрическая схема эквивалента кабеля, которая была смоделирована в программе Multisim 11.0, рис. 1.

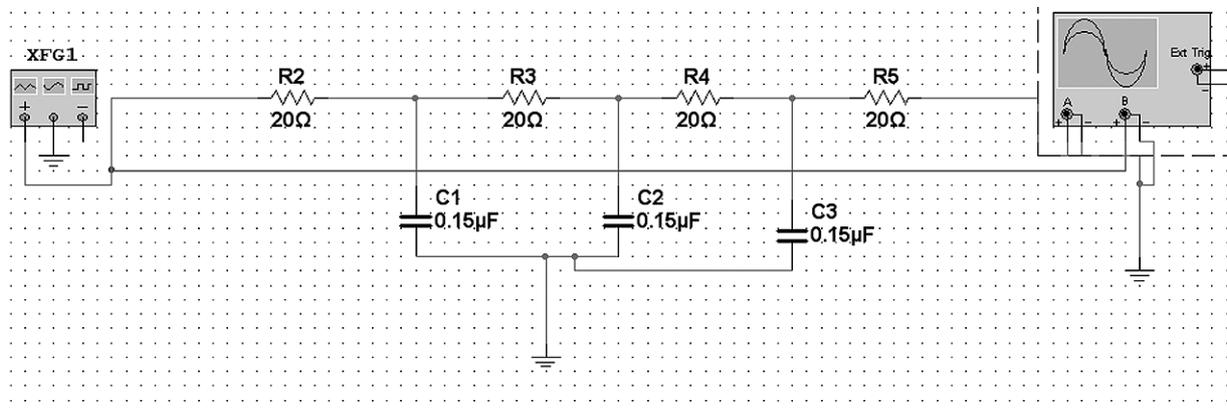


Рис. 1. Имитатор каротажного кабеля длиной 3 км в программе Multisim 11.0

Как видно на рис. 1, имитатор кабеля представляет собой каскадное соединение RC-цепочки, где каждый каскад соответствует 1 км реального кабеля

ля. Пример искажения биполярного прямоугольного импульса на выходе имитатора каротажного кабеля показан на рис. 2.

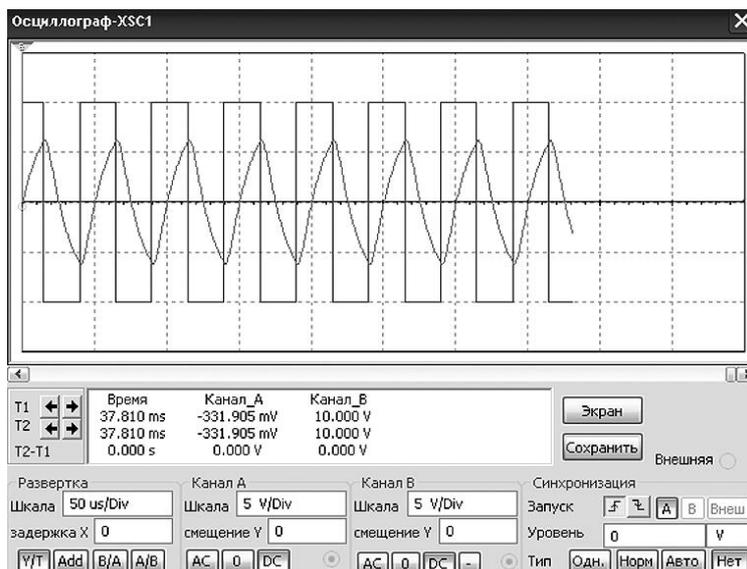


Рис. 2. Форма биполярных прямоугольных импульсов на входе и на выходе имитатора каротажного кабеля

Как видно на рис. 2, прямоугольный сигнал на выходе каротажного кабеля подвергся значительному искажению (уменьшился по амплитуде и исказились фронты), что обусловлено значительной реактивностью (емкостью) каротажного кабеля. В данном случае имитатор кабеля представляет собой не что иное, как фильтр. На рис. 3 представлено АЧХ смоделированного имитатора кабеля.

Как видно из АЧХ имитатора кабеля, коэффициент затухания сигнала начинает увеличиваться

от 10 кГц и при частоте порядка 100 кГц достигает степени, при которой его очень трудно восстановить. Таким образом, реальная скорость передачи информации (бит/с) современных кабелей в зависимости от их длины ограничивается диапазоном до 10–100 кГц.

С учетом этих факторов основное внимание при разработке информационной системы для приема и регистрации геофизической информации мы уделили компенсирующим фильтрам усиления

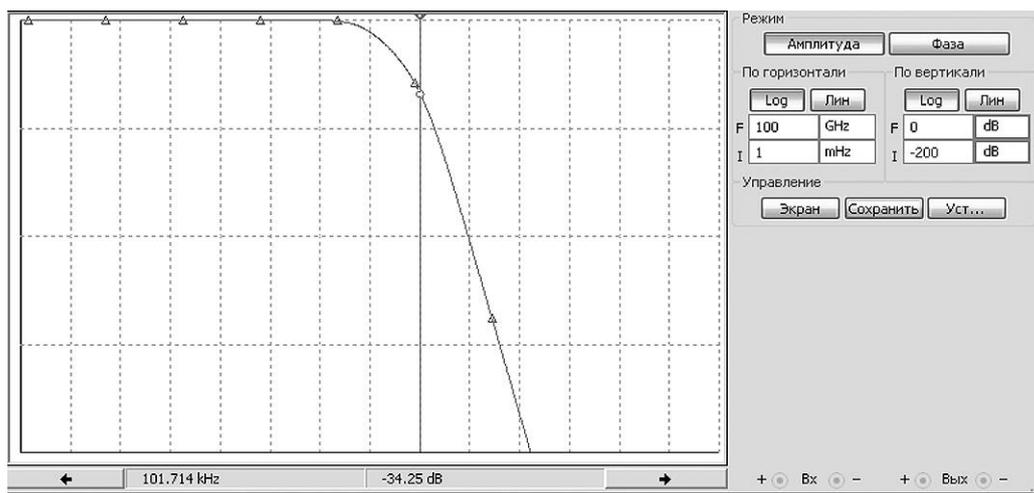


Рис. 3. АЧХ имитатора кабеля (3 км)

и восстановления формы сигнала при приеме сигнала с кабеля.

Методы передачи данных от скважинного прибора к наземной аппаратуре

Раньше для передачи данных из скважины в наземную аппаратуру использовался в основном аналоговый сигнал, который затем оцифровывался на поверхности. Но передача аналогового сигнала по грузонесущему геофизическому кабелю длиной порядка 5000 м ввиду его значительной электрической емкости приводит к значительным трудноустраняемым амплитудно- и фазочастотным искажениям, что затрудняет интерпретацию зарегистрированного геофизического материала, а также приводит

к зашумливанию сигнала, что снижает общий динамический диапазон измерительного комплекса. В настоящее время наиболее распространенным методом передачи данных является цифровая телеметрия. Начиная с 80-х годов прошлого столетия основным методом кодирования сигнала является самосинхронизирующийся код «Манчестер-2», который, в отличие от других методов кодирования, не требует дополнительной линии синхронизации. Передача производится по одной линии, что позволяет использовать его при передаче данных по одножильному кабелю. В качестве примера рассмотрим модель передатчика сигнала в кодировке «Манчестер-2». Модель собрана на микроконтроллере PIC18F4420 в среде компьютерного моделирования Proteus 7.0 (рис. 4).

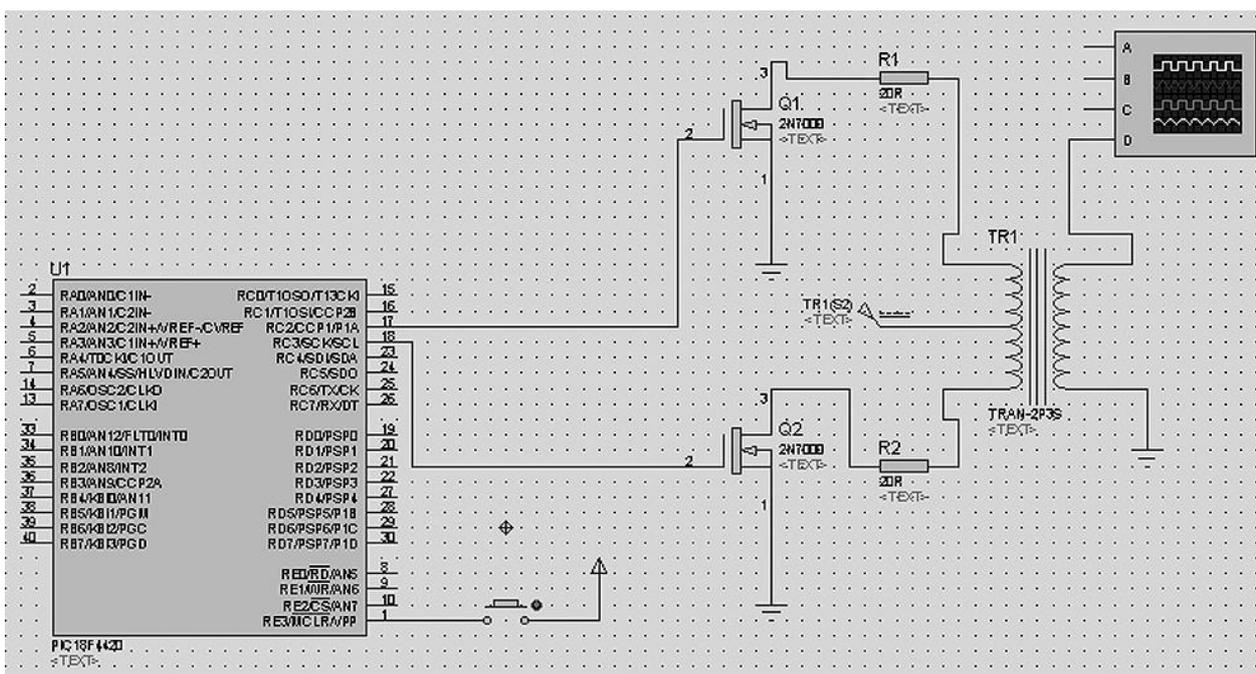


Рис. 4. Схема получения дуполярного кода «Манчестер-2»

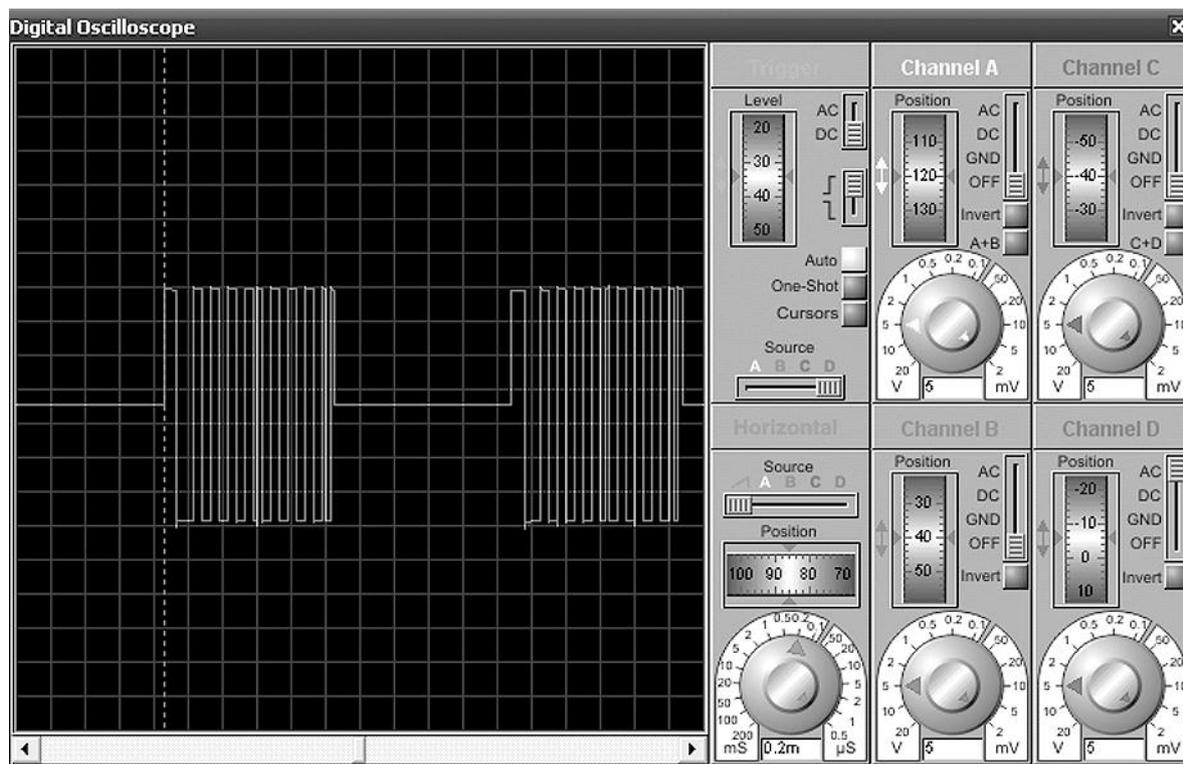


Рис. 5. Примеры кодировки сигналов и форма сигналов на выходе кабеля.
Передаваемое слово 0x9999. Скорость передачи 20 кБит/сек

На рис. 5 показан пример кодирования с помощью «Манчестер-2». Кодирование с использованием «манчестерского» кода осуществляется за счет положительных и отрицательных переходов уровня потенциала, осуществляемых посередине битового интервала. Нулю исходных данных соответствует положительный переход, а единице – отрицательный. За счет наличия переходов потенциала «манчестерский» код обладает самосинхронизацией.

*Структура информационной системы
регистрации сигналов с геофизических
приборов*

В самом общем виде структура системы регистрации представлена на рис. 6.

На этом рисунке скважинный прибор может иметь различные методы измерения геофизических параметров для самых разных типов нефтегазовых скважин. Также могут использоваться различные устройства телеметрии. Система питания обеспечивает скважинный прибор электроэнергией требуемого вида: постоянным напряжением стабильного тока и напряжения, переменным напряжением частотой 50 и 400 Гц регулируемого уровня тока и напряжения, а также энергоснабжение наземных датчиков (глубины, магнитных меток и натяжения каротажного кабеля) и всех элементов регистратора (блока сопряжения с различными устройства-

ми телеметрии, платы процессора с памятью, схемы интерфейса с ЭВМ). Указанная обобщенная структура компьютеризированной геофизической лаборатории естественным образом вписывается в состав каротажного подъемника, преобразуя его в геофизическую станцию. В таком совмещенном варианте в настоящее время выпускается большинство серийных каротажных подъемников. Именно такая структура современной геофизической станции позволяет в полной мере реализовать основные цифровые технологии ГИС.

Основными техническими задачами при подключении к регистратору скважинных приборов различных производителей являются:

- коммутация жил кабеля для энергоснабжения от соответствующих источников питания и для информационной совместимости с сигнальными и управляющими входами регистратора;
- преобразование выходных сигналов систем телеметрии с различными видами модуляции в цифровой код на вход процессора.

Поэтому при разработке системы регистрации мы выбрали вариант блочной структуры, где каждый блок выполняет свои задачи (рис. 7).

Блок восстановления формы сигнала (БВС) нормализует и усиливает форму информационного сигнала, а также осуществляет коммутацию блока питания с прибором через блок реле. Так как пи-

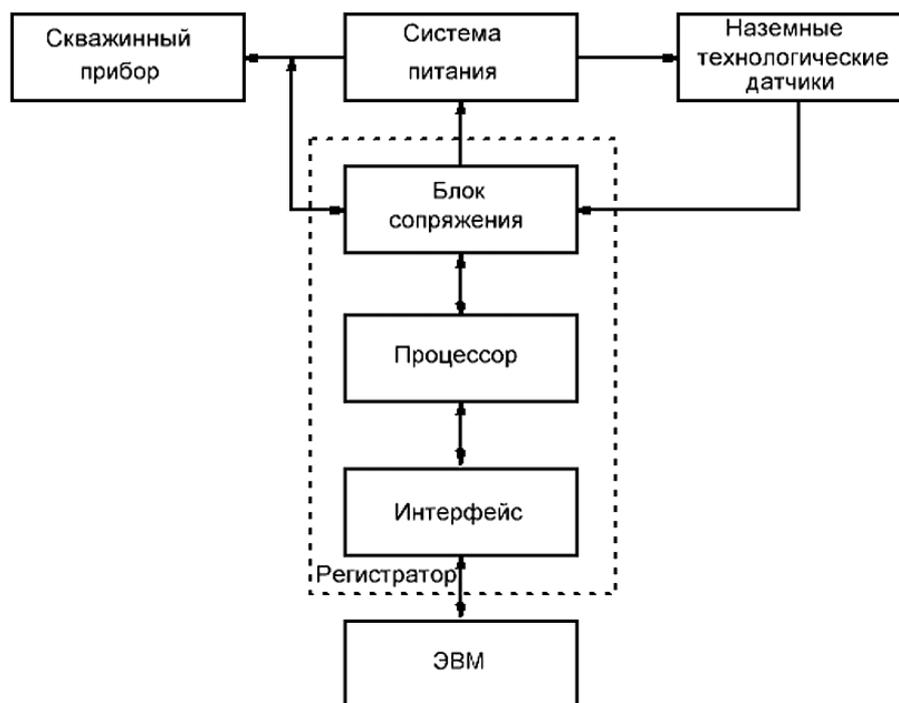


Рис. 6. Структура системы регистрации



Рис. 7. Структура системы регистрации

тание и информационный сигнал передаются по одной жиле для выделения информационного сигнала на фоне питания, мы используем трансформатор с определенной добротностью (в качестве высокочастотного фильтра). Далее сигнал, пройдя через схему ограничения, поступает на вход усилителя с программируемым коэффициентом усиления (AD8320), коэффициент усиления которого, задаваемый пользователем с компьютера, поступает на вход блока цифровой обработки (БЦО) (рис. 8).

Далее сигнал поступает на вход быстрого одноканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ADS800U (время преобразования 25 нсек (40 МГц)) блока цифровой обработки. Оцифрованный сигнал с выхода АЦП по параллельному интерфейсу поступает на вход быстродействующей

программируемой логической матрицы (ПЛИС), которая позволяет пропускать через себя сигнал, лежащий в заданном диапазоне (верхний и нижний уровень). ПЛИС также позволяет производить перекоммутацию жил каротажного кабеля и источника питания непосредственно с помощью программного обеспечения геофизического регистратора (рис. 9).

Восстановленный сигнал поступает на вход цифрового сигнального процессора ADSP-2189M по выводу IRQL0/PF5 порта внешних прерываний (рис. 10).

Этот процессор, работающий на частоте 66 МГц, позволяет производить декодировку информационного сигнала, передаваемого с геофизического прибора, по следующему алгоритму (рис. 11):

1. Алгоритм начинается с поиска синхроимпульса. Цифровой сигнальный процессор ждет любого

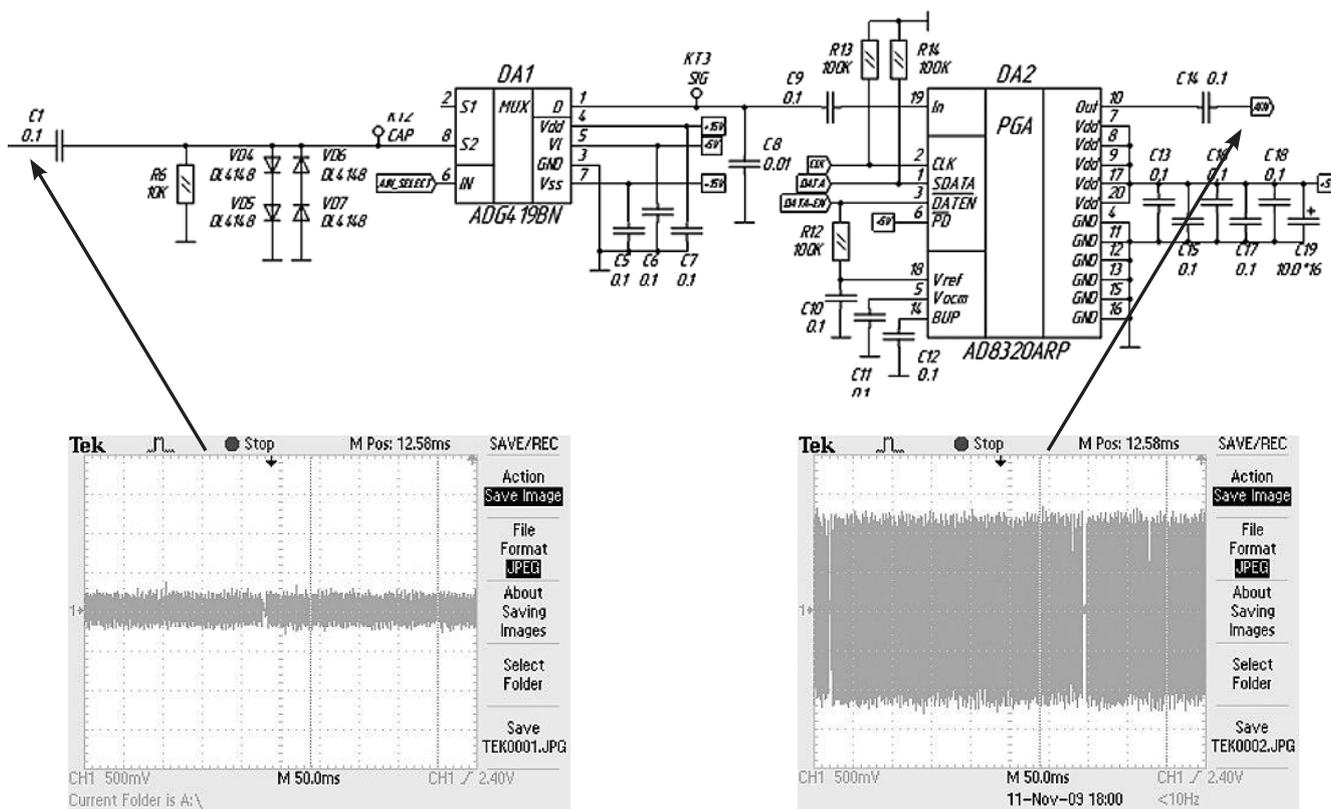


Рис. 8. Входной каскад блока восстановления сигнала (БВС)

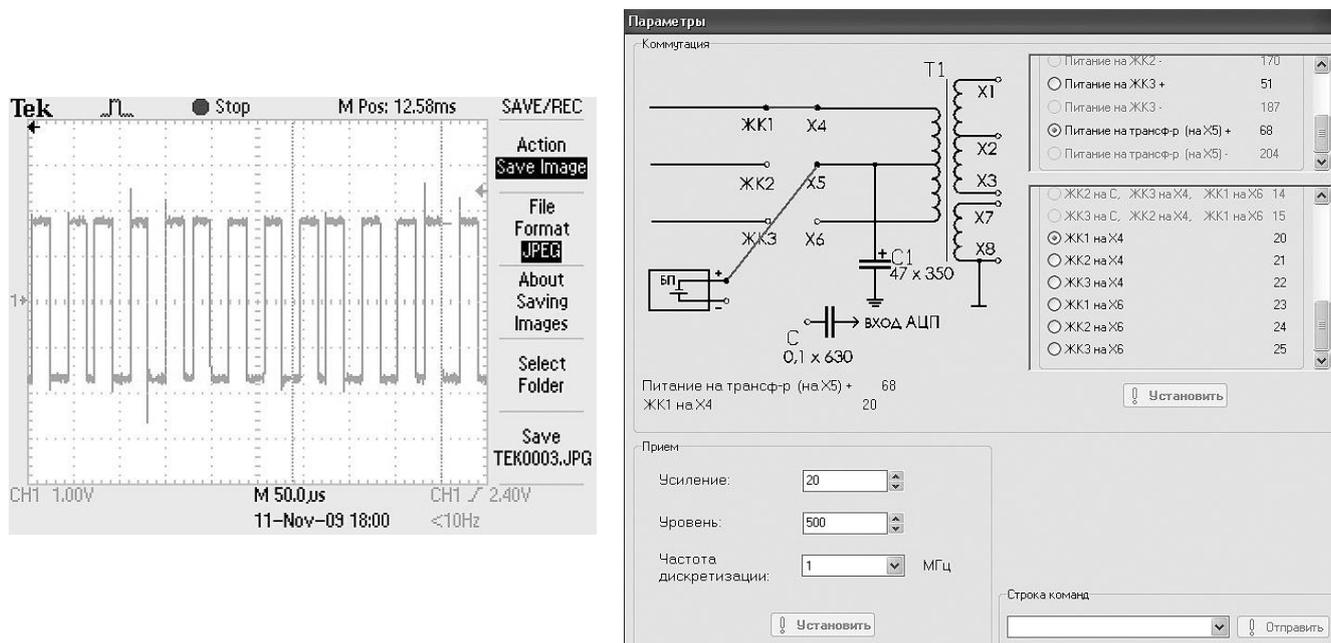


Рис. 9. Окно настройки коэффициента усиления и порога срабатывания ПЛИС и восстановленный сигнал с выхода быстрой АЦП и ПЛИС

перепада на выводе PF5, по полученному перепаду запускаем временной счетчик T и ждем следующего.

2. Когда придет второй перепад, мы сравниваем содержимое временного счетчика T с заданной временной константой Tstart, значение которой определяет длительность синхроимпульса (длительность

равна трем периодам синхронизации (при скорости, равной 20 кБит, Tstart = 36 мксек)). Если значение оказывается равным Tstart, то обнуляем счетчик и ждем третьего перепада, если T не равно Tstart, то переходим к пункту (1). При получении третьего перепада сравниваем значение временного счетчи-

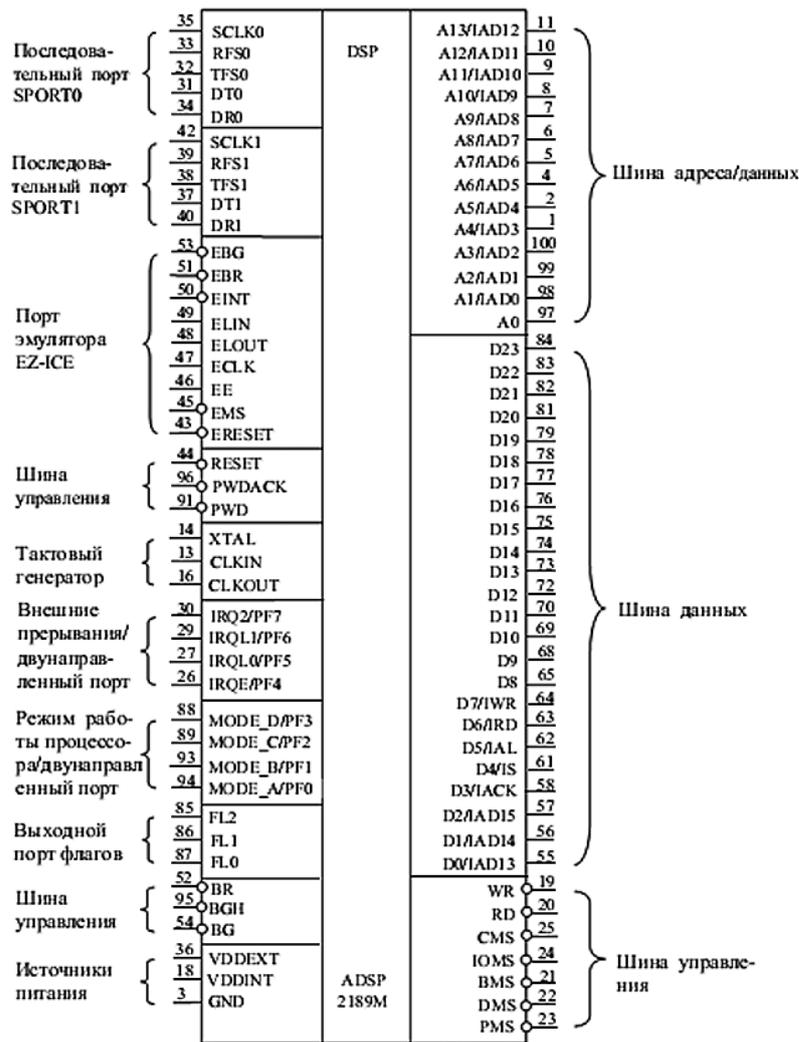


Рис. 10. Выводы микросхемы ADSP-2189

ка с Tstart. Если значение счетчика больше половины такта синхронизации и меньше Tstart, то обнуляем счетчик и ждем второго перепада. Если нет, то сравниваем значение счетчика с Tstart + 1 импульс синхронизации. Если значение оказывается больше, то переходим к пункту (1).

3. Далее начинаем поиск перепадов. Если был переход из 0 в 1, то считается, что принят ноль, если из 1 в 0, то принята единица, и т. д.

4. Повторяем пункт (3), пока не придет 16 бит данных.

Подобным образом можно декодировать не только кодоимпульсные, но и частотно- и времяимпульсные методы кодирования. Использование ЦСП ADSP-2189M позволяет перепрограммировать его «на лету» через порт прямого доступа к памяти DMA. А загрузка процессора осуществляется через блок связи и загрузки (БСЗ). Основным элементом БСЗ является микроконтроллер фирмы «Microchip» PIC18F4550 (рис. 12). Мы выбрали этот процессор, так как он имеет блок работы с USB-портом персо-

нального компьютера, с использованием драйверов, предоставляемых фирмой-производителем.

После написания программы для ADSP-2189M (драйвера) в среде программирования VisualDSP 3.0 мы производим ее загрузку через порт USB с использованием технологии виртуального COM-порта в ЦСП, который начинает свою работу в соответствии с программой. Внешний вид программы регистрации показан на рис. 13. Она была написана нами в среде программирования Delphi 7.0.

Полученные данные с глубинного прибора необходимо привязать к глубине, на которой находится прибор. Для привязки данных используется фотоэлектронный датчик, который вращается вместе с лебедкой и отсчитывает ее обороты при спуске и подъеме. Эти данные в виде импульсов поступают в блок контроля каротажа (БКК) регистратора, где они фиксируются специальным программным счетчиком в микроконтроллере PIC18F4520, который связан с БСЗ и выдает эти данные на персональный компьютер.

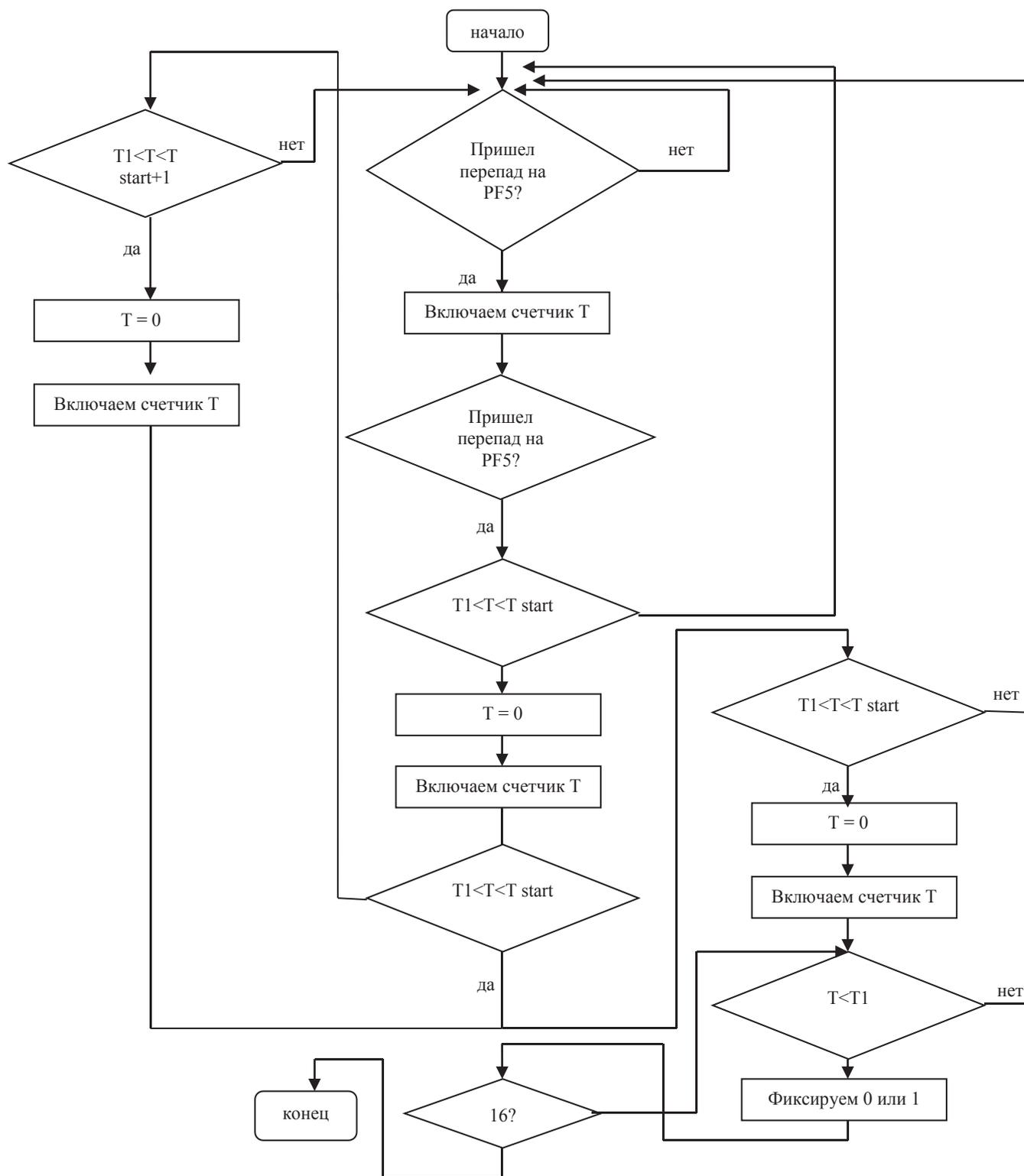


Рис. 11. Алгоритм приема кодоимпульсного сигнала «Манчестер-2» ЦСП ADSP-2189M

Вывод

На основе изученной нами информации мы сделали ряд выводов. Разработка систем регистрации геофизических данных на сегодняшний день является весьма актуальной задачей, особенно на фоне неуклонного роста количества разрабатываемой различными производителя-

ми геофизической аппаратуры. При этом растет и объем информации, которую необходимо передавать из скважины в наземную станцию. Поэтому растет и количество методов передачи данных (частотные, кодоимпульсные, квадратные и др.). Все это требует совершенствования систем регистрации данных, чтобы системы

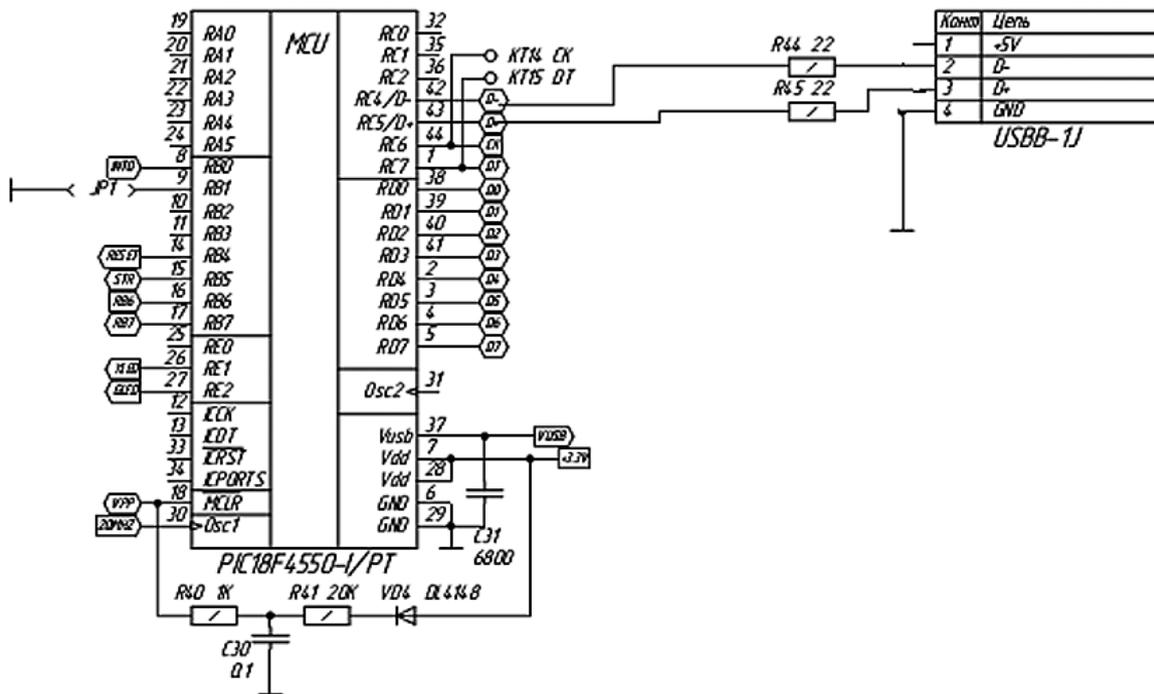


Рис. 12. Блок связи и загрузки программ в ЦСП по USB

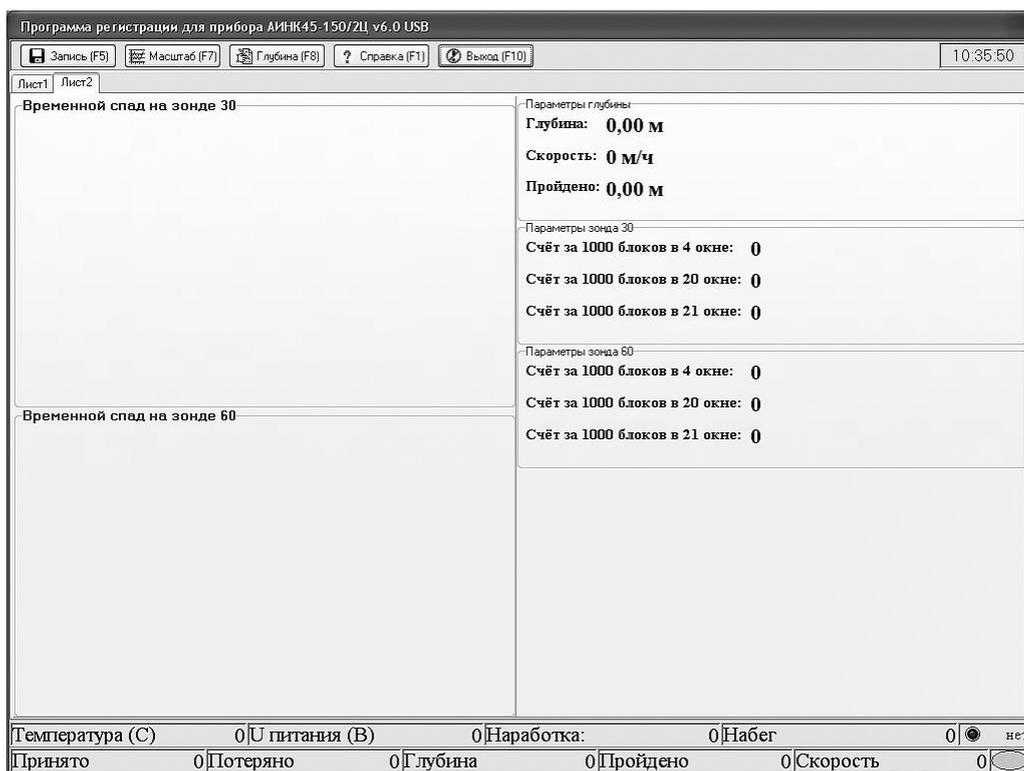


Рис. 13. Внешний вид программы регистрации

регистрации успевали обрабатывать эту информацию. Нами была сделана попытка создания современной системы регистрации. Конечно, с течением времени данная система должна модернизироваться как в плане совершенствования электроники, так и в плане программного обеспечения.

Список литературы

1. *Кривко Н.Н.* Аппаратура для геофизических исследований скважин [Текст]/ Н.Н. Кривко. – М.: Недра, 1991. – 383 с.
2. *Ковалев И.П.* Аппаратура и оборудование для геофизических исследований скважин [Текст]/ И.П. Ковалев. – М.: Недра, 1987.



Крымский В.Г.
Krymsky V.G.

доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой
«Информационно-
управляющие системы»
Уфимского
государственного
университета экономики
и сервиса,
Россия, г. Уфа



Жалбеков И.М.
Zhalbekov I.M.

аспирант
Уфимского
государственного
университета
экономики
и сервиса,
Россия, г. Уфа



Имильбаев Р.Р.
Imilbaev R.R.

аспирант
Уфимского
государственного
университета
экономики
и сервиса,
Россия, г. Уфа



Юнусов А.Р.
Yunusov A.R.

кандидат технических наук,
директор
ООО «УфаСистемаГаз»
Россия, г. Уфа

УДК 681.518.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ: ПРОБЛЕМЫ, ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В газораспределительной отрасли на современном этапе ее развития активно внедряются средства телеметрии и телемеханики, что повышает безопасность процесса транспортировки газа до конечного потребителя и существенно снижает затраты, связанные с обслуживанием. Построение систем диспетчерского управления и сбора данных на объектах газораспределительной сети во многом схоже с решением задачи автоматизации технологических процессов на производственном предприятии, но имеет, тем не менее, свои особенности. Статья посвящена анализу существующих подходов к формированию указанных систем и типовых проблем, с которыми приходится сталкиваться их разработчикам. Рассматриваются вопросы организации измерений и учета расхода газа с помощью современных датчиков, а также способы передачи данных с контрольно-измерительных пунктов на диспетчерский пункт по беспроводному каналу связи. Обсуждаются достоинства и недостатки введения сети Интернет в коммуникационную архитектуру проектируемой автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП).

Ключевые слова: газораспределительные сети, автоматизированные системы управления технологическим процессом, SCADA-системы, беспроводные технологии.

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL IN GAS DISTRIBUTION NETWORKS: CHALLENGES, TRENDS AND PERSPECTIVES

Telemetry and remote control aids are being actively implemented within gas distribution industry at the present stage of its progress, so this increases safety of gas transmission to an end-user and significantly reduces service costs. Building up the supervisory control and data acquisition systems at the plants which belong to gas distribution network is very similar to solving the problem of process control automation for the manufacturing business but nonetheless it has some specific features. The paper analyzes existing approaches to constructing those systems and describes typical problems encountered by the system designers. There are considered the problems of measurement organization and gas flow account issues by means of modern sensor devices; wireless communication methods for data transmission from field device to supervisory level

are also described. Pros and cons of embedding the Internet into the computerized process control system (CPCS) architecture are discussed.

Key words: gas distribution networks, computerized process control systems, SCADA, wireless technologies.

Введение

Как известно, многие промышленные и энергетические системы (сети) имеют территориально распределенную структуру. Для них характерны территориальное разделение значимых участков-узлов, реализующих технологические функции, и их удаленность от центрального узла (ядра системы), в котором принимается то или иное решение о порядке реализации технологического цикла. Такая географическая распределенность указанных узлов, а также большое их количество и сложности реализуемых ими функций существенно затрудняют решение задачи получения, передачи, обработки первичных данных о состоянии системы и формирования соответствующего управления. Поэтому дистанционный мониторинг и управление удаленными объектами – весьма важные и актуальные проблемы, стоящие перед исследователями и практиками.

К типичным системам с распределенной структурой, в частности, относится газораспределительная сеть. Анализ существующих решений в об-

ласти телеметрии и телемеханизации указанного класса систем посвящена данная статья.

Устройство газораспределительной сети

В первую очередь, остановимся на процессе подготовки углеводородного топлива. Природный газ, подвергшийся ряду процедур [1] на газоперерабатывающем предприятии с целью обеспечения требуемого качества горючего (дегидратация, очистка газа от примесей и т. д.), доставляется по магистральному газопроводу при давлении, достигающем 11,8 МПа, до газораспределительной станции (ГРС). На ГРС газ подвергается очистке от механических примесей и одорируется. Давление газа на выходе из ГРС в зависимости от схемы его понижения принимает значения, соответствующие диапазонам, приведенным в таблице 1 [2]. Далее углеводородная смесь попадает в систему газопроводов, на участках которых располагаются узлы редуцирования. Они снижают давление газа до необходимого значения для безопасного использования конечным потребителем.

Таблица 1

Классификация газопроводов по давлению в газораспределительных сетях

Тип газопровода		Давление природного газа, Мпа	Потребители газа
высокого давления	I категории (Г4)	0,6–1,2	промышленные предприятия
	II категории (Г3)	0,3–0,6	
среднего давления (Г2)		0,005–0,3	общественные и административные здания, складские помещения
низкого давления (Г1)		менее 0,005	жилые здания

Отмеченная система газопроводов от ГРС до ввода газа потребителям, а также сооружения и технические средства на них и представляют собой газораспределительную сеть. Структура и элементы такой сети изображены на рисунке 1. В общем случае система газораспределения включает в себя:

- собственно саму сеть стальных и/или полиэтиленовых трубопроводов;
- шкафные и блочные газорегуляторные пункты (ШРП и ГРПБ/ГРП соответственно), основной задачей которых является понижение давления газа до требуемого уровня;
- станции катодной защиты (СКЗ), предназначенные для предотвращения воздействия коррози-

онных процессов на металлические составляющие конструкции сетей газораспределения;

- крановые узлы (КУ), позволяющие осуществлять реконфигурацию (изменение топологии) трубопроводной сети.

В соответствии с [3] в сетях газораспределения необходимо осуществлять мониторинг и контролировать достаточно большое число параметров, основные из которых приведены в таблице 2. С целью выполнения этих требований системы газораспределения оснащаются соответствующим измерительным оборудованием:

- датчиками давления;
- расходомерами;

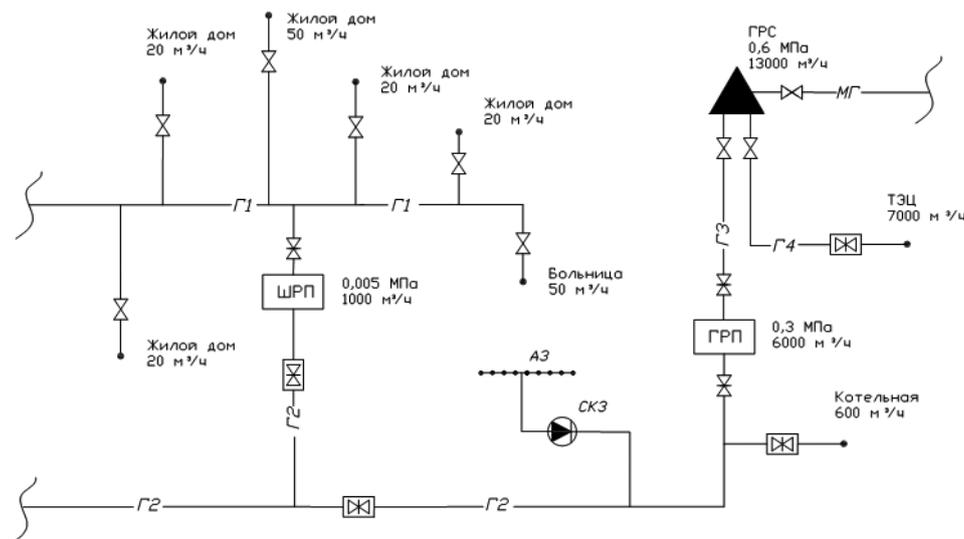


Рис. 1. Участок сети газораспределения

- датчиками температуры;
- сигнализаторами загазованности.

При разработке системы телеметрии необходимо уделить особое внимание подбору полевых устройств

для измерения. Каждое такое устройство обладает обширным перечнем нормируемых параметров, предельные значения которых во многом зависят от физического принципа действия преобразователя.

Таблица 2

Основные контролируемые параметры систем газораспределения

ГРП	КУ	СКЗ
<ul style="list-style-type: none"> • давление газа на входе и выходе; • перепад давления на фильтрах; • температура газа на входе и выходе; • загазованность помещений по CH₄; • состояние предохранительного запорного клапана (ПЗК). <p>Дополнительно контролируемые параметры при наличии узла учета расхода газа:</p> <ul style="list-style-type: none"> • давление газа в точке измерения расхода; • температура газа в точке измерения расхода; • объем газа, приведенный к стандартным условиям 	<ul style="list-style-type: none"> • давление газа до и после КУ; • температура газа на КУ; • давление рабочей среды в системе привода запорного устройства; • сигнализация санкционированного/несанкционированного доступа 	<ul style="list-style-type: none"> • выходное напряжение; • выходной ток; • суммарный потенциал сооружения; • поляризационный потенциал сооружения; • сигнализация санкционированного/несанкционированного доступа

В качестве примера на рис. 2 приведена классификация расходомеров по принципу действия [4, 5]. Однако, согласно [6], не все они подходят для коммерческого учета газа (хотя и могут использоваться, например, в узлах технологических измерений), а ряд современных типов расходомеров вообще не вошел в соответствующий стандарт, что отмечено на рис. 2.

Выбор конкретного типа расходомера зависит от требуемой точности, динамического диапазона расходов, диапазона давлений, температуры, величины потерь давления на первичном преобразовате-

ле, а также наличия гидравлических сопротивлений перед участком газопровода, где осуществляется замер. Рекомендации по параметрическому подбору расходомеров приведены в [6]. Все это лишь подтверждает тот факт, что обеспечение газораспределительных сетей средствами телеметрии – нетривиальная задача.

Большое число измеряемых параметров порождает необходимость их централизованного сбора с целью коррекции расчетных значений, калибровки. Исполнение данной функции возлагается на промышленный логический контроллер (ПЛК),

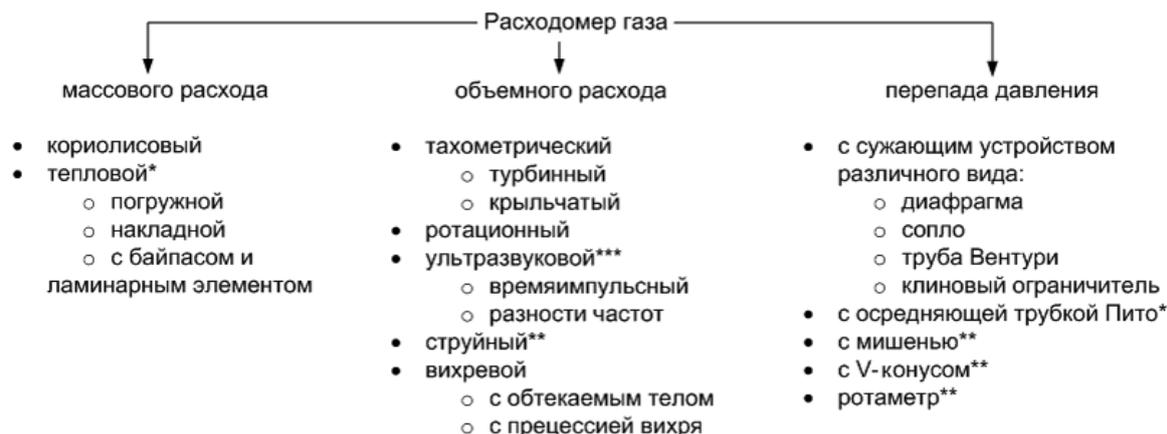


Рис. 2. Классификация расходомеров газа по принципу действия:

* – расходомеры, не допускаемые к применению в узлах коммерческого учета; ** – расходомеры, не включенные в стандарт;

*** – расходомеры, допускаемые к применению в узлах коммерческого учета при некоторых условиях

который является неотъемлемым элементом конструкции любой современной системы управления. Кроме этого, ПЛК выполняет задачи управления газопроводной арматурой в соответствии с полученными результатами, значениями установок и передачи информации на следующий иерархический уровень системы контроля (как правило, в состав контроллеров входит модуль беспроводной связи).

Управление процессом распределения газа

Согласно [2] на территории РФ газораспределительные сети поселений с населением свыше 100 тыс. человек должны быть оснащены автоматизированными системами управления технологическим процессом распределения газа (АСУТП РГ). Основными задачами АСУТП РГ являются:

- регистрация информации о работе компонентов и оборудования газораспределительной сети, изменениях в режиме работы;
- информирование оператора дежурной службы о работе системы, тревогах и внештатных ситуациях;
- обеспечение записи и фиксации информации о событиях системы и работе системы в электронных цифровых архивах хранения данных;
- автоматизированный контроль работы системы, сверка с требуемыми параметрами работы системы и информирование оператора дежурной службы об обнаруженных расхождениях;
- информационный обмен с автоматизированными системами управления по диспетчерской иерархии.

Классификация АСУТП

Традиционно выделяют следующие типы АСУТП [7]:

- системы диспетчеризации и сбора данных (SCADA);

- распределенные системы управления (PCU);
- автономные ПЛК-системы.

Первоначально отличительной особенностью PCU являлась децентрализация обработки, хранения и отображения данных в масштабах промышленного предприятия (в частности, таким объектом мог выступать газоперерабатывающий завод). В SCADA-системах акцент был смещен в сторону создания средств централизованного мониторинга и управления географически распределенными объектами (например, сетями газо- или электро-снабжения). Первые системы такого типа столкнулись с проблемой передачи информации на большие расстояния, в связи с чем на центральный пульт передавались данные качественного характера, сигнализирующие о наличии отклонения значения контролируемого параметра от заданного уровня в ту или иную сторону. В свою очередь, PCU использовались в тех областях, где требовалось непрерывно обновлять значения измеряемых параметров. Однако по мере развития широкополосных телекоммуникационных и сетевых технологий, а также возникновения транснациональных корпораций разница между PCU и SCADA-системами становится все менее существенной и носит номинальный характер. В то же время архитектурная реализация и проблемы, с которыми сталкиваются разработчики PCU и SCADA-систем, во многом идентичны [8].

Наконец, автономные АСУТП на базе ПЛК применяются в качестве локальных систем управления, где не требуется передача информации на более высокий уровень. Они занимают нижнюю ступень иерархии АСУТП. Принимая во внимание перечисленные особенности, в дальнейшем термины «АСУТП РГ» и «SCADA-система» будут употребляться как синонимы.

Особенности передачи данных в SCADA-системах газораспределительной отрасли

Структура SCADA-системы изображена на рис. 3. Как отмечалось ранее, ПЛК входят в состав SCADA-систем, образуя так называемый уровень локальных контроллеров. Информация от ПЛК должна передаваться на уровень оперативного управления, на котором располагаются SCADA-сервер, сервер баз данных, АРМ операторов и разработчика. Согласно [9] время передачи сообщения с контрольно-измерительных

пунктов на пульт управления не должно превышать 1 мин. для текущих значений и 10 сек. – для аварийных данных. При этом для коммуникации элементов системы можно использовать как проводные, так и беспроводные каналы передачи данных. Следует иметь в виду, что в местах размещения большинства точек контроля газораспределительной сети отсутствует доступ к проводным каналам связи. В таком случае целесообразно организовать передачу данных на верхний уровень по беспроводному каналу.



Рис. 3. Архитектура SCADA-системы

На сегодняшний день существует достаточно большое количество стандартизованных технологий беспроводной передачи информации, часть из которых представлена в таблице 3 [10, 11]. Тем не менее остановить свой выбор на конкретной технологии не очень просто. При построении сетей коммуникации традиционно возникают задачи определения дальности и скорости передачи данных, которые предоставляет та или иная технология. К промышленным сетям связи, как правило, предъявляется ряд дополнительных требований. Так, применительно к беспроводным коммуникациям на пунктах газораспределительных сетей необходимо дополнительно учитывать следующие особенности:

- небольшой объем телеметрических данных с каждого пункта [12] и умеренная частота их обновления [9] не предъявляют существенных требований к скорости передачи;

- зачастую на отдельных узлах контроля (в частности, ШРП) отсутствует доступ к электросетям переменного напряжения, что, в свою очередь, порождает необходимость решения задач снижения мощности, потребляемой оборудованием, и обеспечения автономного питания средств телеметрии и коммуникации;

- в целях предотвращения взрыва горючей смеси при наличии утечки следует снижать мощность

устройств беспроводной связи, что накладывает ограничения на дальность передачи (в [13] отмечается, что, даже учитывая эффекты воздействия модуляции и отражения электромагнитных волн, уровень мощности, излучаемой приемопередатчиками WPAN и WLAN сетей, не превосходит порогового значения, при котором происходит воспламенение);

- повышенные требования к надежности АСУТП РГ регламентируют наличие резервного канала связи;

- стратегически важный характер объекта управления подразумевает применение технологий, обеспечивающих соответствующий уровень безопасности передачи данных.

Беспроводные персональные сети на базе стандарта IEEE 802.15.4 (ZigBee, WirelessHART, ISA 100.11) удовлетворяют требованиям малого энергопотребления, однако не позволяют передавать информацию на большие расстояния, вследствие чего потребуется использовать ретрансляторы для обеспечения должной площади покрытия территории, что в конечном итоге повышает затраты на развертывание таких сетей. В то же время ZigBee не поддерживает перестройку рабочих частот, что существенно снижает его помехоустойчивость; в этом отношении больше подходят WirelessHART

Сравнительная характеристика беспроводных коммуникационных технологий

Наименование типа сети	Технология беспроводной передачи данных	Максимальная скорость передачи	Типичная дальность передачи
WPAN	ZigBee WirelessHART ISA 100.11	250 Кбит/с	до 100 м
	Bluetooth	3 Мбит/с	до 100 м
	UWB	480 Мбит/с	10 м
WLAN	Wi-Fi (IEEE 802.11g)	54 Мбит/с	100–300 м
	Wi-Fi (IEEE 802.11n)	320 Мбит/с	30 м
2G	GSM/CSD	9,6 Кбит/с	10–40 км
2.5G	GSM/GPRS	60 Кбит/с	10–40 км
	GSM/EDGE	384 Кбит/с	10–40 км
3G	UMTS	2 Мбит/с	10–40 км
4G, WMAN	WiMAX (IEEE 802.16)	70 Мбит/с	до 50 км

и ISA 100.11. Кроме того, последние две технологии обладают рядом дополнительных преимуществ: они обеспечивают повышенный уровень безопасности и гарантируют выполнение команд в реальном времени [13]. Тем не менее на базе ZigBee организуют промежуточную передачу данных между ШРП с батарейным питанием и ближайшими объектами газораспределительной сети, оснащенными питанием 220 В [14], что, вероятно, связано с недавней ратификацией WirelessHART и ISA 100.11. Спецификация Bluetooth не нашла широкого применения ввиду относительной сложности ее протоколов и малой масштабируемости [13]. В свою очередь, технологии сверхширокополосных (UWB) и WLAN сетей не выгодны с точки зрения энергоэффективности при передаче небольших объемов информации [15].

С учетом вышеназванных особенностей для информационного обмена с верхним уровнем SCADA-системы целесообразно использовать существующую инфраструктуру беспроводной передачи данных мобильных операторов.

Типичное время задержки сети радиодоступа не превышает 1 с [10], что, в принципе, не препятствует организации измерений с регламентированной частотой обновления данных. Между тем сети 4-го поколения характеризуются повышенной масштабируемостью, что существенно снижает риск отказа в обслуживании при увеличении числа абонентов.

Удаленность объекта контроля от ближайшей базовой станции ограничена мощностью и чувствительностью приемопередатчика и может достигать

нескольких десятков километров, что позволяет охватить относительно большую территорию размещения протяженных трубопроводов. Однако на сегодняшний день наибольшую площадь покрытия предоставляют именно сети стандарта GSM, что и привело в конечном итоге к их повсеместному использованию в средствах телеметрии.

Интернет как центральный компонент современных SCADA-систем газораспределения

В соответствии с [9] измерительная информация о состоянии объекта поступает на пункты управления газораспределительной организации (ГРО), которые также имеют иерархическую структуру. Сюда относятся аварийно-диспетчерские службы районов и центральная диспетчерская служба региональной ГРО. Как правило, доступ к SCADA-системе предоставляется также и самому ее разработчику для выполнения сервисных функций и своевременной реакции на сбои. Таким образом, пространственная распределенность характерна не только для контрольно-измерительных точек, но и для пунктов управления. Взаимодействие АРМ ГРО и служб поддержки со средствами телеметрии и телемеханики осуществляется посредством SCADA-сервера. В отличие от устройств, размещенных на уровне локальных контроллеров, проблем с подключением элементов, составляющих верхний уровень системы, к сетям коммуникации обычно не возникает. Более того, применение находит наиболее универсальный, легкий и экономически рентабельный

способ связи – обмен данными с серверной частью SCADA-системы через сеть Интернет.

Как отмечалось ранее, для передачи данных на верхний уровень используются сети сотовой связи, транслирующие IP-пакеты в Интернет. В результате Интернет становится по существу центральным связующим звеном SCADA-системы (рис. 4). Такое решение нельзя назвать наилучшим с точки зрения безопасности и допустимого времени задержки, однако на данный момент оно фактически позволяет развернуть распределенную систему диспетчеризации и сбора данных (и тем самым значительно повысить безопасность объекта критической инфра-

структуры), избегая целого ряда дополнительных затрат по организации коммуникаций. В защиту отмеченного подхода говорят и многочисленные факты вывода из строя полевого оборудования вредоносными программами, которые проникали на изолированные от Интернета SCADA-системы иными путями [7, 16]. Так или иначе, обсуждение вопроса применения данного компромиссного решения, успешно реализуемого на практике [17], и теоретически возможных альтернатив, встречающих целый ряд препятствий (прежде всего экономического характера) на пути их внедрения, – предмет отдельной дискуссии.



Рис. 4. Структура SCADA-системы на базе сети Интернет

Таким образом, имеет смысл говорить о появлении нового класса SCADA-систем, а именно IP-SCADA [18]. Это системы диспетчеризации и сбора данных, в которых прием-передача и обмен информацией ведутся по IP-протоколу. IP-SCADA характеризуются большой масштабируемостью и неограниченным количеством точек доступа к информации посредством интернет-браузеров.

Проблемы использования сети Интернет для коммуникации элементов SCADA-системы

Применение Интернета в качестве среды передачи данных позволяет строить экономически эффективные, гибкие, масштабируемые распределенные АСУТП. В то же время идея внедрения сети Интернет в структуру SCADA-систем не лишена недостатков [19], основными из которых являются временная задержка при передаче данных и сравнительно низкая степень их защиты. Кроме этого, разработчики отмечают проблемы обеспечения надежности системы в целом и организации множественного доступа [20]. Решение последней задачи, в принципе, не представляет серьезных затруднений: достаточно установить правила поведения системы в случае коллизии, вызванной попыткой одновременного изменения одно-

го и того же параметра. Надежность системы во многом связана с обеспечением безопасности хранения, обработки и передачи информации. Поэтому наряду с традиционными подходами к повышению надежности: резервированием элементов системы – серверов, каналов связи (путем использования различных операторов и/или технологий передачи данных) – необходимо предусмотреть соответствующие меры защиты информации. Применительно к рассматриваемому типу SCADA-систем специфичной является проблема нейтрализации уязвимостей, вызванных использованием публичной сети передачи данных.

Ниже более подробно освещены две проблемы, указанные ранее как основные.

Задержка передачи данных в Интернете и SCADA-системах на его основе

Временная задержка передачи информации по сети Интернет в момент времени k определяется согласно следующей формуле [20]:

$$T(k) = \sum_{i=0}^n \left[\frac{l_i}{c} + t_i^R + t_i^L(k) + \frac{M}{b_i} \right], \quad (1)$$

где l_i – длина участка сети между i -м и $i+1$ узлами; c – скорость света; t_i^R – задержка, связанная с мару-

тизацией на i -м узле; $t_i^L(k)$ – задержка, обусловленная нагрузкой i -го узла; M – объем передаваемых данных; b_i – скорость передачи данных через канал между i -м и $i+1$ узлами. Ввиду того, что слагаемое $t_i^L(k)$ зависит от времени поступления пакета на узел, прогнозировать время задержки практически невозможно.

В [20] представлены результаты натурного эксперимента, в ходе которого определялось время задержки передачи сигнала обратной связи через Интернет в системе контроля уровня воды в резервуаре. Для выхода в Интернет использовалось модемное подключение к телефонной линии. При этом отношение объема передаваемых данных к скорости канала, как отмечает автор, достаточно мало (передавались значе-

ния лишь нескольких параметров). Математическое ожидание времени доставки сигнала обратной связи составило 582 мс со средним квадратическим отклонением 461 мс при удалении от объекта контроля на 50 км. В то же время соотношение числа потерянных пакетов к их общему числу оказалось равным 26 к 194. Кроме того, на временном интервале 500 с (при частоте дискретизации 2 Гц) наблюдалась одна задержка, длительность которой превышала 5 с.

В структуру SCADA-систем входят и другие элементы (рис. 4), которые вносят дополнительную задержку. Поэтому представляют интерес результаты, полученные в [21] для оценки времени задержки передачи пакетов посредством GPRS (табл. 4).

Таблица 4

Таблица распределения вероятностей времени задержки передачи сообщения в направлении «к серверу» по технологии GPRS

Диапазон времени задержки, с	0–2	2–4	4–6	6–8	>8
Вероятность	0,972	0,019	0,004	0,002	0,003

Для получения интегральной оценки задержки передачи данных от ПЛК до АРМ следует также учесть время, отведенное под шифрование данных на ПЛК и дешифрацию на компьютере оператора. Эти параметры варьируются в зависимости от алгоритма шифрования и вычислительной мощности используемого оборудования и могут достигать нескольких секунд [20].

Как можно заметить, существует достаточно малая вероятность того, что суммарная величина времени задержки превысит 10 с, поэтому такое решение можно считать удовлетворяющим требованиям «с большой долей вероятности». Тем не менее по представленным результатам невозможно предположить, насколько возрастет задержка при увеличении нагрузки на сеть GPRS или узлы сети Интернет. В связи с рассматриваемым аспектом можно высказать следующие рекомендации по повышению надежности системы управления процессом газораспределения:

- использовать две петли управления, причем на нижнем уровне системы частота дискретизации должна быть выше, чем на уровне оперативного управления;
- предусматривать возможность архивирования данных на уровне ПЛК;
- повышать частоту отправки сообщений на пункт управления в случае возникновения чрезвычайной ситуации.

Основные принципы обеспечения информационной безопасности в SCADA-системах с использованием сети Интернет

Чем сложнее объект, тем большее количество векторов его атаки существует. Приводить их детальную таксономию и подробно описывать методы борьбы с уязвимостями SCADA-систем в данной статье не представляется возможным, заинтересованный читатель может обратиться к [7, 16].

В то же время следует заметить, что публичные сети уже давно используются для передачи важной информации (например, в системах типа «Клиент – банк» или платежных сервисах). Для обеспечения необходимой степени безопасности в интернет-системах телемеханики целесообразно применять шифрование данных, а также ограничивать уровень доступа пользователей к системам. Существует несколько способов реализации указанной защиты [22]:

- ранжирование уровня доступа пользователей по логину и паролю;
- применение средств аутентификации пользователя по электронным ключам;
- организация виртуальной частной сети (VPN-соединение);
- ограничение множества IP-адресов и доменов, с которых можно получать доступ к системе.

В целях повышения информационной безопасности перечисленные методы следует комбинировать.

Заключение

Внедрение АСУТП РГ позволяет:

- осуществлять контроль территориально удаленных объектов в рамках одного «хозяйства» из единого диспетчерского пункта;
- значительно снизить затраты на периодический контроль и обслуживание удаленных объектов;
- обеспечить непрерывный контроль параметров работы всего комплекса оборудования в режиме реального времени.

Использование Интернета в качестве коммуникационной среды органично «вписывается» в архитектуру SCADA-системы распределения газа и несет в себе целый ряд дополнительных преимуществ, таких как:

- легкость развертывания системы при незначительных экономических затратах на коммуникационную инфраструктуру;
- простота интеграции с АСУ различных уровней и, как следствие, повышение эффективности взаимодействия отдельных структур в рамках предприятия (в перспективе рассматривается возможность обмена данными между секторами переработки, передачи, распределения и потребления газовой отрасли в рамках единой сети «Smart grid» [23]);
- снижение расходов на программное обеспечение системы (так называемый SCADA-пакет).

При использовании IP-SCADA в сочетании с многосерверной архитектурой построения системы на стороне клиента не требуется установки никаких дополнительных программ, достаточно наличия веб-браузера и подключения к сети Интернет. Как результат, при увеличении числа АРМ отсутствует необходимость в приобретении лицензии на дополнительные терминалы (в отличие от SCADA-пакетов, выполненных в виде отдельных клиентских приложений). По соотношению «цена/качество» IP-SCADA представляется оптимальным вариантом решения задачи диспетчерского управления газораспределительной сети.

Вместе с тем основная проблема на пути внедрения данного подхода заключается в обеспечении соответствующего уровня защиты информации. Количество векторов атаки на систему, в структуру которой входит сеть Интернет, отличается в большую сторону по сравнению с аналогичным параметром для изолированной SCADA-системы, что требует более тщательного подхода к вопросам безопасности и ее оценки в терминах риска для той или иной разработки. Без подобных исследований невозможно утверждать, что любая изолированная от Интернета конфигурация системы является более предпочтительной, нежели рассмотренная выше

(примером тому может служить вирус Stuxnet, который был занесен в защищенную систему с USB-накопителя). Авторы признают компромиссный характер предложенного варианта, отмечая при этом, что на сегодняшний день вопросы обеспечения безопасности SCADA-систем, независимо от их конкретной реализации, остаются открытыми.

Список литературы

1. *Mokhatab S.* Handbook of natural gas transmission and processing [Text] / S. Mokhatab, W.A. Poe, J.S. Speight. – Elsevier, 2006. – 636 p.
2. *СНУП 42-01-2002.* Газораспределительные системы [Текст]. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 33 с.
3. *Технические* требования ОАО «Газпромрегионгаз» к системам телемеханики объектов газораспределительных сетей: [утверждены приказом ОАО «Газпромрегионгаз» № 451 от 27.09.2010 г.] [Текст]. – СПб., 2010. – 20 с.
4. *Андреев Е.Б.* Автоматизация технологических процессов добычи и подготовки нефти и газа: учебное пособие для вузов [Текст] / Е.Б. Андреев, А.И. Ключников, А.В. Кротов, В.Е. Попадько, И.Я. Шарова. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. – 399 с.
5. *Crabtree M.A.* Industrial flow measurement: M. Sc. thesis [Text] / M.A. Crabtree. – University of Huddersfield, 2009. – 244 p.
6. *СТО Газпром 5.32-2009.* Обеспечение единства измерений. Организация измерений природного газа [Текст]. – М.: ООО «Газпром экспо», 2010. – 90 с.
7. *Stouffer K.* Guide to industrial control systems security [Text] / K. Stouffer, J. Falco, K. Scarfone. – NIST special publication 800-82. – 2011. – 155 p.
8. *Galloway B.* Introduction to Industrial Control Networks [Text] / B. Galloway, G.P. Hancke // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2012. – Vol. PP. – Issue 99. – P. 1–21.
9. *Унифицированные* технические решения для создания АСУ ТП объектов газораспределительных сетей: [утверждены приказом ОАО «Газпромрегионгаз» № 121 от 01.03.2011 г.] [Текст]. – СПб., 2011. – 39 с.
10. *Akyol B.A.* A survey of wireless communications for the electric power system. PNNL-19084 [Text] / B.A. Akyol, H. Kirkham, S.L. Clements, M.D. Hadley. – WA, Richland: Pacific Northwest National Laboratory. – 2010. – 73 p.
11. *Zahurul H.* Advanced topics in measurements [Text] / H. Zahurul. – InTech, 2012. – 400 p.
12. *Васютинский В.* Системы коммерческого учета и сбора данных существующей газовой инфраструктуры: шаг к эффективному распоряжению ресурсами [Текст] / В. Васютинский, А. Ткалич // Сфера нефтегаз. – 2010. – № 3. – С. 28–30.

13. *Ikrum W., Thornhill N.F.* Wireless communication in process automation: a survey of opportunities, requirements, concerns and challenges [Electronic resource] // Proceedings of UKACC International Conference on CONTROL. – Coventry, UK, 2010. – URL: http://ns.controlssystemworld.com/papers/IkrumThornhill_Control2010_Sept2010-1.pdf (дата обращения: 05.02.2013).
14. *Миденко М.А., Заручевный Р.В., Косогооров А.А.* Инновационные технологии в ГРО [Текст] / М.А. Миденко, Р.В. Заручевный, А.А. Косогооров // Газ России. – 2009. – № 2. – С. 30–33.
15. *Lee J.Sh.* A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi [Text] / J.Sh. Lee, Yu.W. Su, Ch.Ch. Shen // Proceedings of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). – Taipei, Taiwan, 2007. – PP. 46–51.
16. *Knapp E.D.* Industrial network security: securing critical infrastructure networks for Smart Grid, SCADA and other industrial control systems [Text] / E.D. Knapp. – Syngress, 2011. – 360 p.
17. *Юнусов А.Р.* Автоматизация и телемеханизация ТП на базе Internet-программирования: опыт внедрения в ОАО «Газ-сервис» [Текст] / А.Р. Юнусов // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 2. – С. 43–45.
18. *Патент № 2455768 РФ, МПК7 H04H60/76.* Способ телемеханического контроля и управления удаленными объектами с использованием канала связи GSM GPRS, единого сервера телемеханики и телемеханическая система для его реализации [Текст] / К.В. Балаба, В.Е. Балахонцев, А.К. Еникеев, А.Р. Юнусов; заявитель и патентообладатель ООО «УфаСистемаГаз». – № 2010121634/08; заявл. 27.05.10; опубл. 10.07.12, бюл. № 19. – 16 с.
19. *Форбс Б.* Десять ошибок при построении SCADA на базе технологий Интернета [Текст] / Б. Форбс // Мир компьютерной автоматизации. – 2012. – № 2. – С. 60–65.
20. *Yang S.H.* Internet-based Control Systems: Design and Applications [Text] / S.H. Yang. – Springer, 2011. – 224 p.
21. *Fornasa M., Zingirian N., Maresca M.* Extensive GPRS latency characterization in uplink packet transmission from moving vehicles [Text] / M. Fornasa, N. Zingirian, M. Maresca // Proceedings of vehicular technology conference. – Singapore, 2008. – P. 2562–2566.
22. *Юнусов А.Р.* Автоматизация и телемеханизация процесса газораспределения без применения традиционных SCADA-пакетов (опыт ОАО «Газ-сервис») [Текст] / А.Р. Юнусов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2010. – № 12. – С. 8–12.
23. *Smart grid aspects related to gas: deliverable of EU commission task force for smart grids, expert group 4* [Text]. – 2011. – 27 p.



Кушнир В.Г.
Kushnir V.G.

*доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой Костанайского государственного
университета им. А. Байтурсынова,
Республика Казахстан, г. Костанай*

УДК 621.668

ПРОГРАММА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИТОКА ВОДЫ В МАЛОДЕБИТНЫЕ ВОДОИСТОЧНИКИ

Для механизации водоснабжения необходимы подробные исследования водоисточника, основой является его дебит. Необходимо знать текущий дебит несовершенного водоисточника, водоприемная часть которого не полностью вскрывает водоносный горизонт до водоупора водоисточника в первом приближении. Обработка научных исследований будет облегчена с программой для моделирования притока воды.

Ключевые слова: водоснабжение, водоисточник, приток воды, моделирование, программа, дебит.

PROGRAM FOR MODELING THE FLOW OF WATER TO THE SOURCES WITH LOW-LEVEL OF FLOW RATE

Detailed studies of a water source for the mechanization of water needed, the basis of a water source is its production rate. It needs to know the current production rate of imperfect water source, the water part of which is not fully reveal the aquifer water source to water pressure, in a first approximation. Processing research will be facilitated with the program for modeling water flow.

Key words: water supply, water source, the flow of water, modeling, software, flow rate of water source.

В безнапорных водных горизонтах изменение дебета водоисточника в зависимости от толщины слоя воды происходит по кривой, близкой к параболе. При уменьшении толщины слоя воды повышается приток воды в водоисточник, который на время снижает мощность водоносного горизонта, питающего водоисточник [1]. Это не было учтено в ранних исследованиях, где использован средний дебит. В результате был допущен ряд погрешностей, в частности потому, что по определению текущего дебита водоисточника приняты линейные уравнения. В ранних исследованиях также выведены уравнения по определению дебита водоисточника [2]. К сожалению, вследствие отсутствия не-

которых параметрических данных водоисточников применение этих уравнений для практических расчетов оказалось затруднительным.

Поэтому необходимо разработать программу для моделирования притока воды в малodeбитные источники, описание которой приводится ниже.

При запуске программы на экране появляется меню, в котором перечисляются все действия, которые можно проводить.

Вначале нужно внести данные, дробная и целая часть чисел вводится отдельно, чтобы избежать ошибок при вводе десятичного разделителя (рис. 1). Если не ввести дробную часть исходных данных, то выдается сообщение, рис. 2.

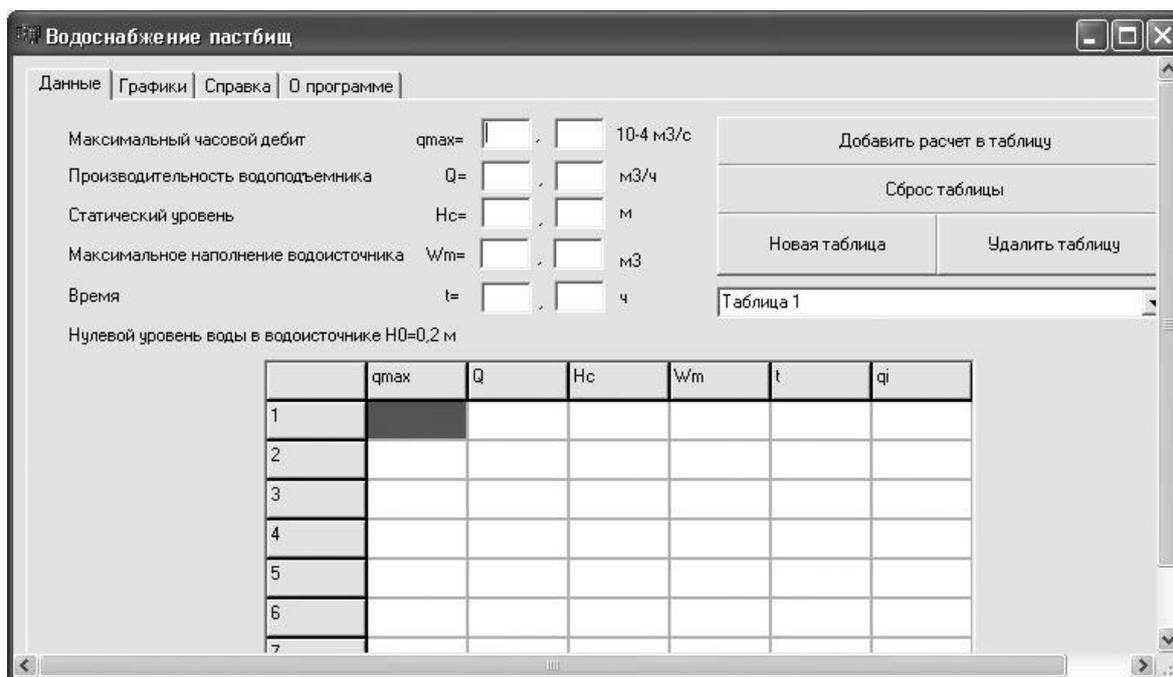


Рис. 1. Ввод исходных данных

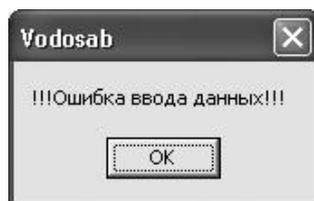


Рис. 2. Ошибка при вводе данных

Исходными данными являются: максимальный часовой дебит q_m , производительность водоподъемника Q , статический уровень H_c , максимальное наполнение водоисточника W_m , время t . Нулевой уровень воды в водоисточнике постоянный и равен

$H_0 = 0,2$ м. После того, как введены исходные данные, необходимо нажать клавишу «Добавить расчет в таблицу», в таблице появляются все введенные данные и результат расчета – текущий дебит водоисточника (рис. 3).

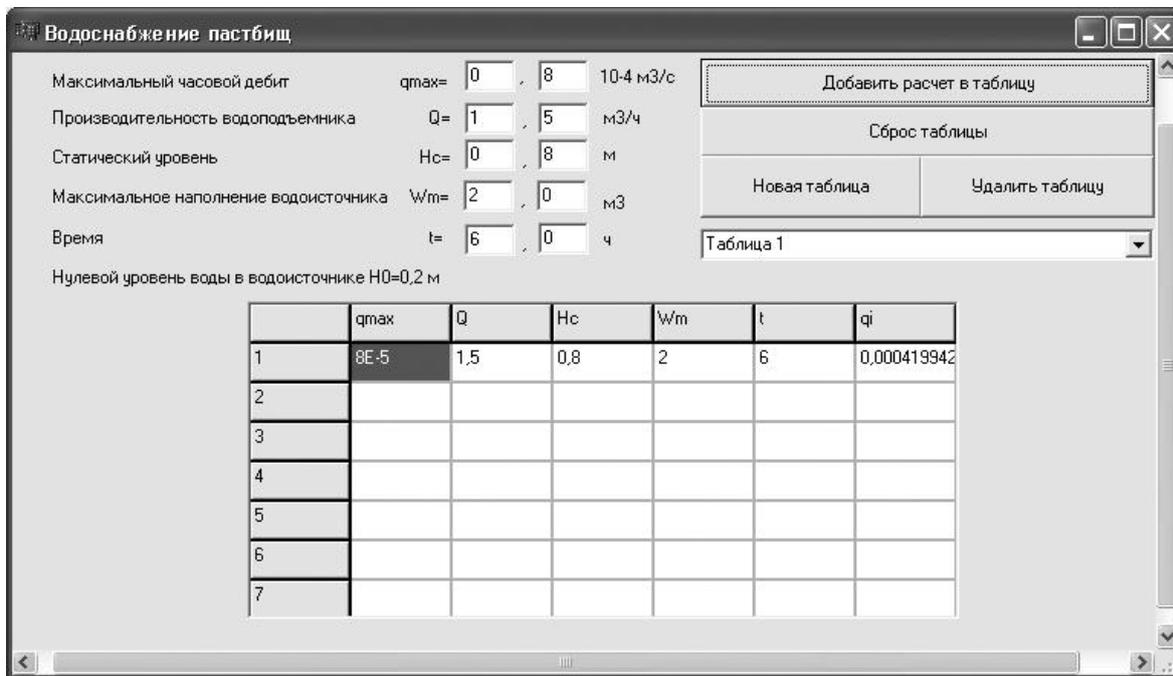


Рис. 3. Расчет текущего дебита воды

Далее можно изменять любые исходные данные и получать расчет текущего дебита водоисточника. Если исходные данные введены с ошибкой, то необходимо курсор подвести к ошибочной ячейке, щелкнуть левой кнопкой мыши – появится окошечко, в него нужно ввести правильные данные (рис. 4).

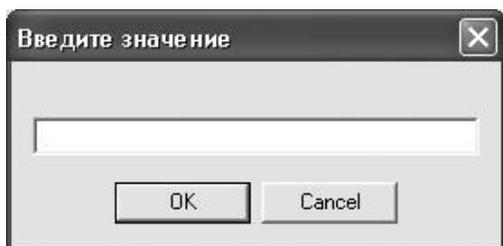


Рис. 4. Ввод измененных данных

Можно изменять какую-либо одну переменную, чтобы проанализировать, как изменяется текущий дебит водоисточника именно от этой переменной, а все остальные исходные данные оставить прежними. Например, будем изменять значение времени от 6 до 24 часов, результаты показаны на рис. 5.

Нажав клавишу «Новая таблица», можно перейти к следующей закладке – «Графики». Выбрать

переменную, от которой мы хотим получить значения текущего дебита водоисточника. На рис. 6 показана графическая зависимость текущего дебита водоисточника от времени.

Далее мы можем вернуться к данным и изменить еще какую-нибудь переменную при изменяющемся времени, а затем на графике посмотреть, как это отразится на текущем дебите водоисточника.

На рис. 7 показано, как текущий дебит водоисточника зависит от времени при изменении производительности водоподъемника: от 1,8 м³/ч – красный цвет, 3 м³/ч – зеленый, 5 м³/ч – желтый, 7 м³/ч – синий, 9 м³/ч – белый цвет.

В ПС есть ограничение, для построения графика нужно не менее пяти точек, но и не более семи; если это условие не соблюдается, то выводятся соответствующие сообщения (рис. 8).

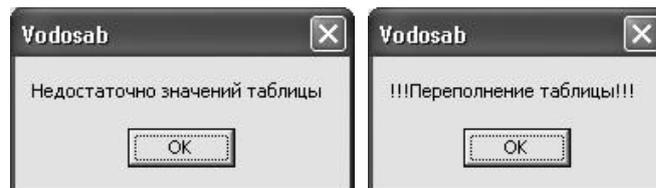


Рис. 8. Предупреждение о невозможности построения графика

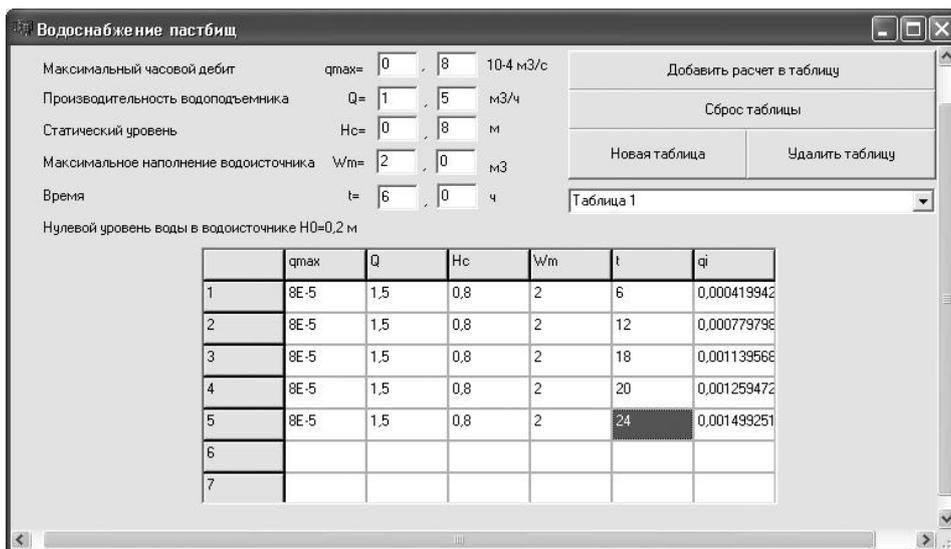


Рис. 5. Изменение дебита водосточника в зависимости от времени

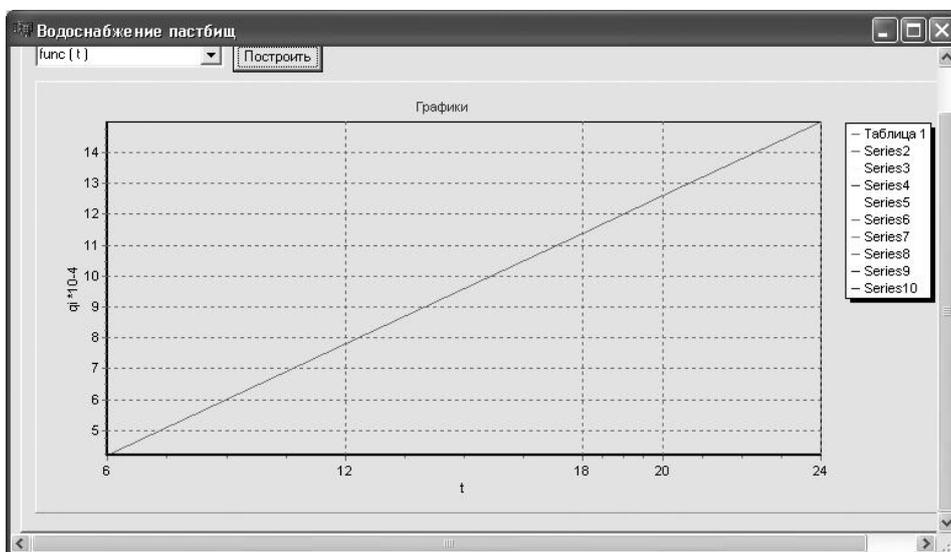


Рис. 6. Зависимость текущего дебита водосточника от времени

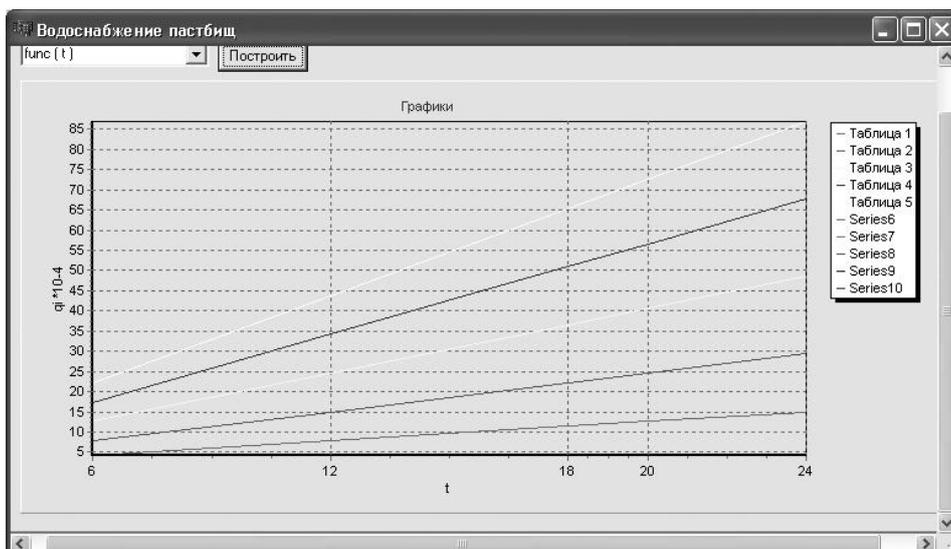


Рис. 7. Изменение текущего дебита водосточника от времени при изменении производительности водоподъемника

Если у нас несколько таблиц, то можно удалить ненужную таблицу, но если у нас всего одна таблица, то выдается сообщение, как на рис. 9, поскольку в этом случае невозможно перейти к построению графиков.

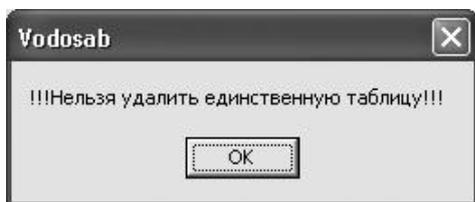


Рис. 9. Сообщение о невозможности удаления единственной таблицы

Невозможно проводить редактирование вычисленного значения текущего дебита водоисточника (рис. 10).

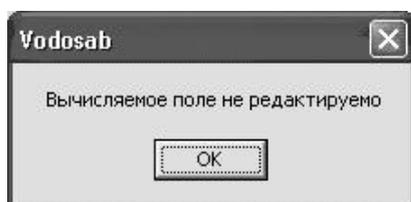


Рис. 10. Сообщение о защите вычисленного значения

Если в таблице все значения в полях одинаковые, то при переходе к следующей таблице выдается сообщение, как на рис. 11.

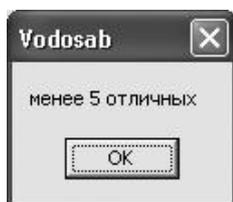


Рис. 11. Сообщение о невозможности построения графика

ПС ограничено количеством графиков, их может быть не более 10, чтобы избежать визуального загромождения рисунка (рис. 12).

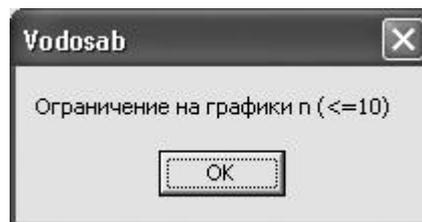


Рис. 12. Сообщение об ограничении количества графиков

На данную программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Она работает, и по ней проводятся дальнейшие научные исследования.

Список литературы

1. Каплан Р.М. Механизация водоснабжения на пастбищах [Текст] / Р.М. Каплан, А.А. Яковлев. – Алма-Ата: Кайнар, 1986. – 184 с.
2. Карамбиров Н.А. Сельскохозяйственное водоснабжение [Текст] / Н.А. Карамбиров. – М.: Колос, 1978. – 351 с.



Мухамадиев А.А.
Mukhamadiev A.A.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-
измерительная техника»
Уфимского государственного авиационного
технического университета,
Россия, г. Уфа



Фаррахов Р.Г.
Farrakhov R.G.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Теоретические основы
электротехники»
Уфимского государственного авиационного
технического университета,
Россия, г. Уфа

УДК 621.38:669

АЛГОРИТМ РАБОТЫ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Описан принцип действия акустооптического измерительного преобразователя температуры. Приведена конструкция и алгоритм работы акустооптического измерительного преобразователя температуры. Разработано программное обеспечение по расчету и выбору эффективной длины волны пропускания акустооптического перестраиваемого фильтра.

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

ALGORITHM OF OPERATION OF THE ACOUSTO-OPTIC MEASURING CONVERTER OF TEMPERATURE

The principle of action of the acousto-optic measuring converter of temperature is described. The construction and algorithm of operation of the acousto-optic measuring converter of temperature is resulted. The software by calculation and a choice of effective wavelength of passage of the acousto-optic tunable filter is developed.

Key words: temperature measurement, the acousto-optic measuring converter of temperature, the acousto-optic tunable filter, algorithm, effective wavelength.

В настоящее время происходит постоянное ускорение темпов роста использования высокотемпературных технологических процессов в различных отраслях промышленности. В связи с этим растет необходимость обеспечения соответствующего качества автоматизации и контроля подобных процессов. При этом контролируемой физической величиной является температура, представляющая собой один из основных параметров, обеспечивающих качество всего процесса.

На сегодняшний день существующие способы и средства измерения, основанные на них, не позволяют измерять температуру с высокой точностью. Невысокая точность обусловлена тем, что коэффи-

циент излучения объектов либо неизвестен, либо изменяется по неизвестному закону в сверхмалый промежуток времени, а также невозможностью сканирования спектра излучения с целью выбора окон прозрачности атмосферы. Работа направлена на решение данной проблемы, то есть на разработку акустооптического измерительного преобразователя температуры с соответствующим программным обеспечением [1, 5, 12].

Совершенствование структуры и элементной базы оптических преобразователей температуры, базирующееся на традиционных физических эффектах, не дает значимых результатов. Поэтому необходимо применение элементов на новых фи-

зических эффектах, а именно применение акустооптического перестраиваемого фильтра в качестве ключевого элемента оптики для обеспечения сепарации теплового излучения.

Акустооптические перестраиваемые фильтры позволяют исследовать спектральный состав электромагнитного излучения по длинам волн в оптическом диапазоне, найти спектральные характеристики излучателей и объектов, взаимодействующих с излучением. Их перестройка осуществляется путем «сви́пирования» несущей частоты акустической волны. Основное предназначение – выделение из широкого спектра составляющей с узким спектральным диапазоном и перестройка центральной волны этого диапазона в соответствии с управляющим сигналом [10].

Акустооптический измерительный преобразователь температуры работает следующим образом (рис. 1, 2). Электромагнитная волна в виде светового потока, излучаемая объектом, температуру которого необходимо измерить, проходит через стеклянное окно, прозрачное в инфракрасном диапазоне 2, и фокусируется линзой 3 оптического блока 1 на входной торец волоконного световода 4. С выходного торца световой поток попадает на акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ) 5, и в результате его

дифракции на акустических волнах пропускается лишь монохроматический поток с эффективной длиной волны $\lambda_{эф}$. Перестройка акустооптического перестраиваемого фильтра осуществляется по управляющему сигналу от микроконтроллера 10. Пропущенное акустооптическим перестраиваемым фильтром монохроматическое оптическое излучение с эффективной длиной волны $\lambda_{эф}$ попадает на линейку фотодиодов 7. В зависимости от температуры акустооптический перестраиваемый фильтр пропускает определенную эффективную длину волны излучения, которая попадает на соответствующий фотодиод с максимумом чувствительности в области пропускания акустооптического перестраиваемого фильтра. Электрический сигнал с выхода фотоприемника усиливается усилителем 8 до уровня, необходимого для корректной работы аналогоцифрового преобразователя 9, который преобразует аналоговый сигнал в цифровой код. Цифровой сигнал поступает на вход микроконтроллера 10, который осуществляет управление всеми компонентами измерительного блока акустооптическим перестраиваемым фильтром и отображает данные измерения на жидкокристаллическом индикаторе 11, а также поддерживает связь устройства через интерфейс 12 с персональным компьютером [2, 8, 9].

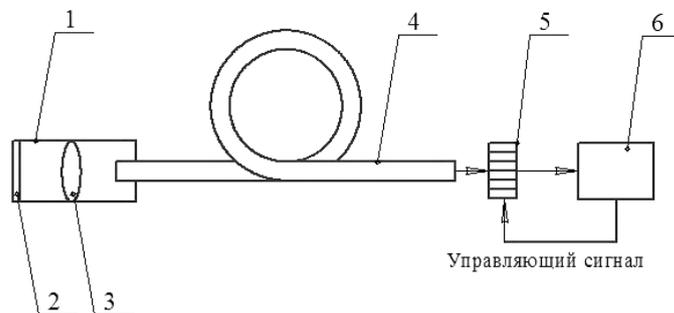


Рис. 1. Структурная схема акустооптического измерительного преобразователя температуры

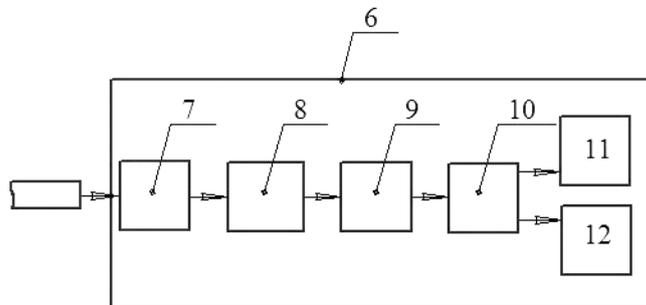


Рис. 2. Структурная схема измерительного блока

Акустооптический измерительный преобразователь для контроля температуры объектов может работать в нескольких режимах. Оптическое излу-

чение от объекта контроля, введенное в волоконный световод, отфильтровывается в АОПФ и попадает на фотоприемник. Если пирометр работает

в монохроматическом режиме, то АОПФ пропускает лишь длину волны $\lambda_1 \pm \Delta\lambda$. Настройка на длину волны $\lambda_1 \pm \Delta\lambda$ осуществляется посредством подачи сигнала на высокочастотный генератор (ВЧГ) требуемой частоты от микроконтроллера измерительного блока. Если пирометр работает в режиме пирометра спектрального отношения, АОПФ поочередно пропускает длины волн $\lambda_1 \pm \Delta\lambda$ и $\lambda_2 \pm \Delta\lambda$ ($\Delta\lambda$ – ширина пропускания АОПФ), которые преобразуются фотоприемником в пропорциональные им электрические сигналы и обрабатываются в измерительном блоке [4].

Акустооптический измерительный преобразователь температуры разработан на базе современного RISC-микроконтроллера AT90S4433. Цифровая база полностью решает коммуникационные

проблемы, а также дает возможность контролировать параметры прибора и управлять полосой пропускания АОПФ функциональными модулями устройства для оптимальной его работы.

После фильтрации сигнала осуществляется его преобразование, необходимое для получения выходного сигнала, соответствующего его номинальной статической характеристике в зависимости от режима работы.

Микроконтроллер поддерживает протоколы обмена: интерфейс RS-232C с персональным компьютером; интерфейс RS-485 с хост-контроллером информационной сети.

Для обеспечения функционирования акустооптического измерительного преобразователя температуры разработан алгоритм его работы (рис. 3) [7].

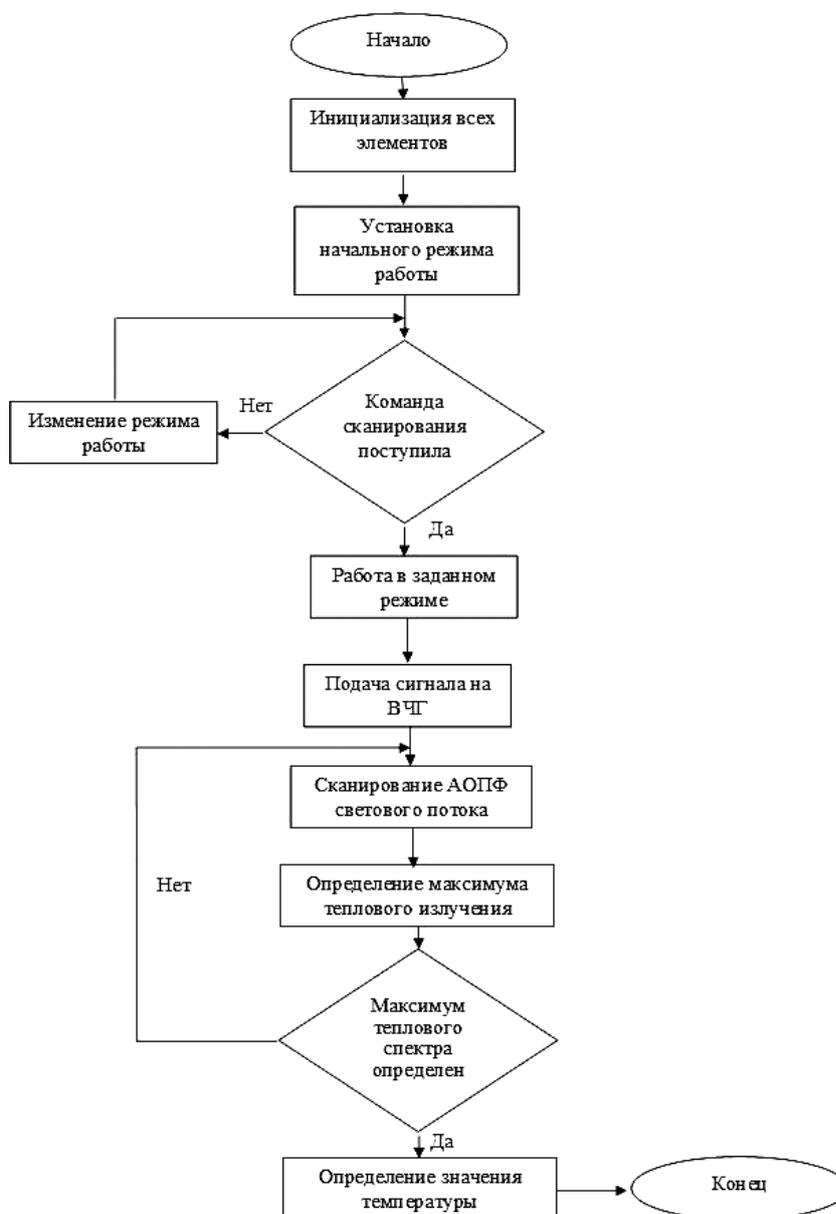


Рис. 3. Алгоритм работы акустооптического измерительного преобразователя температуры

На основе данного алгоритма реализовано программное обеспечение, написанное на языке программирования C++.

Формы экранов разработанной программы представлены на рисунке 4.

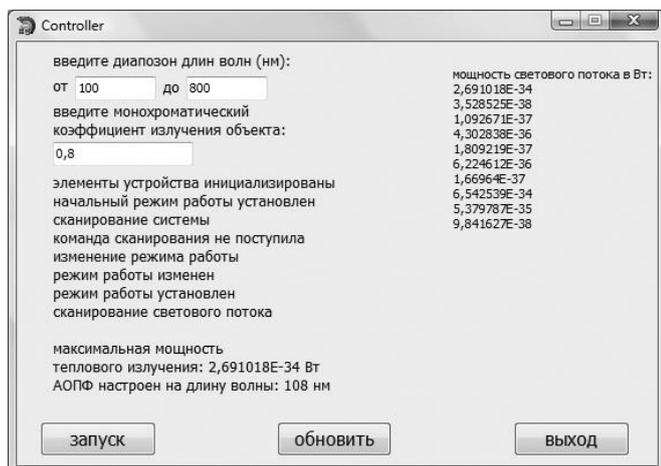
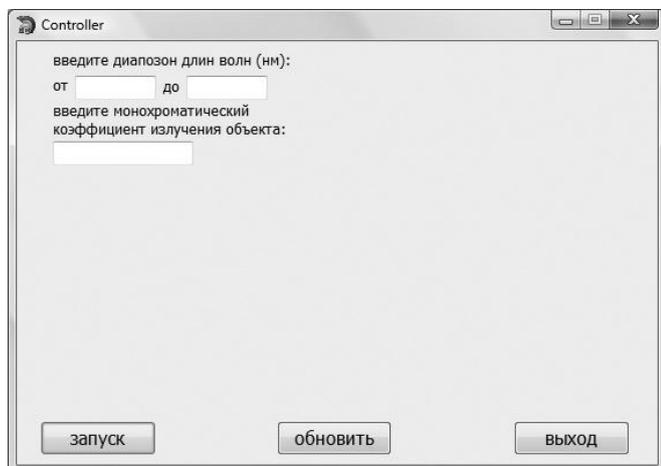


Рис. 4. Формы экранов разработанной программы

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- сканирование системы и инициализация устройств;
- выбор режима работы;
- сканирование светового потока и определение его мощности;
- нахождение длины волны и определение мощности излучения;
- настройка акустооптического перестраиваемого фильтра на определенную длину волны;
- определение температуры объектов [11].

Проведенные исследования характеристик и математическое моделирование [3, 6] акустооптического измерительного преобразователя температуры показали функциональность разработанного программного обеспечения.

Разработанная конструкция акустооптического измерительного преобразователя температуры с соответствующим программным обеспечением позволяет измерять с высокой точностью температуру объектов с неизвестным коэффициентом излучения, причем имеется возможность варьировать полосы пропускания АОПФ с целью выбора окон прозрачности атмосферы. АОПФ позволяет не только существенно упростить и повысить надежность оптической части пирометра (вследствие исключения второго канала и решения взаимной юстировки каналов), но и увеличить точность измерений за счет одномоментной температурной стабилизации одного фотоприемника излучения, отсутствие каких-либо движущихся частей, микродвигателей, колеблющихся шторок в оптической части пирометра.

Список литературы

1. Мухамадиев А.А. Акустооптические приборы информационно-измерительных систем экологического мониторинга [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов, М.А. Ураксеев. – Уфа: Уфимск. гос. акад. эконом. и сервиса, 2009. – 119 с.
2. Мухамадиев А.А. Акустооптический преобразователь температуры [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 1. – С. 26–28.
3. Мухамадиев А.А. Математическая модель акустооптического пирометра [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С. 28–31.
4. Мухамадиев А.А. Оптический преобразователь температуры для систем контроля и управления [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Датчики и системы. – 2010. – № 10. – С. 39–42.
5. Мухамадиев А.А. Принципы построения оптических преобразователей температуры [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2009. – № 12. – С. 21–26.
6. Мухамадиев А.А. Статическая характеристика, чувствительность и разрешающая способность акустооптического пирометра [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Датчики и системы. – 2011. – № 11. – С. 31–44.
7. Мухамадиев А.А. Универсальный пирометр для измерения высоких температур [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Датчики и системы. – 2010. – № 11. – С. 23–25.
8. Патент РФ № 2399892 МПК7 G01K1/02, G02F1/33 Оптический преобразователь температуры [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов; заявитель

и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т» (RU). – № 2009122755/28; заявл. 15.06.2009; опубл. 20.09.2010.

9. Патент РФ № 288801 МПК7 G01J5/10. Устройство дистанционного измерения температуры [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т» (RU). – № 2009126218/22; заявл. 08.07.2009; опубл. 20.11.2009, Бюл. № 32.

10. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ 2005611855. Расчет оптимальных конструктивных и рабочих параметров акустооптических устройств [Текст] / А.А. Мухамадиев, М.А. Ураксеев; заявители и правообладатели Мухамадиев А.А. (RU), Ураксеев М.А. (RU). –

№ 2005611216; заявл. 30.05.2005; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.07.2005.

11. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ 2010614548. Расчет и выбор эффективной длины волны пропускания акустооптического перестраиваемого фильтра [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов; заявители и правообладатели Р.Г. Фаррахов (RU), А.А. Мухамадиев (RU). – № 2010612875; заявл. 24.05.2010; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.07.2010.

12. Фаррахов Р.Г. Оптико-электронные преобразователи температуры для систем контроля технологическими процессами [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов, М.А. Ураксеев. – Уфа: Уфимск. гос. акад. эконом. и сервиса, 2010. – 107 с.



Павлов С.В.
Pavlov S.V.

доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой
«Геоинформационные системы»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета,
Россия, г. Уфа



Ефремова О.А.
Efremova O.A.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Геоинформационные системы»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета,
Россия, г. Уфа



Павлов А.С.
Pavlov A.S.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Геоинформационные системы»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета,
Россия, г. Уфа

УДК 004:528

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОРГАНОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВЛАСТИ РЕГИОНА ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ДАННЫМИ

В статье рассмотрены варианты организации информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными в зависимости от способов их хранения в различных органах исполнительной власти.

Ключевые слова: информационно-вычислительная система, пространственные данные, информационное обеспечение органов исполнительной власти, технология организации хранения пространственных данных.

INFORMATION-COMPUTER SYSTEM FOR PROVIDING REGIONAL EXECUTIVE AGENCIES WITH SPATIAL DATA

The paper considers organizational modifications of the information-computing system which aims at providing regional executive authorities with spatial data subject to methods of their storing within any authority.

Key words: information-computer system, spatial data, information support for executive agency, storing organization technology of the spatial data.

Органам исполнительной власти для осуществления своей деятельности необходимы огромные массивы различного рода информации, в том числе и пространственной, для обработки которых создаются различные ведомственные информационно-вычислительные системы. Создание подобного рода информационно-вычислительных систем для каждого органа исполнительной власти в отдельности затрудняет процессы управления регионом вследствие координации усилий органов исполнительной власти не только на решении вопросов, связанных непосредственно с принятием решений, но и на вопросах наполнения и актуализации пространственных данных в соответствующих информационных системах, вследствие чего актуальным является решение проблемы организации единой информационно-вычислительной среды, обеспечивающей совместное использование и межведомственный обмен пространственными данными.

С целью автоматизации процессов распределенного хранения, управления и предоставления пространственных данных (в виде цифровых карт и планов, космических снимков, координат объектов) органам исполнительной власти, правительству, отдельным ведомствам, их территориальным подразделениям, предприятиям и гражданам, а также для решения на базе этих данных прикладных задач в различных регионах страны создаются информационно-вычислительные системы. Не стала исключением и Республика Башкортостан.

В соответствии с Концепцией долгосрочной целевой программы «Развитие информационного общества в Республике Башкортостан на 2012–2017 годы», одобренной распоряжением Правительства Республики Башкортостан от 1 августа 2011 года № 962-р, а также принятой Правительством Республики Башкортостан Концепцией геоинформационной системы органов исполнительной власти Республики Башкортостан в республике поэтапно создается Геоинформационная система органов исполнительной власти – ГИС ОИВ РБ, обобщенная схема взаимодействия пользователей с которой представлена на рисунке 1.

Разработка информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти республики пространственными данными призвана обеспечить решение следующих задач:

– совместное использование информационных ресурсов, в том числе космических и авиационных снимков, создание и внедрение специализированных и интегрированных баз первичной информации, создание единой системы классификации и кодирования информации (в том числе пространственной);

– организацию распределенной системы сбора и хранения пространственной информации, ведение аналитической работы с первичными и агрегированными данными;

– пространственный и статистический анализ данных (поиск объектов по пространственным и семантическим данным, анализ информации путем выбора объектов на основе их близости к другим объектам, статистический анализ данных, связанных с тематическими картографическими слоями, и др.);

– создание системы классификации информации об объектах и территориях по предметным областям, функциональным направлениям использования, уровням административно-территориального деления и другим признакам.

При практическом создании, развитии и использовании информационно-вычислительных систем (ИВС) данного типа необходимо обеспечить согласованное развитие (для уже существующих) или создание (для вновь создаваемых) информационно-вычислительных систем республиканских ведомств и организаций (включая центральный аппарат правительства и администрацию президента) и интеграцию (объединение) в единую систему всех ведомственных систем с предоставлением удаленного доступа всем заинтересованным (и разрешенным) пользователям к данным и сервисам (функциям) [1].

В связи с этим при разработке информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными необходимо рассмотреть способы организации хранения пространственной информации в системе. Одним из ключевых моментов организации хранения пространственных данных в информационно-вычислительной системе для обеспечения органов исполнительной власти региона

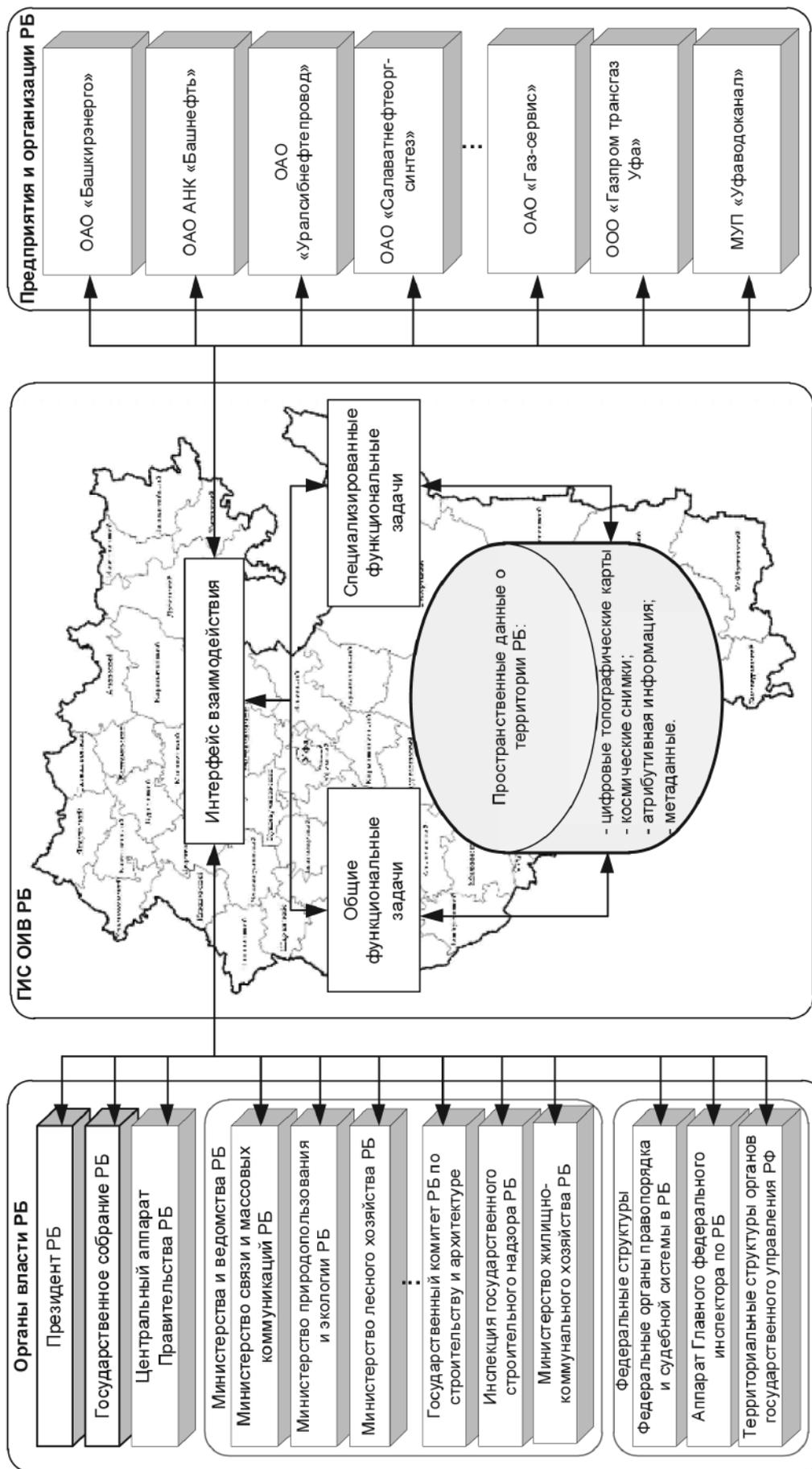


Рис. 1. Схема взаимодействия пользователей с ГИС ОИВ РБ

пространственными данными, по мнению авторов, является формирование единой распределенной базы пространственных данных (РБПД) системы.

Базу данных конкретного i -го органа исполнительной власти обозначим через $БД_i$, где $i = \overline{1, n}$; n – число $БД_i$ соответствующих органов исполнительной власти, а всю распределенную совокупность $БД_i$ обозначим как $РБД$:

$$РБД = \bigcup_{i=\overline{1, n}} БД_i, \quad (1)$$

где $БД_i$ можно определить как

$$БД_i = БД_i^1 + БД_i^2. \quad (2)$$

При этом $БД_i^2$ представляет собой часть специализированных пространственных данных ($СПД_i$) в $БД_i$, а $БД_i^1$ – часть пространственных данных, которая необходима и другим органам исполнительной власти и соответственно должна быть включена в базу данных базовых пространственных данных $БПД$:

$$БД_i^1 \subset БПД. \quad (3)$$

Таким образом, БПД может быть описана следующим соотношением:

$$РБД = \bigcup_{i=\overline{1, n}} БД_i^1. \quad (4)$$

Тогда задача формирования из совокупности $\{БД_i\}$, $i = \overline{1, n}$, единой РБПД заключается в таком выделении в каждой $БД_i$ части специализированных пространственных данных ($СПД_i$) и общей части, входящей в базовые пространственные данные (БПД), чтобы выполнялось соотношение:

$$РБД = \bigcup_{i=\overline{1, n}} БД_i^1 = БПД \cup СПД_1 \cup СПД_2 \cup \dots \cup СПД_n = БПД \cup С. \quad (5)$$

Учитывая соотношение (5) и способ построения базы общих пространственных данных, описываемый в [2, 3], можно утверждать, что любая информация, хранящаяся в одной $БД_i$, будет храниться либо в $СПД_i$, либо в БПД. Такой способ построения информационного обеспечения приводит к оптимальному использованию внешней памяти вычислительных установок и непротиворечивости данных в системе.

В задачах использования пространственных данных часто более важным требованием, чем экономия памяти ЭВМ, является оперативность получения данных. Поэтому хранение общих данных в одном месте хотя и обеспечивает непротиворечивость данных, может оказаться неприемлемым, если при этом увеличивается время получения этих данных конечным пользователем. В этом случае, когда у пользователя существует быстрый и/или дешевый доступ к базе данных БПД (например, через Internet с выделенным каналом), то хранение данных, изначально находившихся в $БД_i^1$, в базе данных БПД оправданно и достаточно.

В том случае, когда время доступа пользователя к базе данных БПД превышает некоторое допу-

стимое значение $t_{дон}$ (определяемое, например, необходимостью принятия решений и мер по реакции на требуемые данные) или получение этих данных достаточно дорого, то $БД_i^1$ должна храниться в $БД_i$ параллельно с хранением входящей в нее информации в базе данных БПД. При этом организационно-техническими мерами (репликацией) своевременно обеспечивается идентичность одних и тех же данных в $БД_i^1$ и базе данных БПД.

Как видно из этих примеров, существует несколько различных способов размещения общих данных в распределенной информационно-вычислительной системе, в зависимости от времени и стоимости доступа к ним. Обозначим t_u – время доступа к общим данным, если они хранятся централизованно только в базе данных БПД (которую обозначим $БД_0$), t_p – время доступа к общим данным, если они хранятся и в $БД_i^1$ и в $БД_0$.

Тогда, если $t_u > t_{дон}$ или $t_u \gg t_p$, то, очевидно, должны параллельно существовать $БД_i^1$ и ее копия в $БД_0$, то есть $БД_i^1 \subset БД_i$ и $БД_i^1 \subset БД_0$. В том случае, если $t_u \leq t_{дон}$ и t_u соизмеримо с t_p ($t_u \sim t_p$), то данные из $БД_i^1$ хранятся только в базе данных БПД, то есть $БД_i^1 \subset БД_0$, но $БД_i^1 \not\subset БД_i$ и $БД_i = БД_i^2$.

Если $t_u \leq t_{дон}$, но $t_u \gg t_p$, необходимо принимать во внимание другие факторы, в первую очередь стоимостные.

Так как параллельное хранение одних и тех же данных в базе данных БПД и в $БД_i$ требует дополнительной памяти ЭВМ для хранения $БД_i^1$, то, естественно, стоимость параллельного хранения данных увеличивается. Обозначим: C_u – стоимость доступа к данным из $БД_i^1$, хранящимся в базе данных БПД; C_p – стоимость доступа к данным из $БД_i^1$, хранящимся в $БД_i$; C_x – стоимость хранения данных $БД_i$ (в основном стоимость дополнительных устройств памяти); C_k – стоимость копирования $БД_i^1$ из базы данных БПД в $БД_i$ для обеспечения непротиворечивости данных.

Тогда очевидным условием для принятия решения о размещении $БД_i^1$ в $БД_i$ является неравенство

$$C_u > C_p + C_x + C_k. \quad (6)$$

После определения места хранения общих данных, исходя из приведенных выше соображений, возможны следующие варианты структуры информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными, определяемые способом организации хранения пространственных данных в системе:

1. Централизованное хранение БД БПД в центре обработки данных (рис. 2). В этом случае все пространственные данные, отнесенные к составу

БД БПД, хранятся в центре обработки данных. Получением новой пространственной информации и администрированием существующей занимаются сотрудники центра. Если же какая-либо пространственная информация, хранящаяся в БД БПД, регулярно обновляется одним из региональных органов исполнительной власти, в силу его профессиональной деятельности, то формируется реплика соответствующей базы данных, которая переносится для хранения в центр обработки данных. Например, пространственные данные о зонах затопления крупных городов

в период половодья хранятся и регулярно получают с использованием специализированного программного обеспечения, моделирующего данное природное явление, в Министерстве экологии и природопользования РБ (Минэкологии РБ). Данная пространственная информация может быть отнесена к БПД, так как необходима многим органам исполнительной власти. Поэтому копия этих пространственных данных периодически формируется в Минэкологии РБ и хранится с целью обеспечения к ним доступа всех заинтересованных участников в центре обработки данных.

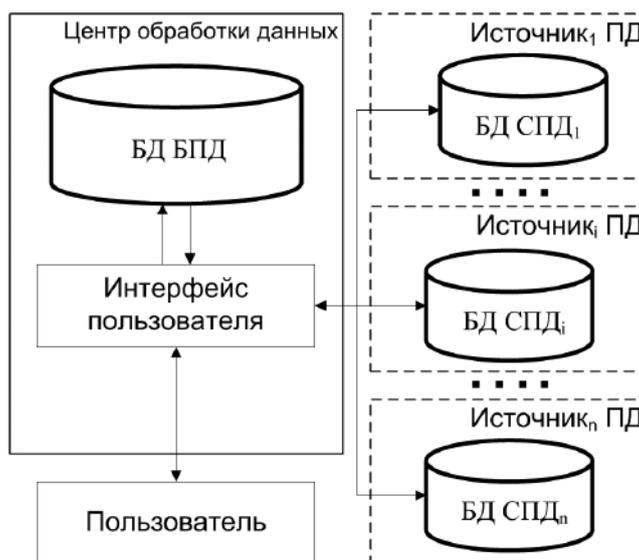


Рис. 2. Схема централизованного хранения БД БПД в центре обработки данных информационно-вычислительной системы

2. Распределенное хранение БД БПД (рис. 3). В этом случае часть БД БПД хранится в центре обработки данных, а часть пространственных данных хранится непосредственно в БД СПД органов исполнительной власти, входящих в состав информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными. Обновление пространственной информации происходит непосредственно в месте хранения. Доступ пользователей к пространственным данным, хранящимся не в центре обработки данных, осуществляется путем перенаправления запросов из центра обработки данных в соответствующую СПД i -го органа исполнительной власти.

3. Хранение БД БПД на основе принципов мэшап (Mash-up). В этом случае (рис. 4) какая-то часть или полностью вся пространственная информация, входящая в БД БПД, хранится в распределенных источниках, входящих в состав информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти региона пространствен-

ными данными. Обновление пространственной информации происходит непосредственно в месте хранения, а доступ пользователей к пространственным данным осуществляется либо через ИВС, либо через веб-сервисы, предоставляемые информационной системой i -го органа исполнительной власти.

Рассмотренные способы хранения и организации доступа к пространственной информации в зависимости от требований определенного органа исполнительной власти позволяют осуществить выбор наилучшего варианта организации информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными. Основываясь на том, что в составе ИВС предполагается интеграция разнородных по формату хранения данных различных источников, предложенные варианты организации хранения пространственной информации не являются взаимоисключающими и могут параллельно использоваться в рамках одной информационно-вычислительной системы.

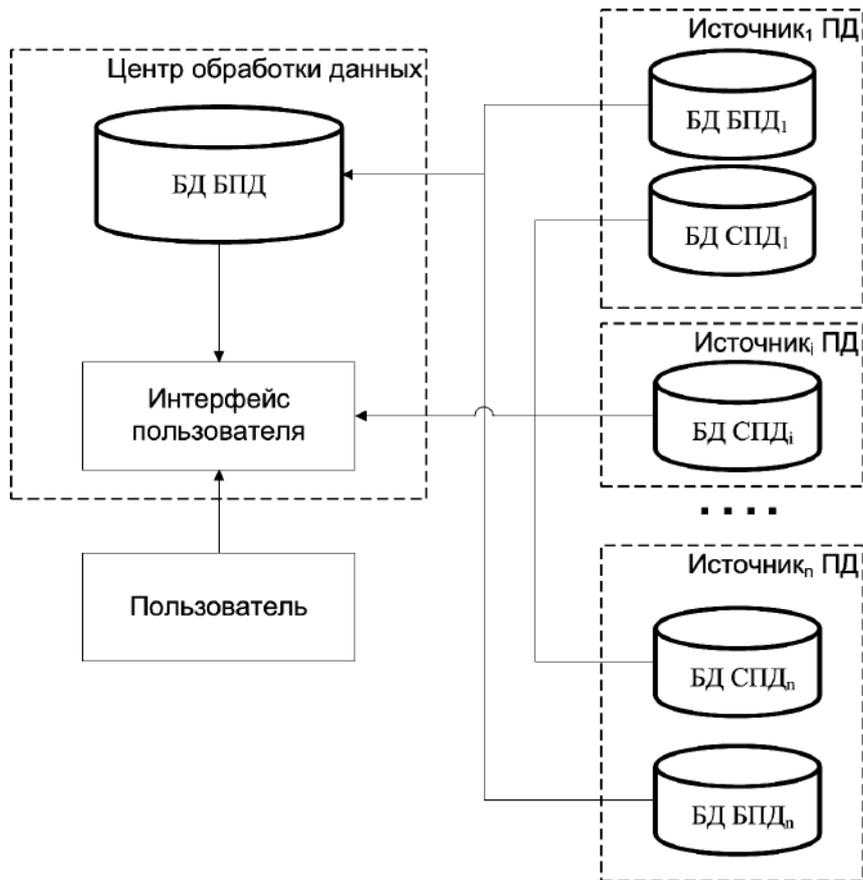


Рис. 3. Схема распределенного хранения БД БПД

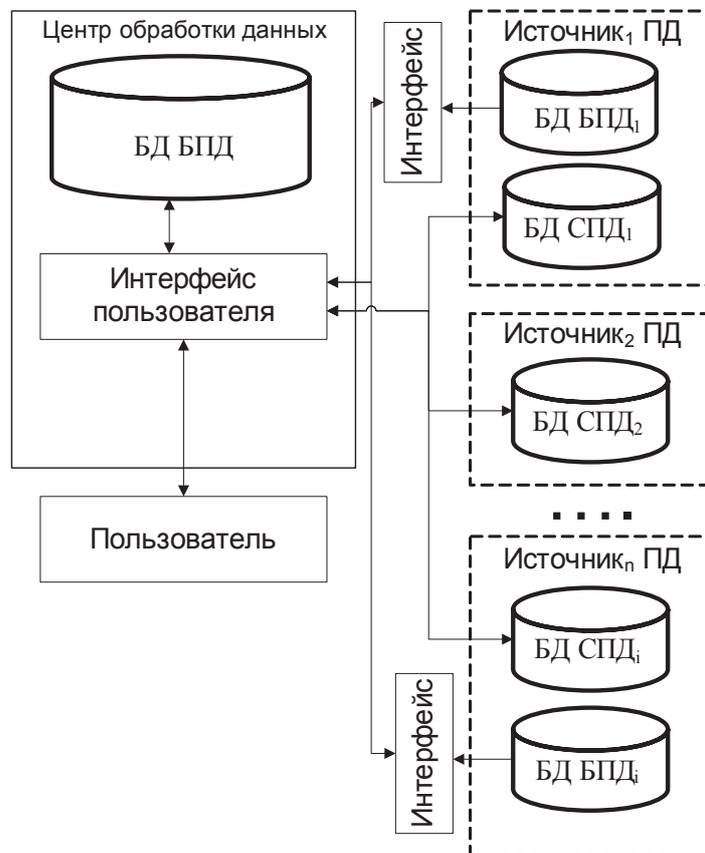


Рис. 4. Схема организации хранения БД БПД на основе принципов мэшап (Mash-up)

Для практической реализации рассмотренных выше структур информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными, по мнению авторов, необходи-

мо использование программного обеспечения с сервис-ориентированной архитектурой. Пример структуры программно-аппаратного комплекса информационно-вычислительной системы представлен на рис. 5.

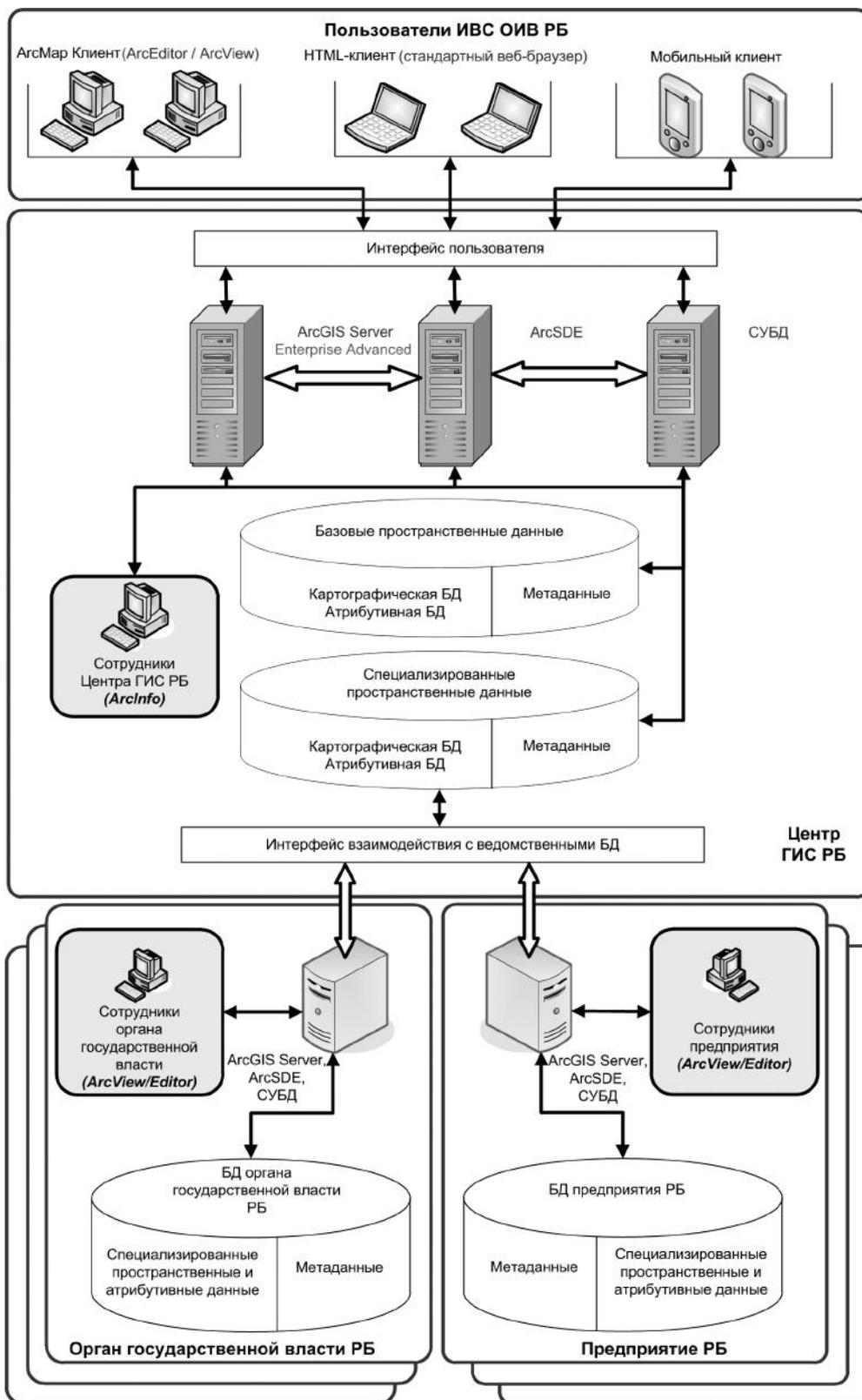


Рис. 5. Структура программно-аппаратного комплекса ИВС ОИВ РФ

Разработка информационно-вычислительной системы для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными, в соответствии с предложенным подходом, позволит организовать интеграцию и совместное использование базовых и специализированных пространственных данных, имеющихся в различных органах исполнительной власти, что, в свою очередь, обеспечит переход на более качественный уровень управления регионом.

Список литературы

1. *Ефремова О.А.* Архитектура геоинформационной системы Республики Башкортостан [Текст] / О.А. Ефремова, Р.Н. Бахтизин, С.В. Павлов, А.С. Павлов // Межвузовский научный сборник: Геоинформационные технологии в проектировании

и создании корпоративных информационных систем. – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 66–73.

2. *Ефремова О.А.* Многопользовательская обработка пространственной информации в региональной инфраструктуре пространственных данных: учебное пособие для бакалавров и магистров направления 230400 «Информационные системы и технологии» [Текст] / О.А. Ефремова, С.В. Павлов, А.С. Павлов. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 117 с.

3. *Бадамшин Р.А.* Многопользовательская обработка распределенно-хранящейся пространственной информации в научно-образовательной ГИС РБ [Текст] / Р.А. Бадамшин, А.С. Павлов // Вестник УГАТУ: научн. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2009. – Т. 12. – № 1 (30). – С. 3–8.



Султанов А.Х.
Sultanov A.Kh.

доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой
«Телекоммуникационные системы»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета,
Россия, г. Уфа



Черных В.В.
Chernykh V.V.

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник кафедры
«Телекоммуникационные системы»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета,
Россия, г. Уфа



Мешков И.К.
Meshkov I.K.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Телекоммуникационные системы»
Уфимского государственного
авиационного технического
университета,
Россия, г. Уфа



Мешкова А.Г.
Meshkova A.G.

аспирант, инженер кафедры
«Телекоммуникационные системы»
Уфимского государственного авиационного
технического университета,
Россия, г. Уфа



Ишмиyarов А.А.
Ishmiyarov A.A.

студент, лаборант кафедры
«Телекоммуникационные системы»
Уфимского государственного авиационного
технического университета,
Россия, г. Уфа

УДК 621.391.037.3

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СКРУГЛЕНИЯ СПЕКТРА В БЕСПРОВОДНЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

В данной статье предлагается разработать методику определения оптимального коэффициента скругления спектра для различных типов формирующих фильтров, позволяющую эффективно использовать спектр сигнала и минимизировать межсимвольные искажения.

Ключевые слова: критерии Найквиста, формирующие фильтры, МСИ, глаз-диаграмма, спектральная эффективность.

THE OPTIMAL SPECTRUM ROUNDING INDEX DETERMINATION METHODS FOR WIRELESS DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS TO ELIMINATE THE INTERSYMBOL INTERFERENCE

This article proposes the design of the optimal spectrum rounding index determination methods for the different types of shaping filters providing the efficient spectrum usage and minimization of the intersymbol distortion.

Key words: Nyquist rate, shaping filters, intersymbol interference, eye diagram, spectral efficiency.

В беспроводных цифровых системах связи данные передаются через ограниченные по полосе каналы. Ограниченность каналов связана с жестким дефицитом частотного ресурса. В связи с этим повышаются требования по ограничению спектра сигнала передатчика, а также повышению его спектральной эффективности. Проблема межсимвольной интерференции (МСИ) и межнесущей интерференции в беспроводных сетях широкополосного доступа является одним из главных негативных факторов, не позволяющим эффективно использовать ресурсы канала связи, при этом эти виды интерференции ограничивают скорость передачи данных, дальность и спектральную эффективность системы связи, а также приводят к росту вероятности ошибочного приема битов. Появление интерференции в беспроводных каналах связано с эффектом многолучевого распространения сигнала, что приводит к усложнению приема из-за отраженных и задержанных по времени сигналов, при этом возникает наложение предыдущих канальных символов на последующие, а также с эффектом замираний или

федингом при распространении сигнала из-за подвижности абонентов при приеме информации.

Формирующие фильтры используются во многих цифровых системах модуляции, например, COFDM, M-QAM, QPSK, OQPSK, DOQPSK, DQPSK и т. д. Коррекция формы импульса позволяет наиболее эффективно использовать спектр в соответствии с пропускной способностью канала передачи данных. Также использование формирующих фильтров, удовлетворяющих критериям Найквиста, является эффективным средством борьбы с межсимвольной и межнесущей интерференцией.

Рассмотрим модель системы (рис. 1), передаваемый сигнал $s(t)$ может быть представлен как свертка дискретной последовательности информационных символов:

$$s(t) = \sum_k a(k)p(t - kT_s), \quad (1)$$

где $a(k)$ – биты, соответствующие k -му символу (или символам констеляционной диаграммы в случае квадратурных методов модуляции); $p(t)$ – форма импульса; T_s – длительность импульса.

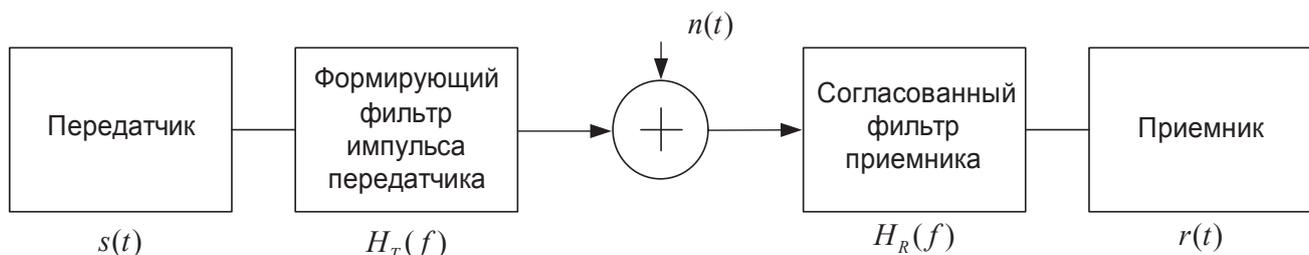


Рис. 1. Модель системы передачи и приема

С выхода передатчика сигнал поступает на формирующий фильтр с передаточной функцией $H_T(f)$.

В канале связи на полезный сигнал действует аддитивный белый гауссовский шум $n(t)$. На приеме сигнал поступает на согласованный фильтр с частотной характеристикой $H_R(f)$.

В общем виде принятый сигнал можно представить в следующем виде:

$$r(t) = \int_0^{T_s} h(t - \tau)s(\tau)d\tau + n(t), \quad (2)$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика канала. Тогда общую передаточную функцию всей системы можно выразить в следующем виде:

$$H(f) = H_T(f) H_R(f) H_C(f), \quad (3)$$

где $H_C(f)$ – передаточная функция канала.

Согласованная фильтрация опирается на выводы Найквиста [1–3] о возможности передачи ограниченных по полосе и свободных от МСИ сигналов. Эти свойства важны для оптимального распознавания символов в приемнике. Введем импульсную характеристику $h_{TR}(t)$, представляющую собой общую

импульсную характеристику передатчика-приемника, а $H_{TR}(f)$ – ее преобразование Фурье.

I критерий Найквиста: нулевая МСИ в моменты выборки. Сигнал, удовлетворяющий I критерию Найквиста (4), пересекает ноль в моменты времени, кратные периоду сигнала T . В этом случае глаз-диаграмма полностью открывается вертикально. Это требование во временной области:

$$h_{TR}(kT) = d_{k0}, k \in Z, \quad (4)$$

где d_{k0} – дельта-функция Кронекера. Тогда в частотной области I критерий Найквиста вносит следующие ограничения:

$$\sum_k H_{TR}(f - k/T) = T. \quad (5)$$

Для импульса необходима частотная характеристика с наименьшей пропускной способностью, которая удовлетворяет критерию нулевой МСИ, то есть когда импульсная характеристика пересекает нулевой уровень в точках, отстоящих друг от друга на величину T .

II критерий Найквиста: регулярность в нулевых точках. Сигнал, удовлетворяющий II критерию Найквиста (6), пересекает ноль в моменты времени $\pm 1,5T, \pm 2,5T, \pm 3,5T$. В результате горизонтальное открытие глаз-диаграммы максимально и равно длительности символа T . Во временной области $h_{TR}(t)$ должна удовлетворять условию:

$$h_{TR}(kT - T/2) = [d_{k0} + d_{k1}]/2, k \in Z. \quad (6)$$

В частотной области (6) эквивалентно:

$$\sum_k (-1)^k H_{TR}(f - k/T) = 2T \cos(\pi f T). \quad (7)$$

Кроме максимальной ширины глаз-диаграммы, введение II критерия Найквиста помогает в ограничении выбросов передаваемого сигнала.

III критерий Найквиста: сохранение площади импульса. Сигнал, удовлетворяющий III критерию Найквиста (8), имеет нулевую площадь для любого другого значения интервала времени, кроме своего собственного. Этот критерий выражается во временной области следующим образом:

$$E = \int_{(2k-1)T/2}^{(2k+1)T/2} h_{TR}(t) dt = d_{k0}. \quad (8)$$

IV критерий Найквиста: невосприимчивость к временному джиттеру (TJ). Сигнал, удовлетворяющий IV критерию Найквиста (9), пересекает ноль в точках $kT, k \neq 0$, при этом p -е производные в этих точках равны нулю. Во временной области это условие переводится в $h_{TR}(t)$, удовлетворяющую следующим условиям:

$$h_{TR}^{(p)}(kT) = \begin{cases} 0, \forall k \in Z, p \in N : (p, k) \neq (0, 0) \\ 1, \text{ для } (p, k) = (0, 0) \end{cases}. \quad (9)$$

Этот критерий обобщает I критерий Найквиста, который в частотной области в настоящее время выражается так:

$$\sum_k k^p H(f - k/T) = h^p T^{p+1}. \quad (10)$$

Такого рода сигналы требуют пропускной способности, линейно растущей с числом нулевых производных в нуле функции, то есть чем больше p , тем шире полоса пропускания канала связи.

При условии идеального канала передачи оптимальный фильтр реализуется передаточной функцией [4], которая имеет частотную характеристику приподнятого косинуса (RC) (11):

$$|H_{RC}(f)| = \begin{cases} 1, 0 \leq |f| \leq \frac{1-r}{2T} \\ \frac{1}{2} + \cos\left[\frac{\pi T}{r} \left(|f| - \frac{1-r}{2T}\right)\right], \frac{1-r}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+r}{2T} \end{cases}, \quad (11)$$

где T – величина, обратная символьной скорости; r – коэффициент скругления – мера избыточности полосы пропускания фильтра, то есть полоса частот вне полосы Найквиста $1/2T$. Если обозначить избыточность полосы через Δf , то $r = 2\Delta f R_s = 2T\Delta f$, где R_s – символьная скорость. Так как соответствующая фильтрация используется на передающей и приемной стороне, то передаточная характеристика передатчика-приемника будет иметь вид: корень из приподнятого косинуса:

$$H_{TR}(f) = \sqrt{|H_{RC}(f)|}.$$

При увеличении коэффициента скругления увеличивается эффективная полоса передачи, то есть полоса используется сверх теоретического минимума, что приводит к нежелательному эффекту расширения полосы пропускания канала связи. При $r = 0$ физически нереализуемый фильтр с минимальной полосой пропускания $f = 1/2T$, при $r = 0,5$ фильтр с 50% расширением полосы, при $r = 1$ фильтр с удвоенной полосой пропускания. Методикой для определения оптимального коэффициента скругления спектра в беспроводных цифровых системах связи может служить анализ глаз-диаграммы для разных отношений C/N , а также анализ различных импульсных характеристик фильтров, уменьшающих влияние МСИ, которые получены путем минимизации конкретных среднеквадратичных искажений сигнала от критериев, сформулированных во временной области, при этом они будут связаны с вероятностью ошибочного приема символов. Наиболее значимыми критериями среднеквадратического отклонения искажений являются:

– критерий МСИ в выбранные моменты времени:

$$e_I^2 = \sum_k [h(kT) - d_{k0}]^2; \quad (12)$$

– критерий регулярности появления нулей:

$$e_{II}^2 = \sum_k [h(kT - T/2) - (d_{k0} + d_{k1})/2]^2; \quad (13)$$

– критерий чувствительности к временному джиттеру:

$$e_{TJ}^2 = \sum_k [h(kT)]^2. \quad (14)$$

В идеальной системе стараются минимизировать (12–14) одновременно:

$$(e_I^2, e_{II}^2, e_{TV}^2) \Rightarrow \min. \quad (15)$$

Однако, поскольку пропускная способность системы связи всегда ограничена, это невозможно сделать. Обычно стараются удовлетворить I критерий Найквиста, а между остальными требованиями ищут компромисс в зависимости от требований, предъявляемых к системе связи.

Кроме того, возможно незначительное нарушение первого критерия в случае, если это приведет к значительному улучшению в остальных критериях. Тогда композиционная погрешность Найквиста будет записана следующим образом:

$$e^2 = \alpha e_I^2 + \beta e_{II}^2 + \chi e_{TV}^2. \quad (16)$$

Минимизация (15) с учетом ограничений $h_{TR}(t)$ приводит к следующей общей передаточной функции:

$$H_{\alpha, \beta, \chi}(f, m) = \begin{cases} \frac{\beta \cos(\pi f) - m}{(\alpha + \beta + 4\pi^2 \chi f^2)}, & 0 \leq |f| \leq \frac{1-r}{2T} \\ \frac{[\beta \cos(\pi f)(\alpha + 2\pi^2 \chi(1-f)(1-2f)) - m(\beta + 2\pi^2 \chi(1-f))]}{2(\alpha\beta + \pi^2 \chi\beta(1-f^2))}, & \frac{1-r}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+r}{2T} \\ 0, & f \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

В (17) частоты были нормализованы так, что период T равен единице, а множитель Лагранжа m удовлетворяет условию (19):

$$\int_{-(1+r)/2}^{-(1+r)/2} H(f) df = 1. \quad (18)$$

Трудности формирования импульсных характеристик фильтра заключаются в выборе оптимальных весовых коэффициентов α, β, χ и оптимизации разработки фильтра согласно критериям (12–15). Уменьшение (17) для определенных α, β, χ дает конечную переходную характеристику фильтров [5–7], представленных ниже:

1. Первый импульс (RC1) удовлетворяет (4) и (6), $\alpha = \beta = 1, \chi = 0$, при этом он не зависит от коэффициента сглаживания, является частным случаем фильтра RC с $r = 1$:

$$H_{RC}(f) = \begin{cases} \cos^2(\frac{\pi f}{2}), & 0 \leq |f| \leq 1 \\ 0, & |f| \notin [0, 1] \end{cases} \quad (19)$$

2. Модифицированный приподнятый косинус (MRC), является импульсом, который минимизирует (4) и является максимально близким к (6). Это достигается установлением таких значений α и β , что $\alpha, \beta, \chi = 0$:

$$H_{MRC}(f) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |f| \leq \frac{1-r}{2} \\ \cos^2(\frac{\pi f}{2}), & \frac{1-r}{2} \leq |f| \leq \frac{1+r}{2} \\ 0, & |f| \notin [0, \frac{1+r}{2}] \end{cases} \quad (20)$$

3. Усеченный приподнятый косинус (TRC): если $\alpha = \beta = 1, \chi = 0$, то получаем усеченный приподнятый косинус. Минимизирует (4), (6) и не удовлетворяет ни (4), ни (6). При этом вводится коэффициент m для нормализации такой, что $m = -2(1+r) + \sin \pi / 2(1+r)$:

$$H_{TRC}(f) = \begin{cases} \cos^2(\frac{\pi f}{2}) - \frac{1+m}{2}, & 0 \leq |f| \leq \frac{1+r}{2} \\ 0, & |f| \notin [0, \frac{1+r}{2}] \end{cases} \quad (21)$$

4. Приподнятый косинус тип 2 (RC2): если требуется сохранить (6) за счет погрешности в (4), то получим RC2. В этом случае весовые коэффициенты устанавливаются $\beta, \alpha, \chi = 0$:

$$H_{RC2}(f) = \begin{cases} \cos(\pi f), & 0 \leq |f| \leq \frac{1-r}{2} \\ \cos^2(\frac{\pi f}{2}), & \frac{1-r}{2} \leq |f| \leq \frac{1+r}{2} \\ 0, & |f| \notin [0, \frac{1+r}{2}] \end{cases} \quad (22)$$

5. Непрерывный фильтр (BTRC), предложенный в [8], имеет непрерывный спектр, что является плюсом при практической реализации, при этом импульс не согласовывается по композиционному критерию погрешности (16), хотя он имеет погрешность по (6), что сравнимо с MRC и TRC:

$$H_{BTRC}(f) = \begin{cases} 1, 0 \leq |f| \leq \frac{1-r}{2} \\ \exp\left(\frac{-2 \ln 2}{r} \left(f - \frac{1-r}{2}\right)\right), \frac{1-r}{2} \leq |f| \leq \frac{1+r}{2} \\ 1 - \exp\left(\frac{-2 \ln 2}{r} \left(\frac{1+r}{2} - f\right)\right), \frac{1}{2} \leq |f| \leq \frac{1+r}{2} \\ 0, |f| \notin \left[0, \frac{1+r}{2}\right] \end{cases} \quad (23)$$

Для каждого типа фильтра было проведено имитационное моделирование в пакете MATLAB, были получены глаз-диаграммы фильтров, формы спектров, а также сняты технические показатели глаз-диаграмм для разных отношений C/N (рис. 2–6).

В качестве оценочных параметров глазковых диаграмм фильтров были выбраны среднеквадратический джиттер (позволяет оценить девиацию джиттера) и горизонтальное глазковое открытие

(позволяет оценить влияние МСИ) как наиболее значимые характеристики, позволяющие провести более детальный анализ цифрового сигнала.

Для определения оптимального коэффициента скругления спектра для определенного типа формирующего фильтра необходимо провести оценку фильтров с точки зрения минимизации МСИ; наиболее эффективным является фильтр TRC, так как позволяет использовать минимальные коэффициенты скругления спектра при разных отношениях C/N, при этом значения горизонтального раскрытия глаз-диаграммы имеют равномерный характер. Фильтр MRC показывает наименьшее горизонтальное раскрытие при C/N = 15 dB, что позволяет его использовать при меньших значениях коэффициента скругления и минимизации ширины спектра. Минимизация влияния МСИ достигается для фильтров RC, RC2 и BTRC при условии минимального r.

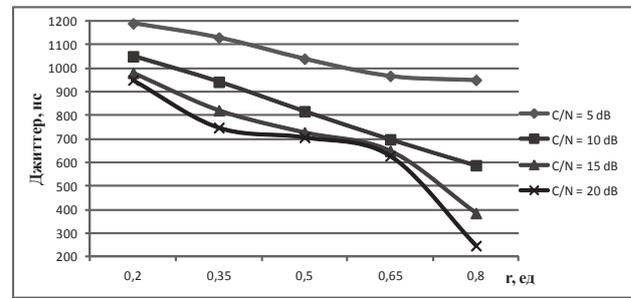
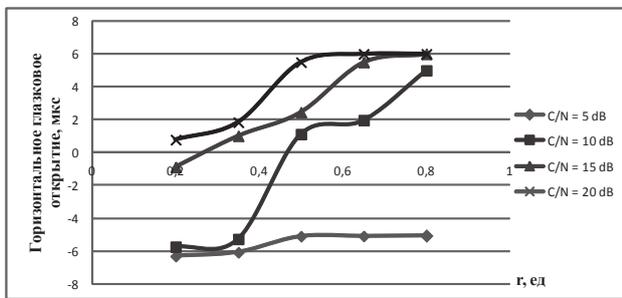


Рис. 2. Зависимость коэффициента сглаживания спектра для фильтра RC от: а) горизонтального глазкового открытия; б) джиттера

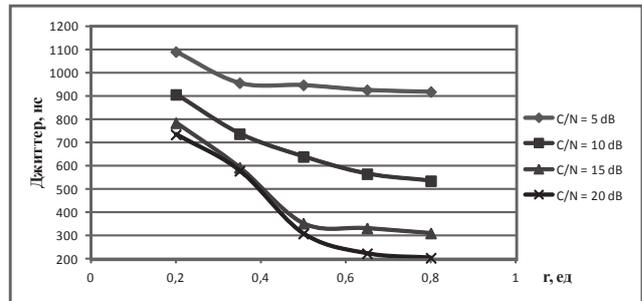
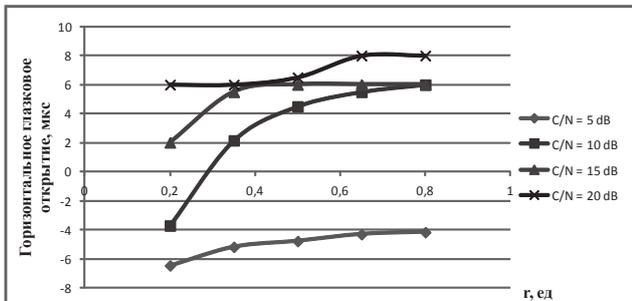


Рис. 3. Зависимость коэффициента сглаживания спектра для фильтра MRC от: а) горизонтального глазкового открытия; б) джиттера

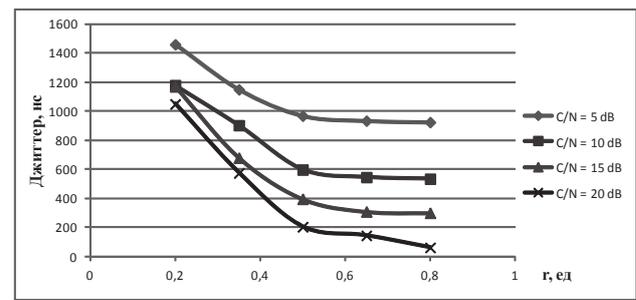
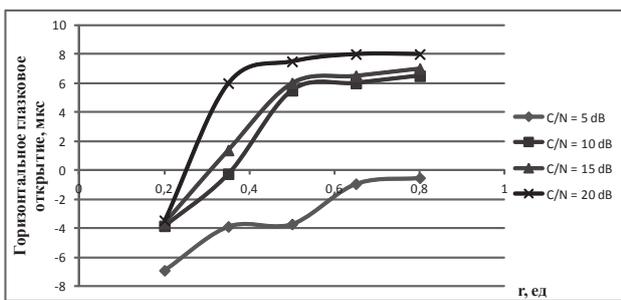


Рис. 4. Зависимость коэффициента сглаживания спектра для фильтра RC2 от: а) горизонтального глазкового открытия; б) джиттера

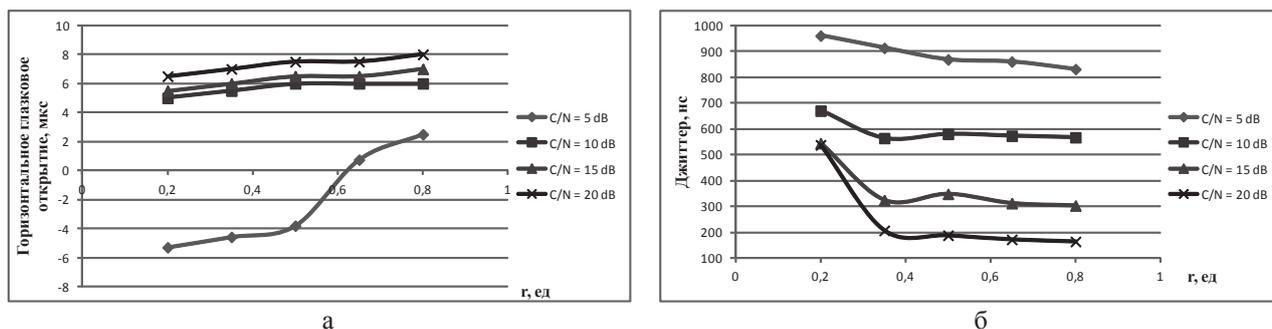


Рис. 5. Зависимость коэффициента сглаживания спектра для фильтра TRC от: а) горизонтального глазкового открытия; б) джиттера

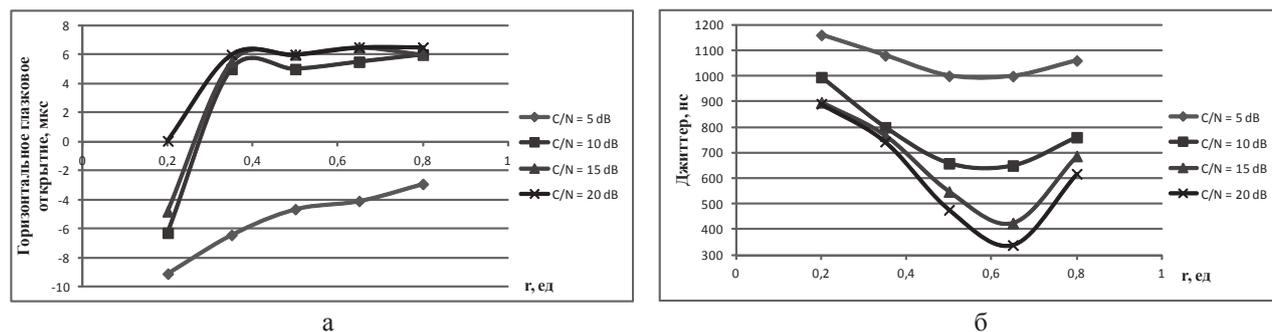


Рис. 6. Зависимость коэффициента сглаживания спектра для фильтра BTRC от: а) горизонтального глазкового открытия; б) джиттера

При оценке среднеквадратического джиттера для полученных фильтров была выявлена зависимость уменьшения джиттера при повышении C/N , но для фильтра RC при $r = 0,5-0,65$ наблюдается область равномерного значения джиттера (~ 700 нс) с последующим резким падением, а для фильтра MRC данный эффект наблюдается в области $r = 0,2-0,45$. Данный эффект может быть интересен при использовании его для снижения отношения C/N в системе связи для определенных r . Минимальный джиттер наблюдается у фильтра TRC, причем характеристики имеют стабильный характер, что позволяет сделать вывод о том, что данный фильтр является более эффективным для реальных систем связи. Методикой для определения оптимального коэффициента скругления служит комплексный критерий минимизации горизонтального глазкового открытия и джиттера для определенных типов формирующих фильтров.

Исследование и применение разных типов формирующих фильтров является эффективным средством увеличения производительности беспроводной системы связи с ограниченной полосой пропускания. При этом влияние МСИ может быть частично подавлено посредством ограничения импульсной характеристики формирующего фильтра. Полученные в данной работе результаты могут повысить эффективность работы цифровой беспроводной системы связи для снижения влияния МСИ без увеличения сложности аппаратной реализации системы связи в целом.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.В37.21.1974).

Список литературы

1. *Certain topics in telegraph transmission theory* [Text] / Н. Nyquist // AIEE Trans. – 1928. – Vol. 47. – № 4. – P. 617–644.
2. *Курешу Ш.У.Х. Адаптивная коррекция* [Текст] / Ш.У.Х. Курешу // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73. – № 9. – С. 5–49.
3. *Прокис Дж. Цифровая связь* [Текст] / Дж. Прокис; пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
4. *Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение* [Текст] / Б. Скляр. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
5. *Panayiotopoulos I. Quasi-matched filtering in QAM symbol rate sampled receivers* [Text] / I. Panayiotopoulos, A. Posondis, P. Constantinou // IEEE transactions on communications. – 2001. – Vol. 49. – № 2. – P. 360–374.
6. *Sousa E.S. Pulse shape design for teletext data transmission* [Text] / E.S. Sousa, S. Pasupathy // IEEE transactions on communications. – 1983. – Vol. 31. – № 7. – P. 871–878.
7. *Andrew C.C. Pulse shaping for differential offset-QPSK* [Text] / C.C. Andrew, A. Elkhazin, S. Pasupathy, K.N. Plataniotis // IEEE transactions on communications. – 2006. – Vol. 54. – № 2. – P. 1731–1734.
8. *Beaulieu N.C. A «better than» Nyquist pulse* [Text] / N.C. Beaulieu, C.C. Tan, M.O. Damen // IEEE Commun. Lett. – 2001. – Vol. 5. – № 9. – P. 367–368.



Розалиев В.Л.
Rozaliev V.L.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Системы
автоматизированного
проектирования
и поискового
конструирования»
Волгоградского
государственного
технического университета,
Россия, г. Волгоград



Орлова Ю.А.
Orlova Y.A.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Системы
автоматизированного
проектирования
и поискового
конструирования»
Волгоградского
государственного
технического университета,
Россия, г. Волгоград



Шпирко А.А.
Shpirko A.A.

магистр
Волгоградского
государственного
технического
университета,
Россия, г. Волгоград



Дорофеев Н.С.
Dorofeev N.S.

магистр
Волгоградского
государственного
технического
университета,
Россия, г. Волгоград

УДК 004.822:514

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ МОДЕЛИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

В работе описан метод, позволяющий на основе данных, получаемых с камеры с сенсором глубины – Microsoft Kinect, строить универсальную векторную модель движения тела человека, с которой могут работать большинство существующих на сегодняшний день анимационных пакетов. Также описывается построение системы преобразований вращений из алгебры кватернионов, предоставляемых сенсором Kinect в алгебру углов Эйлера, которые используются для описания вращения в большинстве форматов, описывающих движение, и доказана их эквивалентность.

Ключевые слова: кватернионы, Kinect, векторная модель, вращение, захват движения.

AUTOMATION OF CONSTRUCTING HUMAN'S BODY VECTOR MODEL

In this paper is described a method, which allows to build universal human's body vector model, compatible to any animation-providing software using 3-D camera Microsoft Kinect with depth-sensor.

Also, a system of conversions quaternion's algebra to Euler angles' algebra was built and their equivalence was proved.

Key words: quaternions, Kinect, vector body, rotation, motion capture.

Введение

На сегодняшний день такая технология, как «захват движения», или motion capture, получила широкое распространение благодаря увеличивающейся мощности и удешевлению вычислительных ресурсов, а также большому вниманию, уделяемому данной теме со стороны ученых и разработчиков программного обеспечения, и растущими потребностями многих сфер в индустрии, где необходимо представление движения человека в цифровом виде [1]. Но одной из самых больших проблем

является все еще дорогостоящее оборудование для захвата движения и целый ряд ограничений на условия съемки и окружающее пространство, накладываемый этим оборудованием. А имеющиеся в распоряжении разработчиков доступные средства не обладают достаточной вычислительной мощностью, чтобы обеспечить режим захвата движения в реальном времени. Формализованное представление о движении человека необходимо во многих сферах промышленности, таких как кинематограф, анимационные студии, область

здравоохранения, охранная деятельность, учебная деятельность [2]. Наиболее полные данные о движении предоставляет так называемая векторная модель тела человека, которая представляет собой формализованные соотношения между основными узлами тела человека, данные о координатах этих узлов относительно друг друга и окружающего пространства с учетом основных антропометрических характеристик. Распознанное движение объекта реального мира необходимо для построения на его основе анимации, повторяющей основные движения оригинала, для создания различного рода симуляторов и тренажеров.

В статье описан метод формализации движения в виде векторной модели тела человека с по-

мощью данных о движении, получаемых с камеры Microsoft Kinect [3].

Формализация движения

Для представления формализованного движения был выбран формат BVH, как наиболее распространенный и наиболее полно описывающий структуру человеческого тела. BVH обозначает данные Bio Vision Hierarchical [4]. Этот формат предоставляет возможность представления информации об иерархии каркаса тела человека в добавление к данным о движении. Каждый элемент скелета содержит в себе информацию о смещении и вращении относительно родительского элемента. Вращение представляется в углах Эйлера.

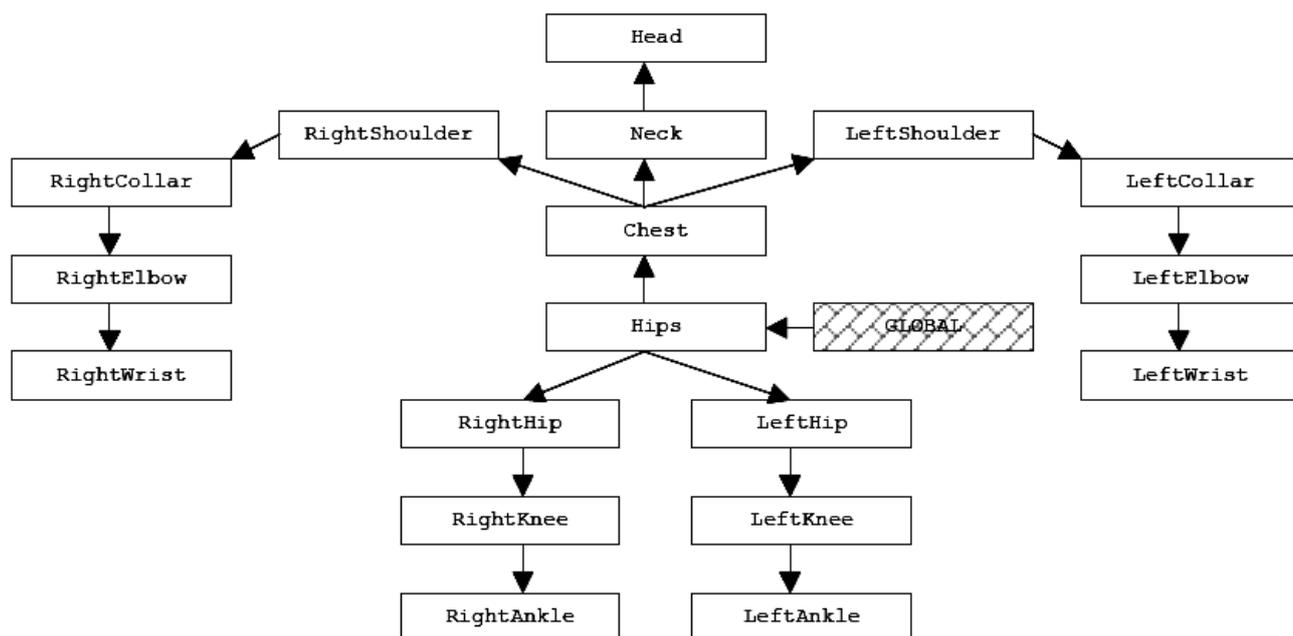


Рис. 1. Иерархическая структура BVH-файла

Для отображения движения в BVH-файле для каждой кости в каждом кадре рассчитывается ее локальная матрица трансформации:

$$M = TRS,$$

где T, R, S – матрицы перемещения (translation), вращения (rotation), масштабирования (scale) соответственно в координатах родительского элемента.

Чтоб получить глобальную матрицу трансформации для конкретного узла скелета, локальную матрицу необходимо умножить на матрицу трансформации родительского элемента, для которого работает этот же принцип [5].

Глобальную матрицу трансформации для каждого элемента скелета можно рассчитать по формуле:

$$M_{глоб}^n = \prod_{i=0}^n M_{локал}^i. \quad (1)$$

Представление движения, получаемого с камеры Microsoft Kinect

Kinect предоставляет данные о движении в виде иерархии основных узлов скелета человека, где вращение одних суставов относительно других представлено в виде кватернионов (роль вращающихся векторов выполняют кости скелета), а смещение представлено в виде трехмерных векторов в локальной для каждого узла системе координат:

$$T_{лок}^n = (x_n - x_{n-1}, y_n - y_{n-1}, z_n - z_{n-1}),$$

$T_{лок}^n$ – локальное смещение n -го узла относительно родительского узла, $n > 0$;

$$T_{глоб}^n = \prod_{i=0}^n T_{локал}^i$$

$T_{глоб}^n$ – смещение n -го узла относительно глобальной системы координат;

$$Q_{\text{глоб}}^n = \prod_{i=0}^n Q_{\text{локал}}^i,$$

$Q_{\text{глоб}}^n$ – кватернион, представляющий вращение в глобальной СК; $Q_{\text{лок}}^n$ – кватернион, представляющий вращение в локальной СК (относительно родительского элемента); n – порядковый номер узла в иерархической цепочке скелета тела человека; i – порядковый номер дочернего узла в цепочке, $i < n$.

Таким образом, любой узел человеческого тела в представлении движения от Kinect характеризуется вектором смещения T и кватернионом вращения Q для каждого кадра f :

$$J_n = \langle Q_n T_n f \rangle \quad \begin{array}{l} ; n, f \in \mathbb{N}, \\ ; Q \in \mathbb{H}, \\ ; T \in \mathbb{R}^3. \end{array} \quad (2)$$

Таким образом, чтобы представить получаемое с камеры Kinect движение в формате BVH, необходимо найти соответствие между кватернионными представлениями углов вращений основных суставов человеческого тела и представлением этих же вращений в углах Эйлера.

Представление вращения, задаваемого кватернионами, в углах Эйлера

Для представления вращения, задаваемого кватернионом $Q_{\text{вск}}$, в углах Эйлера, вводятся три единичных, взаимно перпендикулярных вектора $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3$, где вращение сначала происходит вокруг \hat{e}_1 , затем вокруг \hat{e}_2 , затем вокруг \hat{e}_3 , тогда суммарное вращение будет равно [6]:

$$R_3 R_2 R_1 = (\cos \frac{\theta_3}{2} + \hat{e}_3 \sin \frac{\theta_3}{2}) (\cos \frac{\theta_2}{2} + \hat{e}_2 \sin \frac{\theta_2}{2}) (\cos \frac{\theta_1}{2} + \hat{e}_1 \sin \frac{\theta_1}{2}). \quad (3)$$

Раскроем скобки и введем новую переменную e : $\hat{e}_3 \hat{e}_2 \equiv e \hat{e}_1$,

где $e = \pm 1$, в зависимости от порядка вращения, также знаем, что

$$\hat{e}_3 \cdot \hat{e}_3 = \hat{e}_2 \cdot \hat{e}_2 = \hat{e}_1 \cdot \hat{e}_1 = -1,$$

тогда:

$$Q_1 Q_2 Q_3 = (\cos \frac{\theta_3}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1}{2} - e \sin \frac{\theta_3}{2} \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1}{2}) + \hat{e}_1 (\cos \frac{\theta_3}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1}{2} + e \sin \frac{\theta_3}{2} \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1}{2}) + \hat{e}_2 (\cos \frac{\theta_3}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1}{2} - e \sin \frac{\theta_3}{2} \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1}{2}) + \hat{e}_3 (\cos \frac{\theta_3}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1}{2} + e \sin \frac{\theta_3}{2} \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1}{2}). \quad (4)$$

В качестве компонентов результирующего кватерниона устанавливаются:

$$p_0 = (\cos \frac{\theta_3}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1}{2} - e \sin \frac{\theta_3}{2} \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1}{2})$$

$$p_1 = (\cos \frac{\theta_3}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1}{2} + e \sin \frac{\theta_3}{2} \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1}{2})$$

$$p_2 = (\cos \frac{\theta_3}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1}{2} - e \sin \frac{\theta_3}{2} \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1}{2})$$

$$p_3 = (\cos \frac{\theta_3}{2} \cos \frac{\theta_2}{2} \cos \frac{\theta_1}{2} + e \sin \frac{\theta_3}{2} \sin \frac{\theta_2}{2} \sin \frac{\theta_1}{2}).$$

Произведя ряд преобразований, углы поворотов вокруг осей выражаем формулами:

$$\tan \theta_3 = \frac{2(p_0 p_3 - e p_1 p_2)}{1 - 2(p_2^2 + p_3^2)} \quad (5)$$

$$\sin \theta_2 = 2(p_0 p_2 + e p_1 p_3) \quad (6)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{2(p_0 p_1 - e p_2 p_3)}{1 - 2(p_1^2 + p_2^2)}. \quad (7)$$

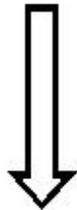
Таким образом, представлен алгоритм представления данных, получаемых в виде кватернионов вращения в виде углов Эйлера, что дает возможность формализовать движения в BVH-файле.

Метод построения универсальной векторной модели тела человека на основе данных сенсора Microsoft Kinect

Векторная модель тела человека есть формализованное представление движения человека, где в виде векторов представлены кости человеческого скелета, а углам между ними соответствуют углы поворота основных узлов человеческого тела друг относительно друга.

Под универсальностью подразумевается формализация движения в формате, с которым сможет работать широкий круг приложений и анимационных пакетов.

Для построения векторной модели тела человека используется камера с инфракрасным датчиком глубины – Kinect от Microsoft. Эта камера позволяет получать объемное изображение при любых условиях освещенности и без определенных требований к актеру, находящемуся в кадре. С помощью проприетарного программного обеспечения и Kinect SDK можно получить данные о распознанном движении, но эти данные представлены в виде кватернионов вращения. Чтобы получаемые данные можно было формализовать в виде BVH-файла, предлагается следующий метод:



```

Вращение = {
  QLeftLeg.quaternion = [w,x,y,z]
  QLeftArm.quaternion = [w,x,y,z]
  .....
  QFootLeft.quaternion = [w, x,y,z]
}
Смещение http: {
  QLeftLeg.position = [x,y,z]
  QLeftArm.position = [x,y,z]
  .....
  QFootLeft.position = [x,y,z]
}
    
```

ПРИМЕР РАБОТЫ СИСТЕМЫ

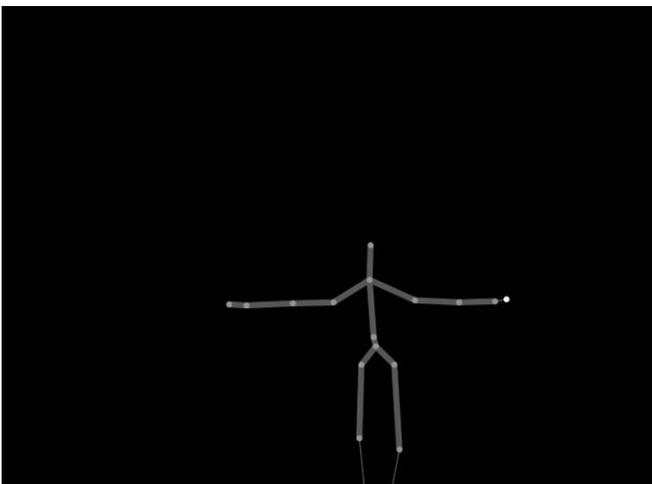


Рис. 2

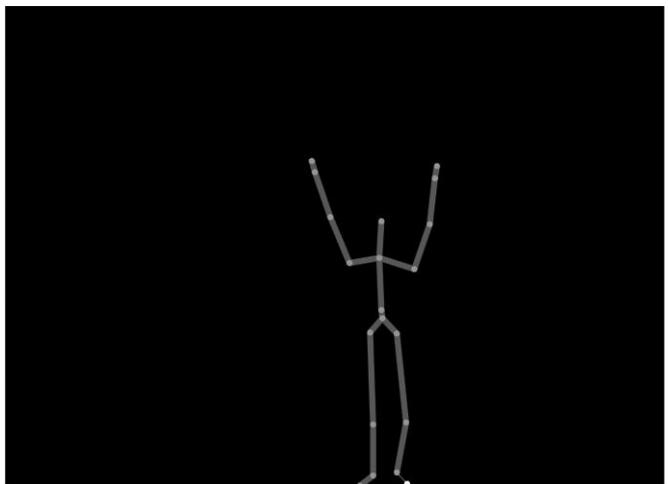


Рис. 3

НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS



Денисова О.А.

Denisova O.A.

*кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика»
Уфимского государственного университета
экономики и сервиса, Россия, г. Уфа*

УДК 535, 534

ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

В работе описан метод возбуждения гармонических сдвиговых колебаний (метод фонера, маятниковый способ), который впервые реализован в данной работе. Он применялся для экспериментального исследования жидких кристаллов под действием механического сдвига. Впервые были обнаружены эффекты ориентационной и азимутальной неустойчивостей. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке датчиков вибрации для конструкций, зданий, сооружений, например, для нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, периодический сдвиг, ориентационная неустойчивость, азимутальная неустойчивость.

ONE OF THE METHODS OF EXPERIMENTAL RESEARCH LIQUID CRYSTALS

This paper describes the method of harmonic excitation of shear waves (method phoner, pendulum method), which was first implemented in this paper. It was used for the experimental study of liquid crystals under mechanical shear. Were first discovered the effects of orientation and azimuthal instabilities. The results of the research can be used in the development of vibration sensors for structures, buildings, structures, for example, the oil and gas industry.

Key words: nematic liquid crystal, a periodic shift the orientation instability azimuthal instability.

Со времени проведения первой Международной конференции по жидким кристаллам (ЖК), которая состоялась в 1965 году в Кентском университете в США, связь этих систем с различными аспектами лазерной, дисплейной техники, информационных оптических технологий, термооптики, медицины и т. д. стала предметом оживленной полемики. Жидкий кристалл, являясь уникальной мезоморфной фазой вещества, сочетает в себе свойства как твердых тел (наличие дальнего ориентационного

порядка и проявление брэгговской дифракции), так и жидкостей (проявление текучести, вязкости).

Действительно, с недавнего времени очень большой интерес вызывают состояния вещества, промежуточные между жидкостью и твердым телом. Такие состояния имеют важные практические приложения, а кроме того, их исследование открывает путь к решению фундаментальных проблем статистической физики. Как сказал П. де Жен: «Жидкие кристаллы красивы и загадочны. Меня

восхищает и то и другое».

Хотя жидкие кристаллы известны уже более ста лет, лишь в последние годы они привлекли пристальное внимание физиков. Эта вспышка интереса была вызвана многими причинами. Во-первых, жидкие кристаллы ускорили революцию в технике устройств визуального представления информации (дисплеев), а это заинтересовало тех, кто занимается фундаментальными исследованиями. Во-вторых, жидкокристаллическое состояние присуще многим биологически активным системам, в том числе и человеческому телу, и потому является одним из важнейших направлений биологических исследований. В-третьих, и это важнее всего, физика жидких кристаллов оказалась необычайно сложной. Лишь благодаря успехам, достигнутым теорией фазовых переходов, намечился более или менее определенный подход к основным проблемам физики жидких кристаллов. Но и сейчас многие из этих фундаментальных проблем остаются нерешенными.

Нематики и холестерики очень чувствительны к внешним полям. Первые эффекты, обусловленные влиянием магнитного поля, были найдены в 30-х и 40-х годах прошлого века группами советских ученых под руководством В.К. Фредерикса и В.Н. Цветкова. В последнее время возрос интерес к жидким кристаллам как к наноматериалам. Размеры молекул жидкого кристалла – от 5 Å в толщину и 30 Å в длину, до 200 Å в толщину и 3000 Å в длину, например, для вируса табачной мозаики. Биологические мембраны – это тонкие (~80 Å) листики из липидов и белков. Они играют ключевую роль во многих жизненных процессах, но об их структуре известно мало. Большая часть физических экспериментов (например, ЯМР) не может быть осуществлена на отдельной мембране, поскольку она содержит слишком мало вещества. Однако можно создать модельную систему из липидов и воды или даже из липида, белка и воды, имеющую ламеллярную (слоистую) структуру. Предполагается, что каждый отдельный слой будет аналогом мембраны.

Целью представленной работы было экспериментально обнаружить и исследовать ориентационную неустойчивость (акустический аналог перехода Фредерикса) и азимутальную неустойчивость. Оба эффекта имеют место из-за нарушения пространственной симметрии ЖК-системы. Жидкокристаллический порядок затрагивает многие физические свойства вещества, а поэтому жидкие кристаллы можно исследовать различными экспериментальными методами: ультразвуковым, методом ядерного магнитного резонанса, электронного, парамагнитного резонанса, методами линейной

и нелинейной оптики. Для обнаружения и экспериментального изучения упомянутых выше эффектов был предложен и разработан новый метод. Предложил его доктор физико-математических наук, профессор Башкирского государственного университета, увы, ныне покойный, Чувыров Александр Николаевич. А впервые реализован метод фонера (маятниковый способ) в представленной работе.

Выбор объектов исследования в данной работе определялся: во-первых, наличием в литературе экспериментальных данных о параметрах ЖК-веществ как общего [1, 2, 3, 4, 5], так и специального характера; во-вторых, необходимостью разработки единой методики изучения свойств, а также процессов структурообразования в ЖК, инициируемых акустическими полями:

– *n* – метоксибензилиден – *n* – бутиланилин (МББА). МББА является одним из наиболее распространенных и изученных жидких кристаллов. Температурный интервал существования мезофазы 18–42 °С. Молекулы этого соединения имеют ярко выраженную анизотропную форму с дипольным моментом, направленным под углом к длинной оси молекулы, $p \sim 2,6$ Д. Анизотропия диэлектрической проницаемости $\epsilon_a = -0,56$. Стереометрия расположения атомов в молекуле МББА позволяет аппроксимировать ее форму как в виде «капли», так и в виде «банана»;

– 4 – октил – 4' – цианофенил (ОЦБ). Температурный интервал существования мезофазы 34–41,3 °С. Дипольный момент $p \sim 5,0$ Д. Анизотропия диэлектрической проницаемости $\epsilon_a > 0$. Исследуемое соединение ОЦБ образовано сильно поляризованными молекулами, дипольный момент которого определяется CN-связью. Форму молекулы можно приблизительно считать клиновидной или в виде вытянутой капли.

Для проведения экспериментальных исследований свойств ЖК с целью поиска ориентационной и азимутальной неустойчивостей использовались ячейки типа «сэндвич». Для исследования воздействия акустических полей рассматривались различные конструкции экспериментальных ячеек, которые представлены в таблице. Ячейка собирается из прозрачных стеклянных пластин (20 x 30 x 2 мм).

Проводящее покрытие из хрома на пластинах, образующих ячейку, позволяло получать гомеотропную ориентацию молекул ЖК. При использовании методики зондирования ЖК-молекул сдвигами колебаниями в качестве прокладок служило покровное стекло, изготовленное в виде узких полосок толщиной 130–200 мкм. В общем случае для исследования представляют интерес пленки тол-

щиной $h \sim 10\text{--}135$ мкм. Для получения гомеотропной ориентации использовался метод спонтанной ориентации молекул [2], который состоит в следующем. Жидкий кристалл, помещенный в ячейку-капилляр, нагревался до температуры на $10\text{--}15^\circ\text{C}$ выше температуры фазового перехода в изотропное состояние с последующим охлаждением до образования мезофазы. После чего гомеотропная ориентация молекул возникает самопроизвольно, т. е. спонтанно.

Для получения планарной ориентации молекул ЖК подложки натирались бумагой высокого качества или алмазной пастой. Далее на подложки наносилась двуокись олова SnO_2 путем восстановления 4-хлористого олова в потоке кислорода при температуре 470°C .

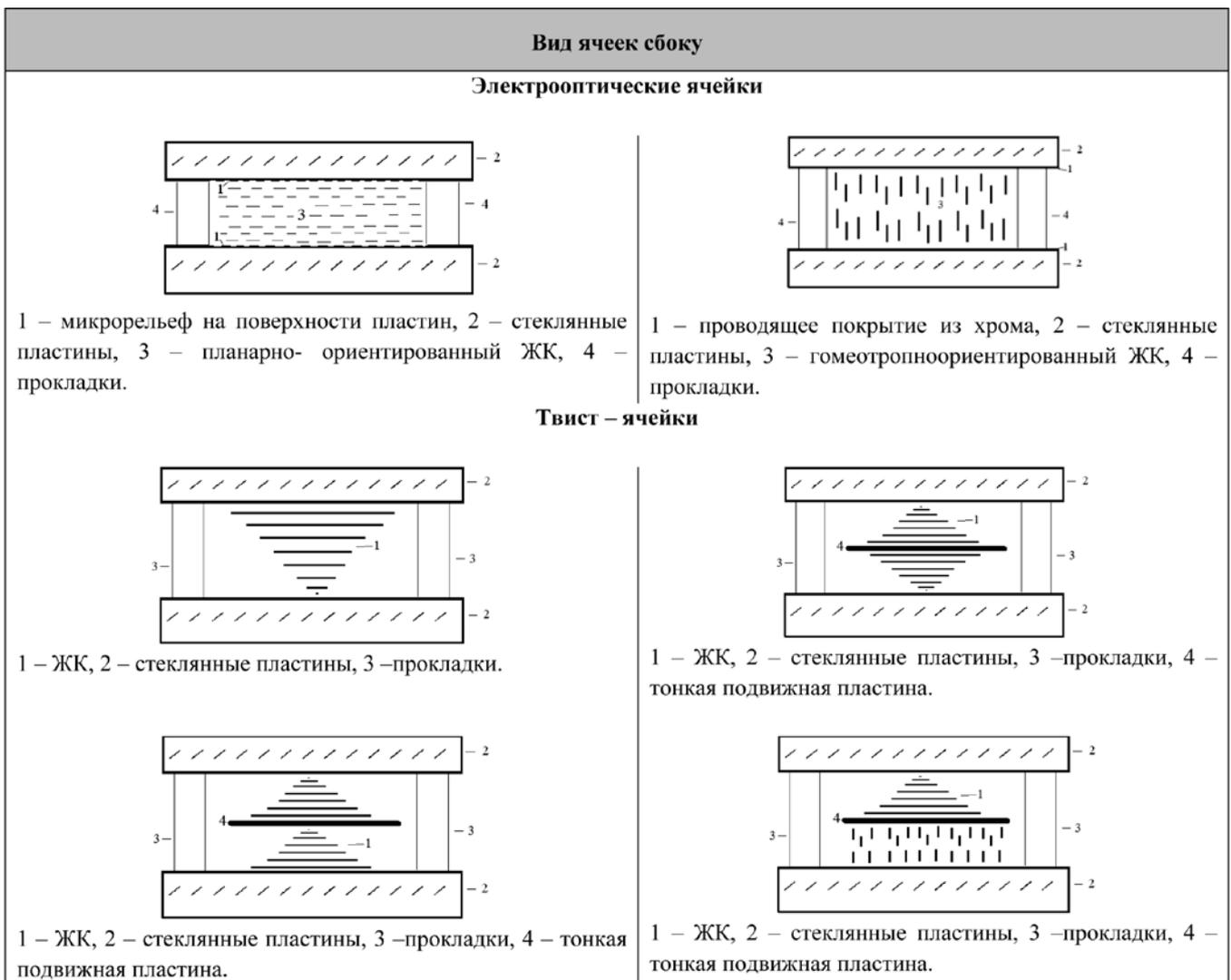
Заполнение капилляра нематическим жидким кристаллом обычно осуществляется с последую-

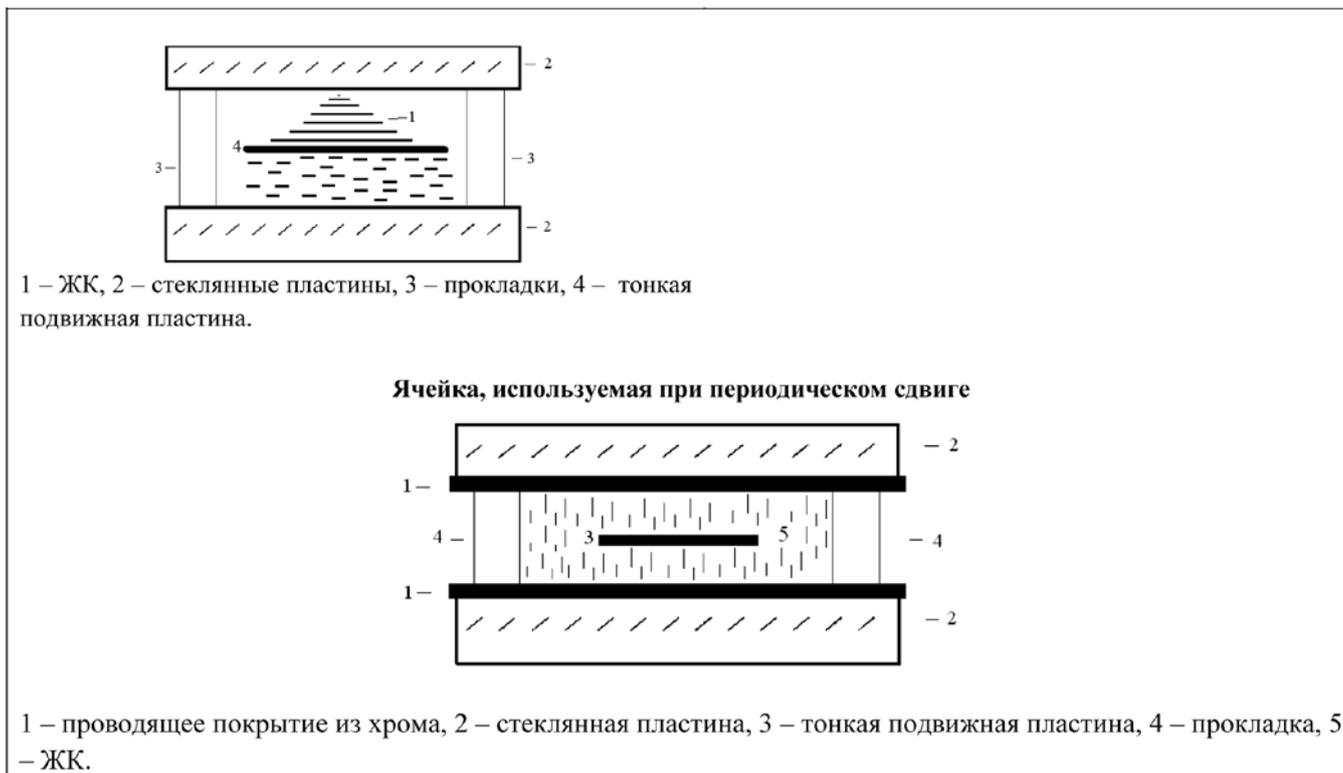
щим использованием капиллярных сил, поэтому для работы с теми жидкими кристаллами, у которых температура существования мезофазы выше комнатной, необходимо заполнение ячейки проводить при температуре, соответствующей нематическому состоянию конкретного кристалла. В итоге этой процедуры молекулы жидкого кристалла принимают планарную ориентацию, которая легко контролировалась с помощью поляризационного микроскопа.

Таким образом, в этом случае ячейка представляла собой конденсатор с некоторой частью свободного пространства, через которое посредством микрошприца жидкий кристалл заправлялся в ячейку. Если исследуемое вещество находилось в твердой фазе при комнатной температуре, то ячейка нагревалась до температуры плавления этого кристалла, и далее ЖК заправлялся аналогично.

Таблица

Конструкции измерительных ячеек, применяемых в экспериментах





Электрооптический эффект в нематических жидких кристаллах (НЖК) связан с поворотом оптической индикатрисы, поэтому методика исследования электрооптического эффекта в НЖК мало чем отличается от методики исследования электрооптического эффекта в твердых телах. Поскольку НЖК одноосны, то исследования электрооптического эффекта можно проводить поляризационно-оптическими методами. Обоснование этого следует из того, что при повороте оптической индикатрисы изменяется лишь один показатель преломления.

Поляризационно-оптические методы формально можно разделить на нулевые и ненулевые. Последние имеют в схеме элемент, компенсирующий разность хода. Это значительно увеличивает точность измерения показателя преломления, но затрудняет проведение измерения показателей преломления быстро протекающих процессов. Поэтому ненулевые методы применялись в схемах с медленным изменением показателей преломления. Ненулевой и нулевой поляризационно-оптические методы чаще всего используются для исследования динамики процессов.

Практически оба рассмотренных метода были реализованы на основе поляризационного микроскопа *Amplival Pol U* (рис. 1, 2). Источником света служила лампа микроскопа или когерентный источник света от лазера ЛГИ-5 (длина волны $\lambda = 627$ нм) [6, 7]. Для выделения узкой монохроматической ли-

нии около 0,5 нм применялась спектрофотометрическая приставка (СФН), позволяющая проводить исследования в диапазоне длин волн 0,22–0,80 мкм. Кроме того, приставка позволяла проводить измерения двулучепреломления участка ЖК ~1 мкм. Световой поток регистрировался фотоэлектронным множителем (ФЭУ). Прошедший через ячейку с НЖК свет, промодулированный локальным изменением оптической анизотропии $\Delta n(t)$, преобразовывался в электрический сигнал с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-79, который находится в составе СФН. Прошедшая или отраженная от ячейки световая волна регистрировалась приставкой типа СФН-10. Постоянная компонента светового потока далее фиксировалась милливольтметром постоянного тока. Переменный во времени оптический сигнал $I(t)$ и его гармоники $I(n\omega, t)$ усиливались и детектировались селективным усилителем (У2-8 или Унипан-233), а при необходимости сигнал выводился на самописец, графопостроитель.

В данной работе использовался прибор для исследования вероятностных характеристик случайных процессов. Во время эксперимента производилась прямая запись оптического сигнала и спектров. Далее информация записывалась на компьютер в виде файла, удобного для дальнейшей обработки данных. Конструкция прибора Х6-11 позволяла наблюдать получаемый сигнал на мониторе, который находится на лицевой панели прибора. От-

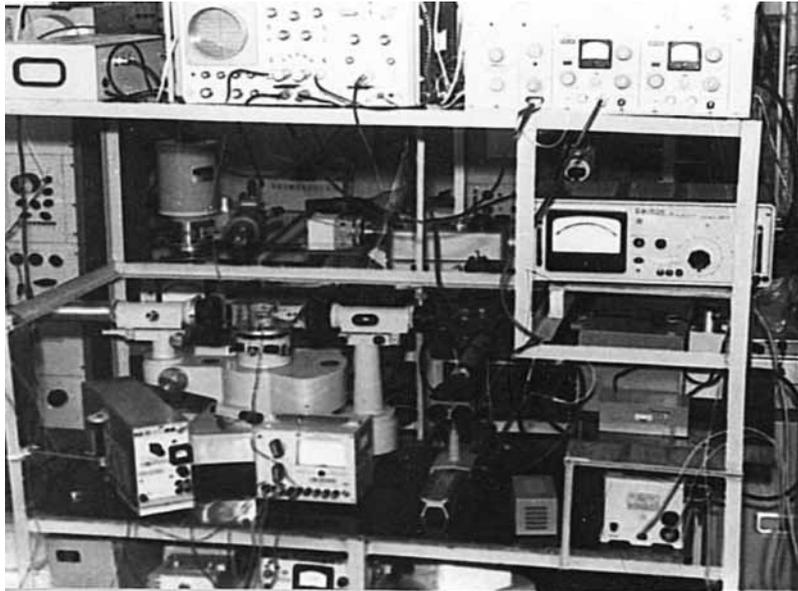


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

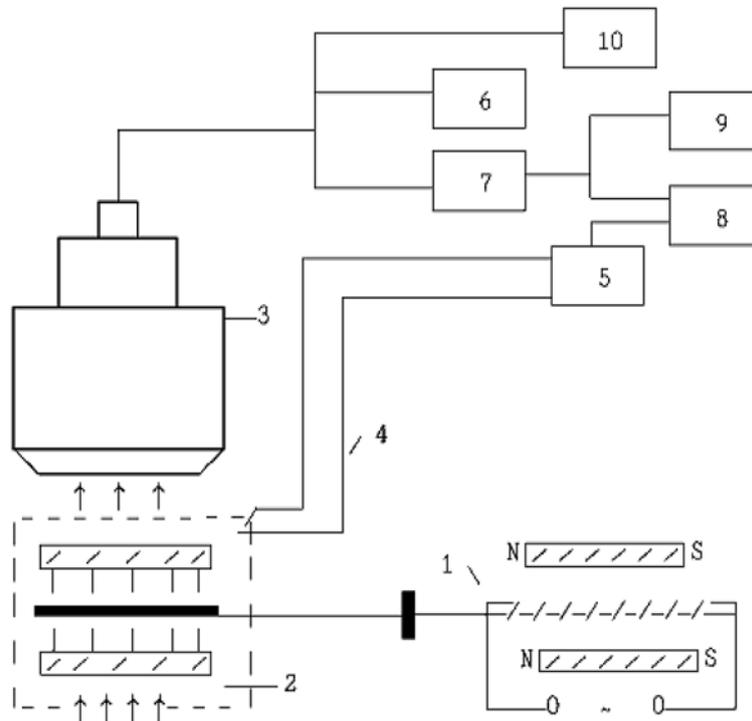


Рис. 2. Блок-схема поляризационно-оптической установки для исследования акустооптических эффектов (сдвиг):

- 1 – источник звуковых колебаний; 2 – предметный столик; 3 – поляризационный микроскоп с фотометрической приставкой; 4 – дифференциальная термопара; 5 – микровольтметр постоянного тока; 6 – милливольтметр постоянного тока; 7 – селективный усилитель У2-8; 8 – АЦП; 9 – компьютер; 10 – прибор Х6-11

ношение «сигнал/шум» составляло 10^3 .

Необходимо отметить, что в данной работе впервые был реализован метод фонера и маятниковая система возбуждения сдвиговых колебаний. Подвижная пластина ячейки соединялась с фонером с помощью тонкого стеклянного волновода, что позволяло передавать колебательные движения ячейке с ЖК. Этот способ воздействия на ЖК-ячейку отличается от других способов, применявшихся ранее

русскими и зарубежными исследователями. Видимо, использование именно вышеуказанных конструкций ячеек и методов возбуждения ориентационных волн в слоях жидких кристаллов, а также методов регистрации исследуемых сигналов дало возможность наблюдать эффекты ориентационной и азимутальной неустойчивостей.

Суть эффекта ориентационной неустойчивости заключается в следующем. При действии низкоча-

стотного периодического сдвига (частота воздействия ~ 100 Гц) малой амплитуды наблюдается эффект фотоупругости. Молекулы жидкого кристалла колеблются симметрично относительно нормали к ячейке по направлению сдвига и против него. При

достижении амплитуды сдвига $\sim 0,8$ мкм симметрия образца нарушается, и молекулы ЖК выстраиваются под углом θ к нормали ячейки (рис. 3). Эффект имеет пороговый характер возникновения.

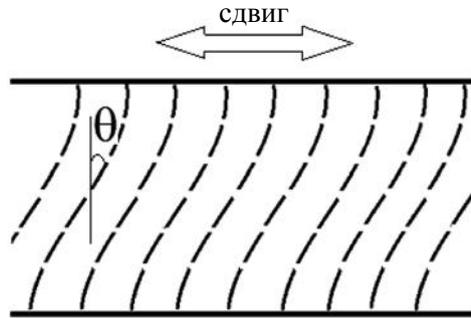


Рис. 3. Иллюстрация акустического перехода Фредерикса

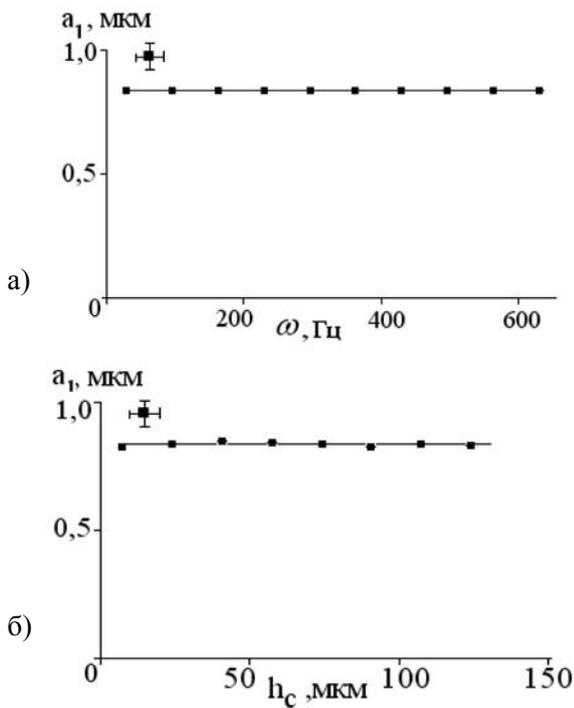


Рис. 4. Зависимости порога возникновения эффекта Фредерикса от: а) частоты и б) толщины ЖК-слоя

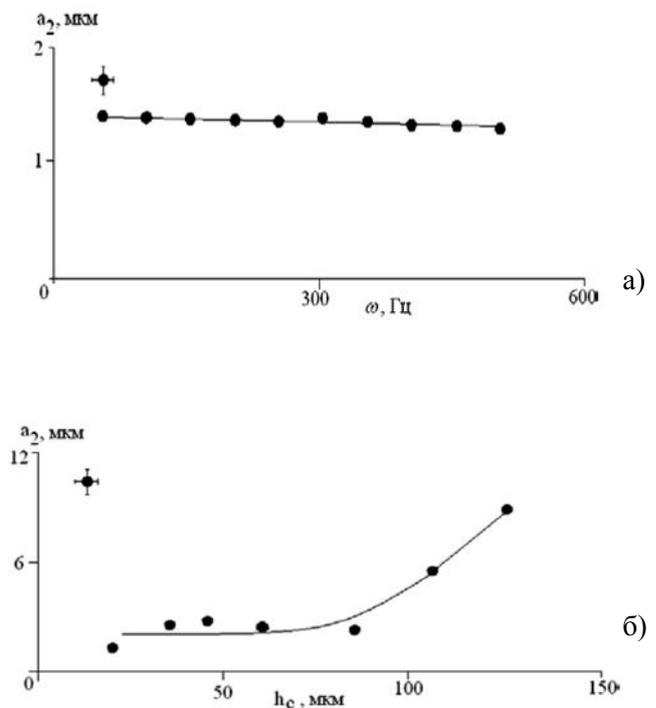


Рис. 5. Зависимости порога возникновения азимутальной неустойчивости от: а) частоты и б) толщины ЖК-слоя

Было обнаружено, что порог a_1 не зависит от частоты, температуры и толщины ЖК-слоя (рис. 4). Обнаруженный эффект является акустическим аналогом перехода Фредерикса [8–12, 15].

Эффект азимутальной неустойчивости наблюдается при дальнейшем увеличении амплитуды сдвига до $\sim 1,4$ мкм. Молекулы жидкого кристалла ведут себя как «волчок». Директор поворачивается на определенный угол α , покидая плоскость первоначального колебания. Причем конец директора описывает эллиптическую траекторию [8–13].

Порог не зависит от частоты и температуры, но зависит от толщины ЖК-слоя (рис. 5). Оба перехода были теоретически предсказаны в работе Крехова, Крамера, Буки, Чувьрова [14].

Таким образом, в статье описан впервые реализованный в данной работе метод фонера (маятниковый способ) экспериментального исследования жидких кристаллов под действием периодических сдвиговых колебаний, позволяющий обнаружить эффекты ориентационной и азимутальной неустойчивости, изучение которых полезно с точки зрения

практического применения. Открытые эффекты могут быть использованы, например, при разработке датчиков вибрации или сейсмодатчиков.

Список литературы

1. *Де Жен П.* Физика жидких кристаллов [Текст] / Де Жен П. – М.: Мир, 1977. – 377 с.
2. *Капустина О.А.* Акустооптические свойства жидких кристаллов и их применение [Текст] / О.А. Капустина. – Л.: ЦНИИ РУМБ, 1979. – 196 с.
3. *Сонин А.С.* Введение в физику жидких кристаллов / А.С. Сонин. – М.: Наука, 1983. – 319 с.
4. *Таблицы физических величин.* Справочник [Текст] / Под редакцией И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
5. *Гребенников Е.А.* Метод усреднения в прикладных задачах [Текст] / Е.А. Гребенников. – М.: Наука, 1986. – 255 с.
6. *Галактионов Н.И.* Твердотельный лазер с амплитудным шумом на уровне естественного и его применение для сверхчувствительных измерений [Текст] / Н.И. Галактионов // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4. – Вып. 16. – С. 1001–1005.
7. *Miike Hidetoshi.* Laser light scattering study on the electrohydrodynamic instability of NLC [Text] / Miike Hidetoshi, Kuriyaffla Ysuo, Hashimoto Hajime, Ebina Yoshio // J. Phys. Soc. Jap. – 1984. – Vol. 53. – № 10. – P. 3280–3283.
8. *Vaimakova O.A.* The orientational instability of nematic layers under oscillatory shear [Text] / O.A. Vaimakova, O.A. Scaldin, A.N. Chuvyrov // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 1995. – Vol. 265. – P. 299–314.
9. *Денисова О.А.* Оптические датчики вибрации на основе жидких кристаллов с гомеотропной ориентацией молекул [Текст] / О.А. Денисова, А.Н. Чувывров // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 5. – С. 367–375. – URL: http://www.ogbus.ru/authors/Denisova/Denisova_1.pdf.
10. *Денисова О.А.* Структурные переходы в жидких кристаллах. Влияние осциллирующих потоков и электрических полей [Текст] / О.А. Денисова, А.Н. Чувывров // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrucken, Germany, 2012. – 266 с.
11. *Чувывров А.Н.* Физика жидких кристаллов: поверхность: научное издание [Текст] / А.Н. Чувывров, О.А. Денисова, Ф.М. Гирфанова. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2009. – 324 с.
12. *Денисова О.А.* Неравновесные структурные превращения жидких кристаллов в электрических полях и акустических потоках: научное издание [Текст] / О.А. Денисова. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2012. – 188 с.
13. *Денисова О.А.* Возможный механизм возникновения эффекта азимутальной неустойчивости жидких кристаллов [Текст] / О.А. Денисова, А.Н. Чувывров // Вестник Челябинского государственного университета. – 2011. – Вып. 10. – № 15 (230). – С. 42–44.
14. *Krekhov A.P.* Flow alignment of nematics under oscillatory shear [Text] / A.P. Krekhov, L. Kramer, A. Buka, A.N. Chuvyrov // J. Phys., France. – 1993. – V. 3. – № 9. – PP. 1387–1397.
15. *Денисова О.А.* Акустооптические датчики вибрации на основе нематических жидких кристаллов [Текст] / О.А. Денисова // Сборник научных статей 9-й Международной научно-технической конференции «Инновации и перспективы сервиса». – Уфа: УГУЭС, 2012. – Ч. II. – С. 137–141.



Доломатов М.Ю.
Dolomatov M.Yu.

*доктор химических наук, профессор
кафедры «Физика» Уфимского
государственного университета
экономики и сервиса, Россия, г. Уфа*



Паймурзина Н.Х.
Paimurzina N.Kh.

*аспирант Уфимского государственного
университета экономики и сервиса,
Россия, г. Уфа*

УДК 539.194

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ В ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Исследованием электронных спектров и компьютерными расчетами установлены квантовые эффекты электронной корреляции в органических полупроводниках на основе полициклических ароматических углеводородов. Установленные закономерности выражаются в зависимости первого потенциала ионизации органических полупроводников от энергии нижних уровней электронов в молекулах. Полученные зависимости обоснованы спектроскопическими экспериментами, квантовыми расчетами, методами Хартри – Фока и подтверждены статистической обработкой экспериментальных данных.

Ключевые слова: электронные корреляции, интегральная сила осциллятора, органические полициклические полупроводники, потенциалы ионизации, электронные спектры поглощения.

SPECIFIC QUANTUM EFFECTS OF ELECTRONIC CORRELATION IN ORGANIC SEMICONDUCTORS

Quantum effects of electronic correlation in quantum organic polycyclic semiconductors on the basis polycyclic aromatic hydrocarbons have been established by investigation of electronic spectra and computer calculations. Determined regularities are express by correlation between first ionization potential of organic polycyclic semiconductors and energy of lower electron levels in molecules. Found correlations are proofed by spectroscopic experiments, quantum calculations of Hartree – Fock methods and statistical treatment of experimental data.

Key words: electronic correlation, integral oscillator strength, organic polycyclic semiconductor, ionization potential, electronic absorption spectrum.

В последние годы в молекулярной электронике предложены полевые органические транзисторы, полупроводниковыми элементами которых являются молекулы аценовых, ароматических и гетероароматических соединений [1, 2]. Как известно, твердые органические полупроводники на основе полициклических ароматических и гетероциклических соединений относятся к проводникам n-типа [1, 2]. Механизм электронной проводимости реализуется за счет перехода электронов с высшей за-

нятой на низшую свободную молекулярную орбиталь (МО) и переносом электрона между отдельными молекулами твердого проводника по экситонному механизму. Важными характеристиками органических полупроводников являются первые потенциалы ионизации и сродство к электрону. Из теоремы Купманса [3] известно, что первые потенциалы ионизации (ПИ) коррелируют с энергией высшей занятой МО, а сродство к электрону (СЭ) связано с энергией низшей свободной МО. Эти два па-

раметра наряду с энергией электронно-экситонного взаимодействия определяют ширину запрещенной зоны и, следовательно, электропроводность материалов. Поэтому оценка таких энергий имеет важное значение для нанoeлектроники.

Целью данной работы является исследование корреляционных эффектов, обусловленных взаимодействием внешних и внутренних электронов в молекулах, в частности, рассмотрено влияние глубоких молекулярных орбиталей на экспериментально определенные по электронным спектрам поглощения первые потенциалы ионизации.

В настоящее время для определения и расчета ПИ применяют методы фотоэлектронной спектроскопии и квантовой теории на основе метода Хартри – Фока или функционала плотности. Известно, что в сложных молекулярных системах с большим числом атомов (больше 40) эти методы дают существенную ошибку, так как в неполной степени отражают взаимодействие электронов спин-спинового и кулоновского типа, а также специфические квантовые корреляции.

Поэтому, несмотря на развитие математического аппарата квантовой механики молекул, существует проблема количественной оценки электронных взаимодействий в молекулярных системах и твердых телах, которые связаны с эффектами взаимного кулоновского и обменного взаимодействия электронов. Решение данной проблемы методом Рутана в приближении Хартри – Фока [3], а также методом функционала плотности Коена [3] сталкивается с серьезными трудностями применительно к многоэлектронным молекулярным системам. В качестве метода определения первого ПИ использован метод электронной феноменологической спектроскопии (ЭФС). В основе данного метода применяются закономерности, установленные в работах [4–6]:

$$E = \alpha_1 + \alpha_2 \theta_{ig}; E = \alpha'_1 + \alpha'_2 \theta, \quad (1)$$

где E – энергия граничных орбиталей ПИ, СЭ, эВ; $(\alpha_1, \alpha'_1), (\alpha_2, \alpha'_2)$, – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа орбитали, постоянные в данном гомологическом ряду, соответственно эВ, эВ·нм⁻¹;

$$\theta = \int \xi d\lambda, ; \quad \theta_{ig} = \int \lg(\xi) d\lambda, \quad (2)$$

где θ – интегральный показатель поглощения (ИСО), 10⁻¹⁰·м³·моль⁻¹; θ_{ig} – интегральный логарифмический показатель поглощения (логарифмическая ИСО), нм; $\xi = f(\epsilon)$ – соответствующая спектральная функция поглощения электромагнитного излучения для атомов или молекул, где ϵ – молярный коэффициент поглощения, размерность, принятая в электронной спектроскопии, л·моль⁻¹·см⁻¹, в СИ 10⁻¹·м²·моль⁻¹.

Закономерности (1) являются частным случаем более общей зависимости, установленной в работах Доломатова М.Ю., Мукаевой Г.Р. [5, 6], связывающей свойства молекулы сложных физико-химических систем с ИСО (принцип «спектр – свойство»), которые в общем случае нелинейные. В квазилинейном приближении зависимость имеет вид:

$$\Delta Z = \gamma \Delta \theta, \quad (3)$$

где Z – равновесное физико-химическое свойство системы, поглощающей излучение, в единицах измерения свойств; γ – коэффициент, зависящий от класса исследуемых веществ и способа измерения свойств, имеющих размерность [свойства]* 10¹⁰·м³·моль⁻¹; θ – интеграл, характеризующий квантовый континуум состояний электронов в молекулярных системах; зависимость ПИ от θ означает корреляцию электронов различных уровней (состояний с различными квантовыми числами).

Экспериментальная часть

Для исследований электронной структуры в качестве объектов исследования выбраны полициклические ароматические полупроводники, содержащие от двух до пяти линейно-аннеллированных бензольных колец (табл.).

Таблица

Электронные свойства органических полупроводников

Органические полупроводники	ИСО, 10 ⁻⁷ ·м ³ ·моль ⁻¹	ПИ, эВ	СЭ, эВ
5,6-бензхризен	12368,45	8,52	0,78
тетрафен	22232,12	8,33	0,93
1,2-7,8-добензантрацен	8281,34	8,40	0,90
1,2-3,4-5,6-трибензантрацен	10461,22	8,45	0,89
1,2-3,4-5,6-7,8-тетрабензантрацен	13498,67	8,51	0,86
1,2-бензтетрафен	10805,84	8,19	1,08
3,4-бензтетрафен	16715,51	8,17	1,10
3,4-8,9-добензтетрафен	17449,62	8,24	1,06

Органические полупроводники	ИСО, 10 ⁻⁷ ·м ³ ·моль ⁻¹	ПИ, эВ	СЭ, эВ
пентафен	23947,05	8,32	0,96
3,4-бензпентафен	14350,02	8,27	1,03
1,2-5,6-добензтетрафен	13999,66	8,23	1,07
6,7-бензпентафен	18547,84	8,41	0,92
нафт[2',3':3,4]пентафен	13323,24	8,16	1,15
2,3-бензпицен	11875,58	8,22	1,08
2,3-8,9-добензпицен	6961,32	8,22	1,09
антрацено[2',1':1,2]тетрафен	11410,41	8,14	1,10
тетрацен	28887,38	7,87	1,35
1,2-бензтетрацен	19507,66	7,96	1,30
1,2-7,8-добензтетрацен	18065,9	8,05	1,24
1,2-9,10-добензтетрацен	23000,31	8,05	1,24

Регистрация электронных спектров проведена в растворах химически чистого этанола, оптически прозрачного в диапазоне больше 200–780 нм. Запись спектров проводилась в ближнем УФ и видимой области с шагом 10 нм, в кварцевых кюветках с длиной оптического пути 1 см при концентрации вещества около 1 г/л. Отдельные спектры выбирались из соответствующих баз данных [7].

Первые вертикальные ПИ оценивались по ИСО в видимой и УФ областях по зависимости (2). Минимальное значение ИСО в исследуемом ряду равно 6961,32·10⁻⁷·м³·моль⁻¹ для 2,3-8,9-добензпицен, а максимальное значение, равное 28887,38·10⁻⁷·м³·моль⁻¹, соответствует тетрацену.

Обсуждение результатов

Распределение энергии электронов для многоэлектронных систем определяется системой интегродифференциальных уравнений в приближении Хартри – Фока [3]:

$$F\Psi_i = \varepsilon_i\Psi_i, \tag{4}$$

где F – фокиан; ε_i – энергии МО.

Молекулярные орбитали $\Psi_i(\mu)$ представляют в виде линейных комбинаций атомных орбиталей (ЛКАО) $\chi_i(\mu)$:

$$\Psi_m(\mu) = \sum C_{mi}\chi_i(\mu), \tag{5}$$

где C_{mi} – коэффициенты разложения; χ_i является базисом для построения молекулярной волновой функции Ψ_m .

Неизвестные коэффициенты C_{mi} находятся с применением вариационной минимизации полной электронной энергии молекулы. Эти коэффициенты задаются нелинейной системой уравнений Е. Рутана [3]:

$$\sum_j (F_{ij} - \varepsilon_m S_{ij})C_{mj} = 0, \tag{6}$$

где

$$F_{ij} = \Phi_{ij} + \sum_{k,l} Q_{kl} (\langle ij | kl \rangle - \frac{1}{2} \langle ik | jl \rangle) \tag{7}$$

при условии нормировки $\sum_{i,j} C_{mi} C_{mj} C_{ij} = \begin{cases} 1, m = n \\ 0, m \neq n \end{cases}$.

Суммирование осуществляется по всей совокупности базисных наборов АО χ_i, χ_j, χ_k и χ_l ; S_{ij} – интервал перекрытия АО χ_i и χ_j ; Φ_{ij} – матричный элемент одноэлектронного гамильтониана, в котором учитывается кинетическая энергия и энергия взаимодействия электронов с другими электронами и атомными ядрами; Q_{kl} – матрица плотности (зарядов и порядков связей); $\langle ij | kl \rangle$ – интеграл кулоновского взаимодействия двух электронов:

$$\langle ij | kl \rangle = \iint \chi_i \chi_j (1/r) \chi_k \chi_l d\tau_k dr. \tag{8}$$

В интегралах (8) интегрирование производится по всему пространству декартовых координат: r – расстояние между соответствующими электронами.

На основе приближенной теоремы Купманса вертикальные первые ПИ рассматриваются как энергии высшей занятой МО (ВЗМО), взятой с обратным знаком. В качестве методов расчета энергии МО был выбран неэмпирический метод RHF-3-21G** с полной оптимизацией геометрии молекулы.

Эффект корреляции между определенными вертикальными ПИ и энергиями глубинных МО для рядов полициклических ароматических углеводородов представим в виде линейного матричного уравнения [8]:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{i1} \\ \varepsilon_{i2} \\ \dots \\ \varepsilon_{im} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -p_{11} \\ 1 & -p_{12} \\ \dots & \dots \\ 1 & -p_{1m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{1i} \\ \alpha_{2i} \\ \dots \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{i1} \\ \omega_{i2} \\ \dots \\ \omega_{im} \end{pmatrix}, \tag{9}$$

где ε_{ij} – элемент матрицы-столбца, соответствующий энергии i -й МО j -го соединения; α_{1i} – энергия i -й МО при $p_{1j}=0$; α_{2i} – коэффициент, характеризующий изменение энергии i -й МО при увеличении энергии соответствующего уровня на 1 эВ; p_{1j} – экспериментальный первый вертикальный ПИ j -го соединения; ω_{ij} – параметр возмущения, учитывающий отклонение ε_{ij} от среднего значения, $i=2\dots n$, $j=1\dots m$.

Выражение (9) можно переписать в виде:

$$E_i = P1_i \times A_i + \Omega_i, \quad (10)$$

где E_i – вектор-столбец энергий i -й МО; $P1_i$ – матрица экспериментальных значений первых вертикальных ПИ в приближении Купманса; A_i – вектор-столбец эмпирических коэффициентов взаимодействия электронов, характеризующих изменение энергии i -й МО; Ω_i – вектор-столбец возмущений, учитывающих отклонение E_i от среднего значения, i – номер исследуемой МО.

Исходя из известной теоремы Гаусса – Маркова для МНК, можно выразить вектор-столбец коэффициентов A_i как:

$$A_i = (P1_i^T \times P1_i)^{-1} \times P1_i^T \times E_i. \quad (11)$$

Вектор-столбец энергий i -й МО E_i в адиабатическом приближении получается из диагональной матрицы собственных значений, которая образуется в результате процедуры диагонализации Фокиана:

$$C^{-1} \times E_i \times C = E_i^D, \quad (12)$$

где C – матрица, состоящая из столбцов правых собственных векторов матрицы F_i .

Диагональная матрица собственных значений преобразуется в вектор-столбец уравнений зависи-

мости (7) умножением на матрицу-строку единичных элементов:

$$E_i = Z_i^D \times E_i, \quad (10)$$

где $E_i = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$ – вектор-строка единичных элементов, его размерность совпадает с размерностью вектора E_i .

В качестве меры электронного взаимодействия электронных квантовых состояний (уровней энергий ионизации) использован статистический коэффициент линейной корреляции, который для всех систем электронных уровней выражается матрицей корреляций:

$$R_{ik} = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1i} \\ r_{12} & \dots & r_{i2} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{1k} & \dots & r_{ik} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где R – матрица коэффициентов электронной корреляции, матричными элементами являются значения коэффициентов корреляции r_{ik} для исследуемых рядов полициклических ароматических полупроводников; i – номер ВЗМО; k – номер МО. Коэффициент r_{ik} вычисляется по формуле:

$$r_{ik} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{j=1..m} (-p_{ij} - \varepsilon_{ij})^2}{\sum_{j=1..m} (-p_{ij} - \bar{\varepsilon})^2}}, \quad (12)$$

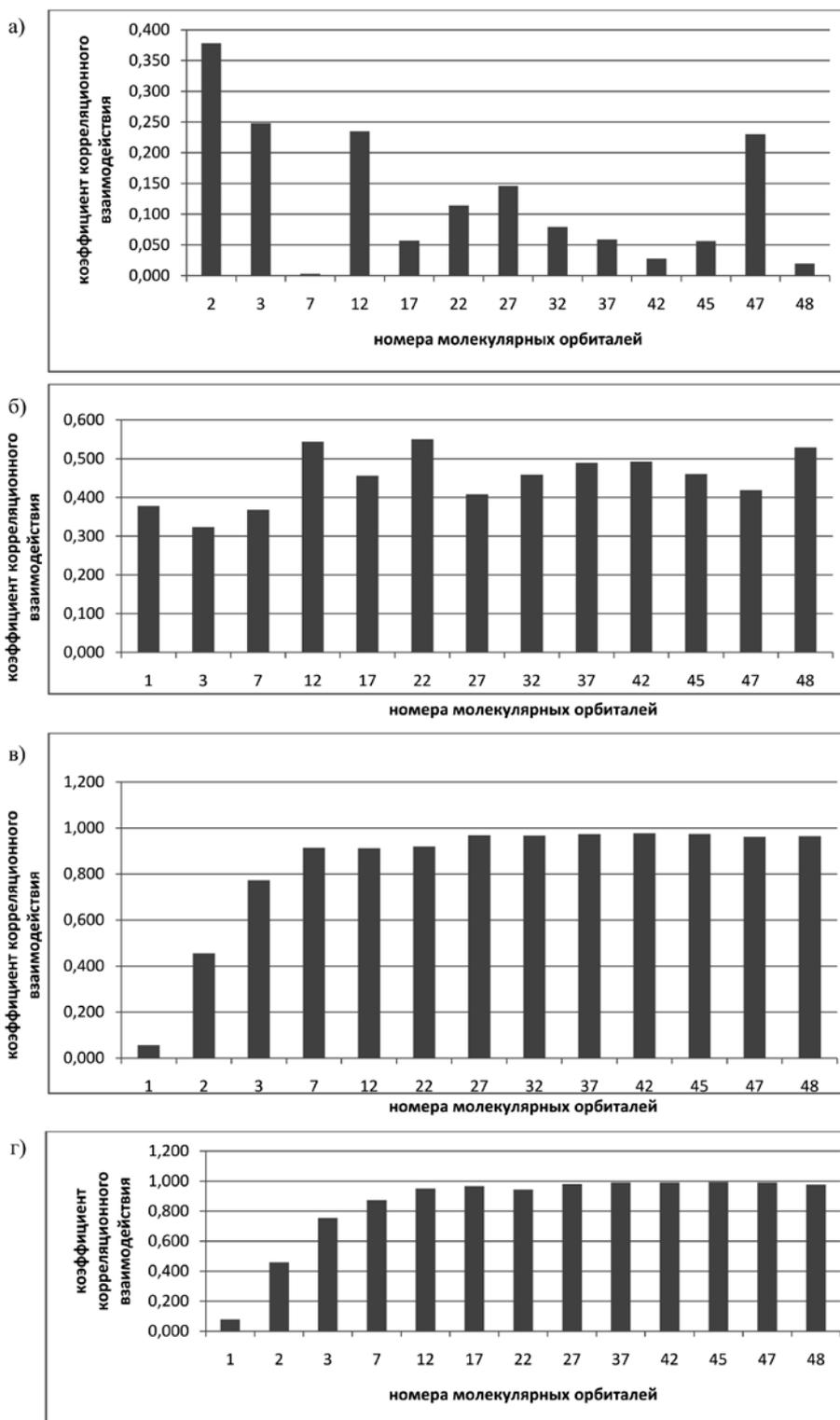
здесь $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение выборки из набора энергий i -х МО рассматриваемых соединений.

В результате расчетов и экспериментальных данных была построена матрица корреляций (11), которая имеет следующий вид:

	1	2	3	7	12	17	22	27	32	37	42	45	47	48
1	1,000	0,378	0,248	0,003	0,235	0,057	0,114	0,146	0,079	0,059	0,028	0,056	0,230	0,020
2	0,378	1,000	0,324	0,368	0,544	0,456	0,550	0,408	0,459	0,490	0,492	0,460	0,419	0,529
3	0,248	0,324	1,000	0,758	0,708	0,773	0,748	0,774	0,755	0,767	0,741	0,773	0,739	0,774
7	0,003	0,368	0,758	1,000	0,782	0,915	0,801	0,868	0,875	0,889	0,888	0,876	0,889	0,852
12	0,235	0,544	0,708	0,782	1,000	0,912	0,937	0,933	0,951	0,947	0,941	0,960	0,941	0,960
17	0,057	0,456	0,773	0,915	0,912	1,000	0,920	0,969	0,967	0,973	0,977	0,974	0,962	0,964
22	0,114	0,550	0,748	0,801	0,937	0,920	1,000	0,907	0,945	0,941	0,953	0,952	0,920	0,982
27	0,146	0,408	0,774	0,868	0,933	0,969	0,907	1,000	0,980	0,978	0,970	0,982	0,977	0,960
32	0,079	0,459	0,755	0,875	0,951	0,967	0,945	0,980	1,000	0,990	0,990	0,993	0,990	0,977
37	0,059	0,490	0,767	0,889	0,947	0,973	0,941	0,978	0,990	1,000	0,994	0,992	0,988	0,979
42	0,028	0,492	0,741	0,888	0,941	0,977	0,953	0,970	0,990	0,994	1,000	0,990	0,985	0,984
45	0,056	0,460	0,773	0,876	0,960	0,974	0,952	0,982	0,993	0,992	0,990	1,000	0,991	0,982
47	0,230	0,419	0,739	0,889	0,941	0,962	0,920	0,977	0,990	0,988	0,985	0,991	1,000	0,960
48	0,020	0,529	0,774	0,852	0,960	0,964	0,982	0,960	0,977	0,979	0,984	0,982	0,960	1,000

Функция $R = f(E_i)$, соответствующая этой матрице, является нелинейной, несимметричной, нечетной и полиэкстремальной. Значения коэффициентов корреляции r_{ik} колеблются в пределах $0,1 \leq r_{ik} \leq 1$, что указывает на различную степень взаимодействия электронов верхних и нижних слоев молекул полупроводников.

Максимальное влияние на первый вертикальный ПИ имеют второй, третий, двенадцатый, сорок седьмой энергетические уровни (рис. 1а). На второй уровень квантовой системы влияют практически все остальные энергетические уровни (рис. 1б). Аналогичная картина сильных корреляций наблюдается для других энергетических уровней (рис. 1 в–д).



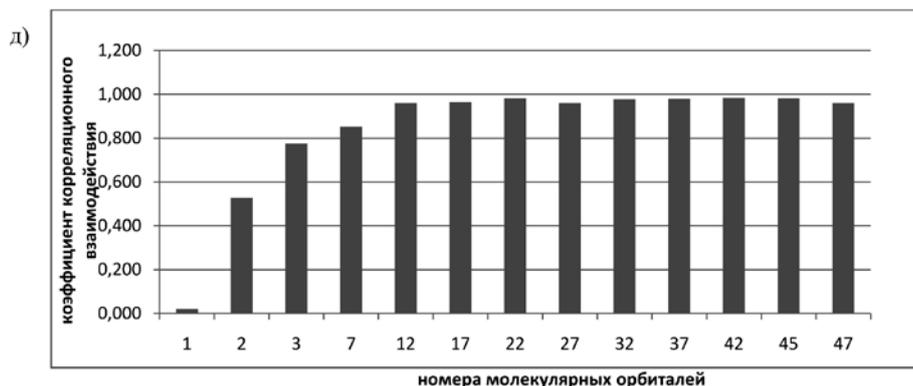


Рис. 1. Корреляция совокупности квантовых состояний в рядах органических полупроводников на основе полициклических молекул: а) для первой МО; б) для второй МО; в) для 17-й МО; г) для 32-й МО; д) для 48-й МО

В данной работе рассмотрена корреляция электронных состояний, заданных собственными значениями волновой функции, описывающие молекулярные орбитали, которые охватывают весь ряд электронных систем полициклических ароматических полупроводников (по числу занятых МО у 1,2-бензхризен – наименьшего соединения в данном ряду).

Эти результаты не согласуются с известным принципом ортогональности, согласно которому

$$\int_0^{\infty} \Psi_i \Psi_j dv = \delta_{ij}, \quad (13)$$

где Ψ_i, Ψ_j – волновые функции, описывающие i и j молекулярных состояний.

Полученные эффекты электронной корреляции, по-видимому, можно объяснить эффектами квантовой корреляции и квантовой запутанности электронов, которые были исследованы в последние годы Цайлингером [9–11]. Сущность этих эффектов заключается в том, что электронные волны волновых функций, соответствующие различным молекулярным орбиталиям квантовой системы, интерферируют между собой, образуя смешанное состояние с остальными волновыми функциями. Согласно принципу суперпозиции любое волновое состояние можно представить в виде суперпозиций всех остальных состояний частицы:

$$\Psi_i = \sum_{k \neq i} c_k \Psi_k. \quad (14)$$

Подобные корреляции являются системными квантовыми свойствами и особенно четко проявляются в системах атомов и молекул. Из соотношения (13) и (14) следует, что метод Хартри – Фока к многоэлектронным системам применим ограниченно и различные математические ухищрения в виде «улучшения» волновых функций гамильтонианов для больших квантовых систем, по-видимому, некорректны и не имеют физического обоснования. Учет соотношения (13), (14) в теории функционала

плотности, по-видимому, могут принести результаты при использовании полуэмпирической спектроскопической информации, описывающей группы атомов и молекул.

Таким образом, в молекулах полициклических полупроводников существенным образом появляются эффекты корреляционного взаимодействия высших и глубинных молекулярных уровней, следовательно, такие важные физические характеристики, как энергии ионизации, работа выхода электрона, уровень Ферми полупроводников, в значительной степени определяются корреляционными эффектами. По-видимому, подобными корреляциями могут быть объяснены такие явления, как влияние внешних электронов на К-захват и LENR электронов атомными ядрами [12]. Применительно к химическим взаимодействиям можно отметить, что энергия активации химических реакций будет определяться всей системой молекулярных электронов, а не только валентными электронами. Построение корреляционных диаграмм позволит прогнозировать степень влияния низших энергетических уровней на физические и химические процессы в сложных информационных квантовых молекулярных системах. Важное значение для молекулярной электроники имеет исследование зависимости первой энергии ионизации от энергии глубинных электронов. Проведенные исследования показывают, что это влияние определяется всей электронной системой, следовательно, внутренняя оболочка атомных и молекулярных остовов существенным образом влияет на работу выхода электронов и ширину запрещенной зоны в органических полупроводниках.

Список литературы

1. Iechi H. Characterization of zinc oxide and pentacene thin film transistors for CMOS inverters IEICE trans electron [Text] / H. Iechi, Y. Watanabe,

- Н. Yamauchi, K. Kudo // Oxford journal Mathematics & Physical Sciences. V. E91 – С. – 2008. – № 12. – P. 1843–1847.
2. *Ming L. Tang* Ambipolar, High Performance, Acene-Based Organic ThinFilm Transistors [Text] / Ming L. Tang, Anna D. Reichardt, Nobuyuki Miyaki, Randall M. Stoltenberg and Zhenan Bao // J. Am. Chem. Soc. – 2008. – Vol. 130. – № 19. – P. 6064–6065.
3. *Frank Jensen*. Introduction to Computational Chemistry [Text] / Jensen Frank. – The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 620 p.
4. *Доломатов М.Ю.* Способ определения потенциалов ионизации и сродства к электрону атомов и молекул методом электронной спектроскопии [Текст] / М.Ю. Доломатов, Г.Р. Мукаева // Прикладная спектроскопия. – Уфа. – 1992. – Т. 56. – № 4. – С. 570–574.
5. *Доломатов М.Ю.* Применение электронной феноменологической спектроскопии для идентификации и исследования сложных органических систем [Текст] / М.Ю. Доломатов // Химия и технология топлив и масел. – 1995. – № 1. – С. 29–32.
6. *Доломатов М.Ю.* Исследование органических веществ методами электронной феноменологической спектроскопии: учебн. пособие [Текст] / М.Ю. Доломатов, Г.Р. Мукаева. – Уфа: УТИС, 1996. – 45 с.
7. *Клар Э.* Полициклические углеводороды: в 2 т. [Текст] / Э. Клар; пер. с англ. – М., 1971. – 910 с.
8. *Доломатов М.Ю.* Влияние низших энергетических уровней на первые адиабатические потенциалы ионизации молекул азотосодержащих соединений [Текст] / М.Ю. Доломатов, К.Ф. Латыпов // Известия высших учебных заведений Поволжского региона. – 2011. – № 3 (19) – С. 69–77.
9. *Hackermueller L.* Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation [Text] / L. Hackermueller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger, M. Arndt // Nature. – 2004. – 427. – P. 711–714.
10. *Bennett C. H.* Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolski-Rosen Channels [Text] / C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, W.K. Wootters // Phys. Rev. Lett. – 1993. – Vol. 70. – P. 1895–1899.
11. *Волович И.В.* Квантовая телепортация, криптография и парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена [Текст] / И.В. Волович. – М., 2002. – С. 33–35.
12. *Nigmatulin R.I.* The theory of super compression of vapor bubbles and nano-scale thermonuclear fusion [Text] / R.I. Nigmatulin, I.Sh. Akhatov, A.S. Topolnikov, R.Kh. Bolotnova, N.K. Vakhitova, (Jr.) Lahey, R.P. Taleyarkhan // Physics of Fluids. – 2005. – Vol. 17. – № 10. – P. 106–107.



Доломатов М.Ю.
Dolomatov M.Yu.

доктор химических наук,
профессор кафедры
«Физика» Уфимского
государственного
университета экономики
и сервиса,
Россия, г. Уфа



Шуляковская Д.О.
Shulyakovskaya D.O.

аспирант, инженер
кафедры «Физика»
Уфимского
государственного
университета экономики
и сервиса,
Россия, г. Уфа



Паймурзина Н.Х.
Paimurzina N.Kh.

аспирант Уфимского
государственного
университета экономики
и сервиса,
Россия, г. Уфа



Шуткова С.А.
Shutkova S.A.

аспирант Уфимского
государственного
университета экономики
и сервиса,
Россия, г. Уфа

УДК 535.6+535(075.8)

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭФС

В работе были уточнены корреляции «спектр – свойства» для оценки потенциала ионизации и сродства к электрону молекул органических полупроводников по оптическим характеристикам электронных спектров. Получены новые зависимости для определения их электронных характеристик по электронным спектрам методом феноменологической спектроскопии. Результаты исследования указывают на возможность использования установленных закономерностей для изучения сложных молекулярных систем типа электропроводящих полимеров и асфальтенов.

Ключевые слова: асфальтены, интегральная сила осциллятора, полупроводники, потенциал ионизации, смолы, сродство к электрону, электронная феноменологическая спектроскопия, электронный спектр.

ELECTRON STRUCTURE ESTIMATION OF THE HYDROCARBON ELECTROCONDUCTIVE MATERIALS ACCORDING TO EPS METHOD

Correlations «spectrum – properties» for ionization potential and electron affinity estimation of organic semiconducting molecules using optical characteristics of electronic spectra have been improved. New dependences for electron characteristics definition of these objects using electron phenomenological spectroscopy method have been found. Results of the research show ascertained correlations application opportunity for investigating complex molecular systems as electroconductive polymers and asphaltenes.

Key words: asphaltenes, semiconductors, electron phenomenological spectroscopy, electronic spectrum, integral oscillator strength, ionization potential, electron affinity.

Введение

Исследование параметров электронной зонной структуры электропроводящих углеводородных материалов необходимо для решения технических проблем кабельной промышленности, микроэлектроники и нанозлектроники. В настоящее время существуют различные способы оценки таких свойств, как потенциал ионизации (ПИ), сродство

к электрону (СЭ), ширина запрещенной зоны, которые характеризуются длительностью, трудоемкостью и сложностью в приготовлении образцов. В последнее время были предложены способы оценки ПИ и СЭ по корреляциям «цвет – свойства» [1, 2] и «спектр – свойства» [3, 4]. Недостатком этих методов является отсутствие корреляционных зависимостей, которые адекватно отображают исследуе-

мые свойства. Также имеется большое количество зависимостей для каждого класса исследуемых материалов.

Целью исследования является уточнение корреляций «спектр – свойства» для оценки электронных характеристик материалов на углеводородной основе: полициклических углеводородов и асфальтосмолистых веществ. Объектами исследования являются электропроводящие вещества – полициклические углеводородные соединения, содержащие три, четыре и пять линейно-аннелированных бензольных колец, соединения ряда перилена, пирена, бисантена, антантрена, а также нефтяные асфальтены и смолы.

Уточненные корреляции «спектр – свойства» для органических полициклических полупроводников

В данном исследовании применяется вариант метода ЭФС, основанный на корреляции «спектр – свойства» [5], в основе которой лежит связь интегральной силы осциллятора θ (ИСО) со всеми свойствами вещества:

$$Z = \Phi(\theta), \tag{1}$$

где Z – n -мерный вектор, включающий множество свойств вещества.

ИСО дает усредненную информацию об электронной структуре в спектрах, т. к. представляет собой квантовый континуум и является суммой сил осциллятора отдельных частиц θ_i :

$$\theta = \sum \theta_i. \tag{2}$$

В работе исследован логарифмический вид функциональной зависимости (1), а в качестве свойств выбраны электронные характеристики исследуемых полициклических полупроводников:

$$E = a + b \cdot \ln(\theta), \tag{3}$$

где E – ПИ или СЭ, эВ; a, b – коэффициенты, значения которых определяются свойством и областью поглощения излучения.

В качестве ИСО можно использовать интегральный показатель поглощения, физический

смысл которого – непрерывный континуум электронных состояний системы, поглощающей электромагнитное излучение. Этот параметр оценивается через площадь под кривой поглощения излучения для видимых и (или) УФ спектральных полос:

$$\theta_{Lg\varepsilon} = \int_{\lambda} Lg(\varepsilon(\lambda))d\lambda \text{ или } \theta_k = \int_{\lambda} k(\lambda)d\lambda, \tag{4}$$

где $\theta_{Lg\varepsilon}$ – логарифмическая ИСО, характеризующая масштаб квантовой системы, нм; $\varepsilon(\lambda)$ – молярный коэффициент поглощения при длине волны λ , $10^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$; θ_k – ИСО, характеризующая объем квантовой системы, $10^{-7} \cdot \text{м}^3 / \text{кг}$; $k(\lambda)$ – коэффициент поглощения при длине волны λ , $10^2 \cdot \text{м}^2 / \text{кг}$; λ – длины волн, определяющие границы спектра поглощения в УФ и (или) видимой областях, нм.

В данном исследовании был также введен фактор относительного квантового масштаба в виде отношения масштабов квантовой системы, поглощающих излучение в видимой и ультрафиолетовой части электромагнитного спектра:

$$m_{Lg\varepsilon} = \frac{\theta_{Lg\varepsilon}^{vis}}{\theta_{Lg\varepsilon}^{UV}}. \tag{5}$$

Были рассчитаны значения ИСО и фактора относительного квантового масштаба для 70 полициклических органических полупроводников по их электронным спектрам поглощения [6], а значения ПИ и СЭ этих объектов были получены квантовыми расчетами методом Хартри – Фока с применением теоремы Купманса [7]. Корреляции между ИСО и ПИ и СЭ исследовались стандартным методом наименьших квадратов (рис. 1–4). В таблицах 3 и 4 приведены соответствующие значения коэффициентов зависимости (3) и результаты статистической достоверности: коэффициенты корреляции, коэффициенты вариации (%), стандартные отклонения (эВ), а также расчетные и табличные значения критерия Фишера, необходимые для проверки адекватности логарифмической модели взаимосвязи ИСО и ПИ и СЭ.

Таблица 1

Результаты исследования корреляционной связи первого потенциала ионизации органических полупроводников и ИСО

ИСО	Коэффициенты зависимости (3) $PII=a+b \cdot \ln(\theta)$		Коэф. корр. R	Станд. откл.	Коэф. вариации, %	Критерий Фишера для объема выборки F	Табличное значение критерия Фишера $F_{табл}$
	a	b					
$\theta_{Lg\varepsilon}$ УФ- и видимая области	13,543	-0,974	0,94	0,09	1,25	4,83	1,49

ИСО	Коэффициенты зависимости (3) $PII=a+b*Ln(\theta)$		Коэф. корр. R	Станд. откл.	Коэф. вариации, %	Критерий Фишера для объема выборки F	Табличное значение критерия Фишера $F_{табл}$
	a	b					
θ_{Lgc} видимая область	9,7121	-0,457	0,94	0,08	1,12	4,59	1,49
θ_k видимая область	8,3412	-0,175	0,73	0,15	2,22	7,66	1,49
m_{Lgc}	6,9594	-0,445	0,94	0,08	1,11	4,54	1,49

Таблица 2

Результаты исследования корреляционной связи сродства к электрону органических полупроводников и ИСО

ИСО	Коэффициенты зависимости (3) $СЭ=a+b*Ln(\theta)$		Коэф. корр. R	Станд. откл.	Коэф. вариации, %	Критерий Фишера для объема выборки F	Табличное значение критерия Фишера $F_{табл}$
	a	b					
θ_{Lgc} УФ- и видимая области	- 3,2214	0,6244	0,91	0,06	6,39	1,98	1,49
θ_{Lgc} видимая область	- 0,7493	0,2906	0,92	0,06	6,57	1,92	1,49
θ_k видимая область	0,1267	0,1110	0,71	0,10	10,88	3,21	1,49
m_{Lgc}	1,0008	0,2815	0,92	0,06	6,38	1,92	1,49

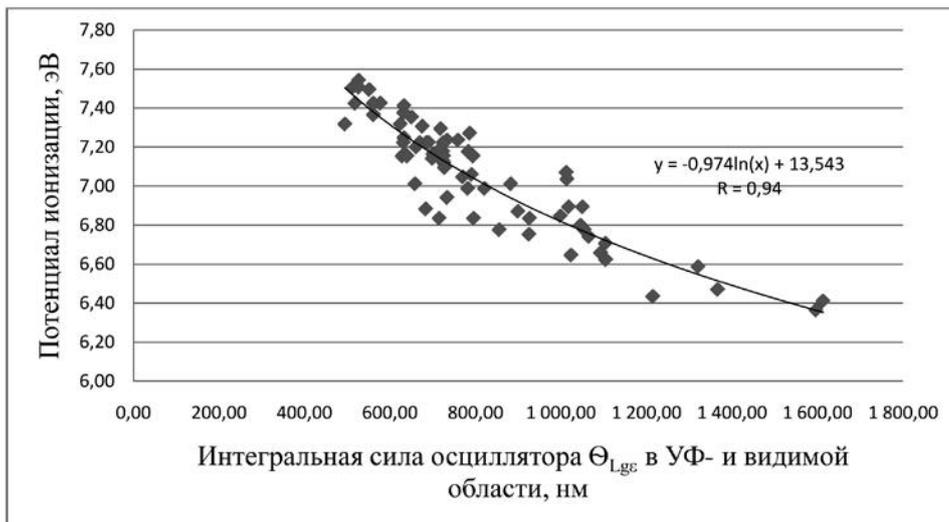
Согласно таблице 1 зависимости различных ИСО и фактора относительного квантового масштаба и ПИ изученных полупроводников характеризуются коэффициентами корреляции 0,73 и 0,94, коэффициентами вариации в пределах [1,11 %; 2,22 %] и стандартными отклонениями в пределах [0,08 эВ; 0,15 эВ]. Согласно таблице 2 для аналогичных зависимостей для СЭ коэффициенты корреляции находятся в пределах [0,71; 0,92], коэффициенты вариации составляют [6,38 %; 10,88 %] и стандартные отклонения – [0,06 эВ; 0,10 эВ]. Как следует из таблиц 1 и 2, критерий Фишера превышает табличное значение (при доверительной вероятности 0,95), следовательно, наблюдаемая взаимосвязь (3) является неслучайной.

Оценка параметров электронной зонной структуры полупроводников на нефтяной основе
Современные углеродные наноматериалы являются дорогостоящими продуктами сложной тех-

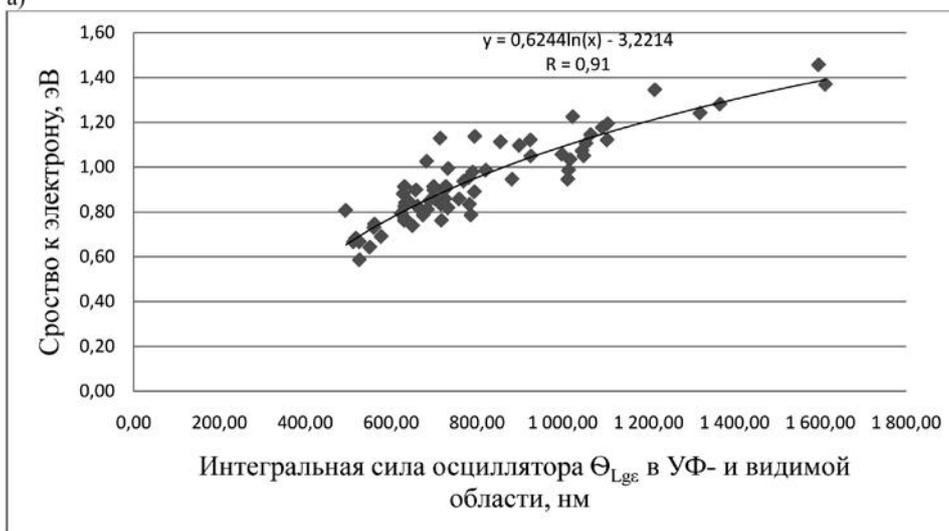
нологии (углеродные нанотрубки, графены, фуллерены, полициклические молекулы). Поэтому для молекулярной электроники актуален поиск новых более дешевых материалов на основе природных веществ, в частности, высокомолекулярных соединений нефти, к которым относятся асфальтены и смолы.

В ранее проведенных работах [8] было показано, что нефтяные асфальтены могут быть использованы в качестве объектов наноэлектроники, то есть быть сырьем для получения полупроводников. Это связано с тем, что асфальтены содержат полициклические углеводородные структуры, которые являются полупроводниками. Поэтому определение электронной структуры данных объектов является актуальной задачей.

Оценка эффективного потенциала ионизации (ЭПИ), эффективного сродства к электрону (ЭСЭ) и ширины запрещенной зоны различных асфаль-

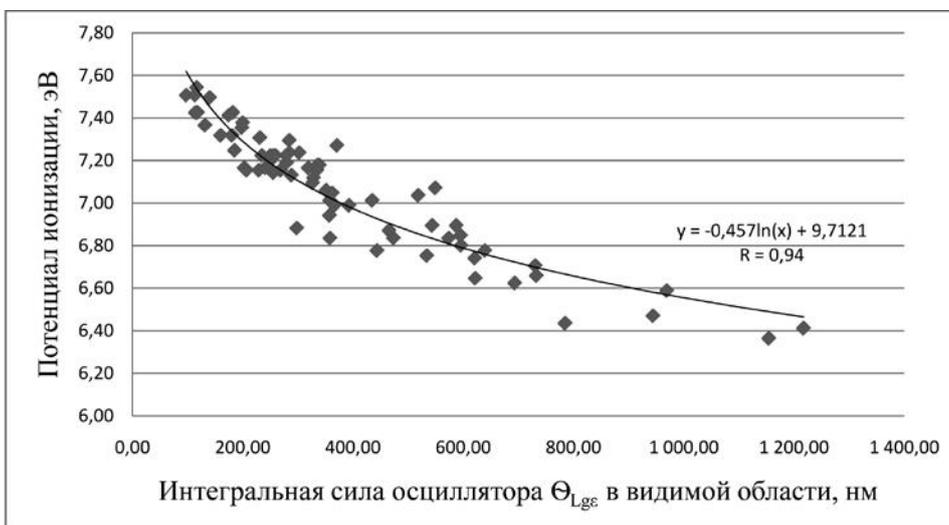


а)



б)

Рис. 1. Зависимость: а) потенциала ионизации; б) сродства к электрону полициклических органических полупроводников от интегральной логарифмической ИСО в УФ- и видимой области



а)

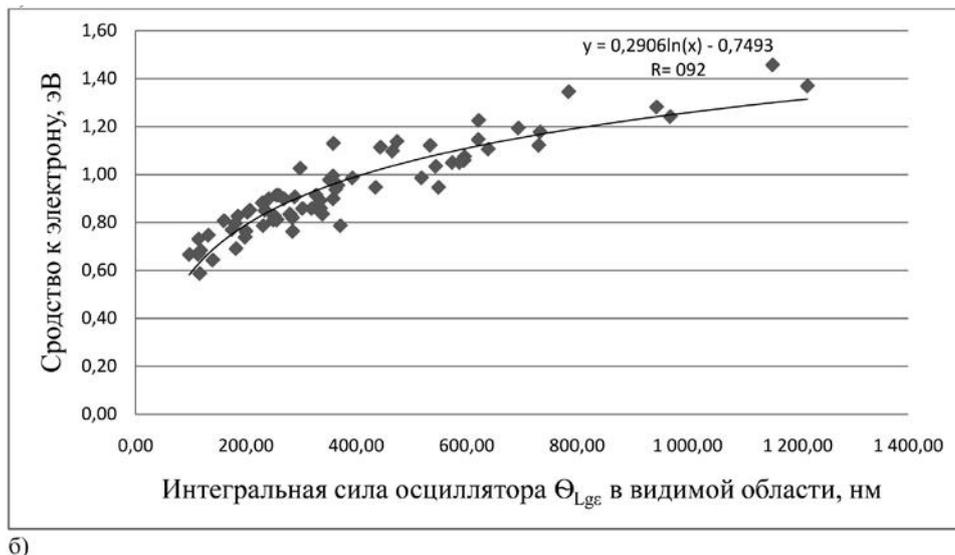


Рис. 2. Зависимость: а) потенциала ионизации; б) сродства к электрону полициклических органических полупроводников от интегральной логарифмической ИСО в видимой области

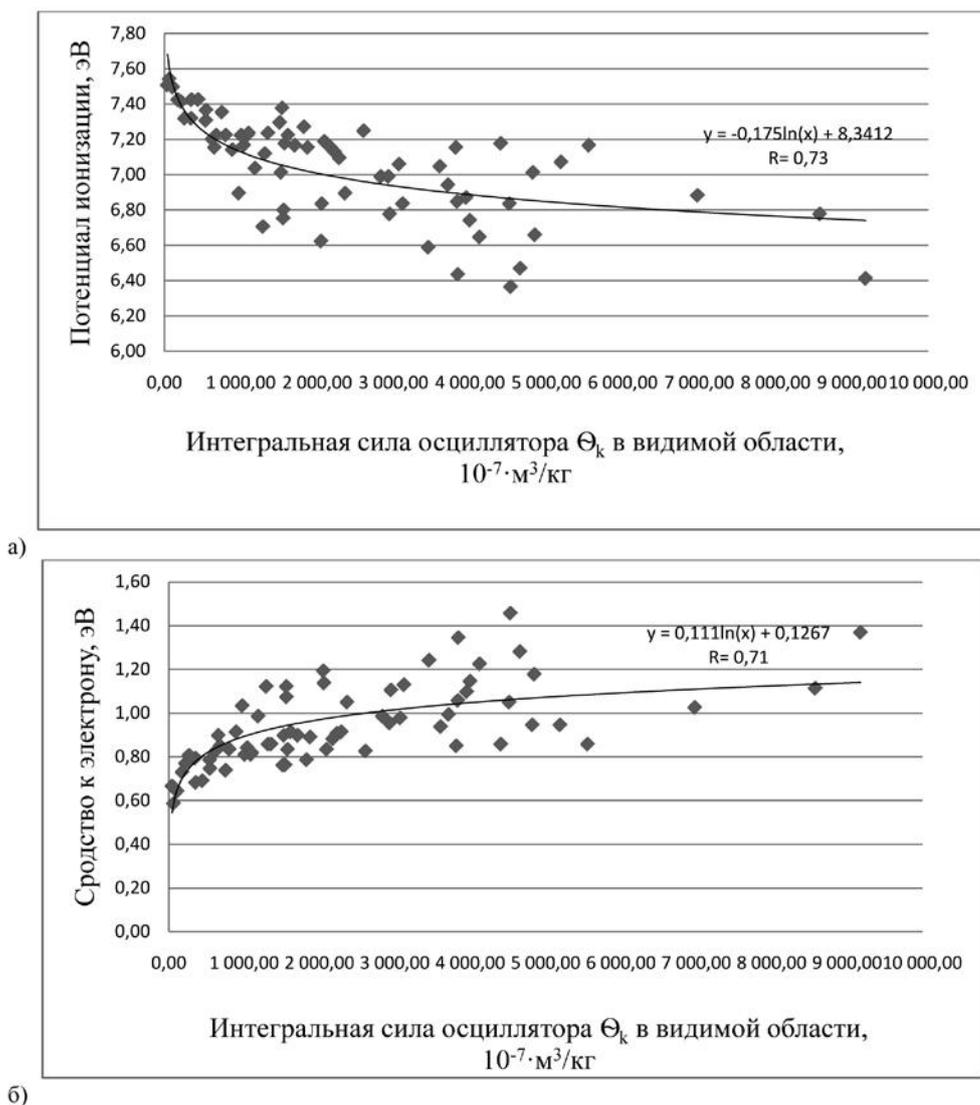


Рис. 3. Зависимость: а) потенциала ионизации; б) сродства к электрону полициклических органических полупроводников от ИСО в видимой области

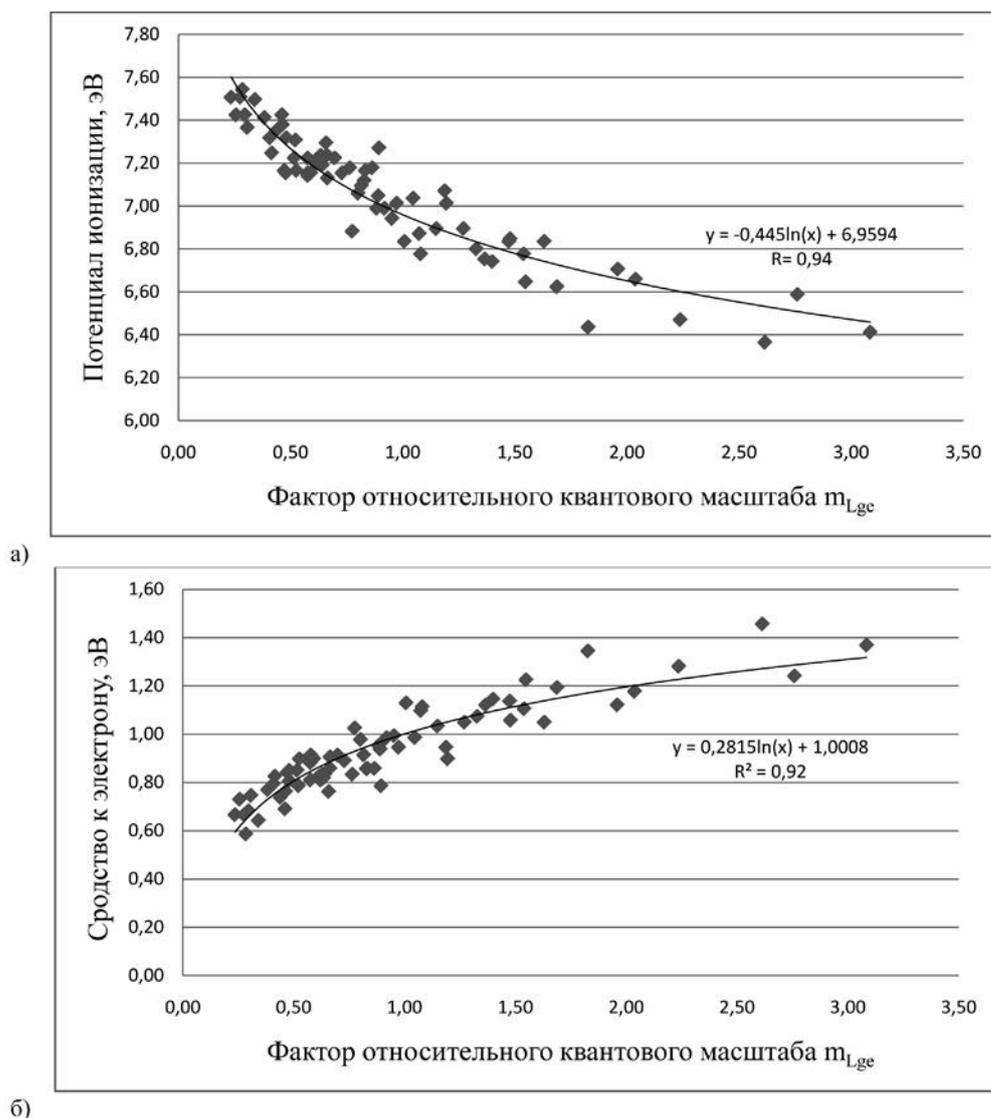


Рис. 4. Зависимость: а) потенциала ионизации; б) сродства к электрону полициклических органических полупроводников от фактора относительного квантового масштаба

тенов и смол была проведена по представленным выше, уточненным корреляциям «спектр – свойства». Нижние и верхние границы значений элек-

тронных характеристик смол и асфальтенов, выделенных стандартным способом Гольде из различного нефтяного сырья, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Характеристики электронной структуры полупроводников на основе смол и асфальтенов (диамагнитная (молекулярная) фаза)

Полупроводники на основе природных полициклических углеводов	Эффективный потенциал ионизации, эВ			
	θ_{Lge} УФ- и видимая области	θ_{Lge} видимая область	θ_k видимая область	m_{Lge}
Асфальтены высококипящих фракций*	6,05-6,08	6,32-6,33	6,94-6,97	6,42-6,43
Асфальтены, термообработанные при T=400 °C*	6,05-6,08	6,31-6,33	6,95-6,97	6,42-6,43
Асфальтены нефти Западно-Сибирских месторождений	6,06-6,36	6,33-6,47	6,91-7,23	6,42-6,48

Полупроводники на основе природных полициклических углеводородов	Эффективный потенциал ионизации, эВ			
	θ_{Lgc} УФ- и видимая области	θ_{Lgc} видимая область	θ_k видимая область	m_{Lgc}
Нефтяные асфальтены**	6,06-6,13	6,32-6,36	6,96-6,99	6,44-6,46
Нефтяные смолы	6,38-6,64	6,49-6,64	7,16-7,39	6,49-6,59
Эффективное средство к электрону, эВ				
Асфальтены высококипящих фракций*	1,56-1,58	1,40-1,41	0,99-1,01	1,34-1,34
Асфальтены, термообработанные при T=400 °C*	1,56-1,58	1,40-1,41	1,00-1,01	1,34-1,34
Асфальтены нефти Западно-Сибирских месторождений	1,39-1,58	1,31-1,40	0,83-1,03	1,31-1,34
Нефтяные асфальтены**	1,53-1,58	1,38-1,40	0,98-1,00	1,32-1,33
Нефтяные смолы	1,20-1,37	1,20-1,30	0,79-0,83	1,23-1,30
Ширина запрещенной зоны, эВ				
Асфальтены высококипящих фракций*	4,47-4,51	4,9-4,93	5,93-5,98	5,08-5,09
Асфальтены, термообработанные при T=400 °C*	4,46-4,52	4,90-4,93	5,94-5,97	5,08-5,09
Асфальтены нефти Западно-Сибирских месторождений	4,48-4,97	4,93-5,16	5,87-6,40	5,08-5,17
Нефтяные асфальтены**	4,48-4,60	4,92-4,98	5,96-6,01	5,11-5,14
Нефтяные смолы	5,01-5,44	5,18-5,44	6,29-6,66	5,19-5,36

* Получены Дезорцевым С.В.

** Выделены по способу Хайрутдинова И.Р.

Учитывая высокий парамагнетизм асфальто-смолистых веществ (до 1020 спин/г), целесообразно сделать корректировку ЭПИ и ЭСЭ, полученных для молекулярных систем на соответствующие характеристики для свободных стабильных радикалов. Для этого использованы полуэмпирические соотношения для оценки ПИ и СЭ свободных радикалов [9]:

$$PI_R = A_0 + A_1 \cdot PI_M, \quad (6)$$

$$CE_R = B_0 + B_1 \cdot CE_M, \quad (7)$$

где ПИ_Р, СЭ_Р – потенциал ионизации и средство к электрону свободных радикалов, эВ;

ПИ_М, СЭ_М – потенциал ионизации и средство к электрону молекул (определенные по (3)), эВ;

$$A_0 = 0,36 \text{ эВ}, A_1 = 0,72, B_0 = 2,78 \text{ эВ}, B_1 = 0,060.$$

Результаты оценки электронных характеристик асфальтенов и смол по (6) и (7) представлены в таблице 4.

Таблица 4

Характеристики электронной структуры полупроводников на основе смол и асфальтенов (парамагнитная фаза)

Полупроводники на основе природных полициклических углеводородов	Эффективный потенциал ионизации, эВ			
	θ_{Lgc} УФ- и видимая области	θ_{Lgc} видимая область	θ_k видимая область	m_{Lgc}
Асфальтены высококипящих фракций*	4,72-4,74	4,91-4,92	5,36-5,38	4,98-4,99
Асфальтены, термообработанные при T=400 °C *	4,71-4,74	4,91-4,92	5,36-5,38	4,98-4,99

Полупроводники на основе природных полициклических углеводородов	Эффективный потенциал ионизации, эВ			
	$\theta_{L_{ge}}$ УФ- и видимая области	$\theta_{L_{ge}}$ видимая область	θ_k видимая область	$m_{L_{ge}}$
Асфальтены нефти Западно-Сибирских месторождений	4,72-4,94	4,92-5,02	5,33-5,57	4,98-5,02
Нефтяные асфальтены**	4,72-4,77	4,91-4,94	5,37-5,40	5,00-5,01
Нефтяные смолы	4,95-5,14	5,03-5,14	5,52-5,68	5,03-5,11
	Эффективное сродство к электрону, эВ			
Асфальтены высококипящих фракций*	1,83-1,84	1,93-1,94	2,17-2,18	1,97-1,98
Асфальтены, термообработанные при T=400 °C*	1,83-1,84	1,93-1,94	2,17-2,18	1,99-1,98
Асфальтены нефти Западно-Сибирских месторождений	1,83-1,95	1,94-1,99	2,16-2,28	1,98-2,00
Нефтяные асфальтены**	1,83-1,86	1,94-1,95	2,18-2,19	1,98-1,99
Нефтяные смолы	1,96-2,06	2,00-2,06	2,26-2,34	2,00-2,04
	Ширина запрещенной зоны, эВ			
Асфальтены высококипящих фракций*	2,89-2,89	2,97-2,98	3,19-3,20	3,01-3,01
Асфальтены, термообработанные при T=400 °C *	2,87-2,90	2,97-2,98	3,19-3,19	3,01-3,01
Асфальтены нефти Западно-Сибирских месторождений	2,89-2,99	2,98-3,03	3,18-3,28	3,01-3,03
Нефтяные асфальтены**	2,89-2,91	2,98-2,99	3,19-3,20	3,01-3,02
Нефтяные смолы	3,00-3,08	3,03-3,08	3,26-3,34	3,03-3,07

* Получены Дезорцевым С.В.

** Выделены по способу Хайрутдинова И.Р.

Следует отметить, что оценки электронных характеристик асфальтенов и смол по зависимостям (6) и (7) наиболее адекватно соответствуют экспериментальным данным и совместно с зависимостями (3) могут быть использованы для исследования электронной зонной структуры природных углеводородных материалов.

Выводы

Таким образом, были получены новые логарифмические зависимости для определения ПИ и СЭ по различным видам ИСО и фактору относительного квантового масштаба для широкой группы полициклических органических полупроводников. Оценки электронных характеристик по уточненным корреляциям «спектр – свойства» характеризуются высокой точностью, в отличие от предыдущих зависимостей не предполагают деление изучаемых объектов на узкие классы, не зависят от концентрации растворов (как, например, в корреляциях «цвет – свойства»), а также подходят для полупроводников, по-

глощающих излучение как в УФ, так и в видимой области электромагнитного спектра. Полученные зависимости позволяют изучать сложные молекулярные системы типа электропроводящих полимеров и асфальто-смолистых веществ.

Список литературы

1. Dolomatov M.Yu. Simple characteristics estimation methods of material and molecule electronic structure [Text] / M.Yu. Dolomatov, D.O. Shulyakovskaya, G.R. Mukaeva, G.U. Jarmuhametova, K.F. Latypov // Journal of Materials Science and Engineering. – 2012. – № 5. – P. 261.

2. Доломатов М.Ю. Оценка первых потенциалов ионизации и сродства к электрону молекул полициклических органических полупроводников по цветовым характеристикам в колориметрических системах XYZ и RGB [Текст] / М.Ю. Доломатов, Г.У. Ярмухаметова, Д.О. Шуляковская // Прикладная физика. – 2011. – № 1. – С. 20–31.

3. *А.с. № 1636734СССРG01N 21/25*. Способ определения потенциалов ионизации молекул ароматических соединений [Текст] / М.Ю. Доломатов, Г.Р. Мукаева – № 4464576/25; заявл. 22.07.88, опубл. 23.03.90; Бюл. № 11. – 5 с.
4. *Доломатов М.Ю.* Определение первых вертикальных потенциалов ионизации молекул полициклических ароматических углеводородов по интегральным характеристикам электронных спектров поглощения [Текст] / М.Ю. Доломатов, Н.Х. Паймурзина // Башкирский химический журнал. – 2013. – № 1.
5. *Доломатов М.Ю.* Фрагменты теории реального вещества: от углеводородных систем к галактикам [Текст] / М.Ю. Доломатов. – М.: Химия, 2005. – 208 с.
6. *Клар Э.* Полициклические углеводороды: в 2 т. [Текст] / Э. Клар; пер. с англ. – М., 1971. – 910 с.
7. *Грибов Л.А.* Квантовая химия: учебник [Текст] / Л.А. Грибов, С.П. Муштаков. – М.: Гардарики, 1999. – 390 с.
8. *Dolomatov M.Yu.* Asphaltenes of and of hydrocarbons distillates as compensated organic semiconductors [Text] / M.Yu. Dolomatov, S.A. Schutkova, S.V. Dezortsev, M.M. Dolomatova // ElecMol-10. The abstracts of 5th international meeting on molecular electronics. – Grenoble, France, 2010. – P. 258.
9. *Доломатов М.Ю.* Исследование характеристик электронной структуры нефтяных смол и асфальтенов [Текст] / М.Ю. Доломатов, С.А. Шуткова, С.В. Дезорцев // Башкирский химический журнал. – 2010. – № 3. – С. 51–58.

ОБ АВТОРАХ

Гизатуллин Ф.А., д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Салихов Р.М., ст. преподаватель, старший научный сотрудник кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Чигвинцев В.А., технический директор – первый заместитель генерального директора ОАО «Уфимское агрегатное производственное объединение», Россия, г. Уфа.

Лобанов А.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Кабашов В.Ю., д-р техн. наук, доцент Башкирского государственного аграрного университета, Россия, г. Уфа.

Исмагилов Р.Р., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Рахманова Ю.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Рогинская Л.Э., д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Ялалова З.И., аспирант Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Ураксеев М.А., д-р техн. наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Левина Т.М., канд. техн. наук, доцент филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, Россия, г. Салават.

Хайруллин И.Х., д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Гиниятуллин Д.М., инженер ООО «ОБО Беттерманн», Россия, г. Уфа.

Пашали Д.Ю., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Шабанов В.А., канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа.

Хакимов Э.Ф., студент Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа.

Шарипова С.Ф., аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа.

Яруллин Р.Б., д-р техн. наук, профессор кафедры «Машины, аппараты, приборы и технологии сервиса» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

Линенко А.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические машины и электрооборудование» Башкирского государственного аграрного университета, Россия, г. Уфа.

Абдрахимов Ю.Р., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Промышленная безопасность и охрана труда» Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа.

Федосов А.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда» Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа.

Алексеева И.Э., студентка Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа.

Ильясов И.Р., геолог ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз», Россия, г. Ноябрьск.

Мухамадиев А.А., канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Киргизов Д.И., канд. техн. наук, доцент кафедры «Естественно-научные дисциплины» Бугульминского филиала «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», Россия, г. Бугульма.

Иванов А.А., руководитель группы ООО «ТНГ-Групп», Россия, г. Бугульма.

Шерстюков О.Н., д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой «Радиофизика» Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия, г. Казань.

Садыков А.Р., инженер ООО «ТНГ-Групп», Россия, г. Бугульма.

Крымский В.Г., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Информационно-управляющие системы» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

Жалбеков И.М., аспирант Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

Имильбаев Р.Р., аспирант Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

Юнусов А.Р., канд. техн. наук, директор ООО «УфаСистемаГаз», Россия, г. Уфа.

Кушнир В.Г., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, Республика Казахстан, г. Костанай.

Фаррахов Р.Г., канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Павлов С.В., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Геоинформационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Ефремова О.А., канд. техн. наук, доцент кафедры «Геоинформационные системы», Россия, г. Уфа.

Павлов А.С., канд. техн. наук, доцент кафедры «Геоинформационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Султанов А.Х., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Черных В.В., канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Мешков И.К., канд. техн. наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Мешкова А.Г., аспирант, инженер кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Ишмияров А.А., студент, лаборант кафедры «Телекоммуникационные системы» Уфимского государственного авиационного технического университета, Россия, г. Уфа.

Штирко А.А., магистр Волгоградского государственного технического университета, Россия, г. Волгоград.

Дорофеев Н.С., магистр Волгоградского государственного технического университета, Россия, г. Волгоград.

Розалиев В.Л., канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» Волгоградского государственного технического университета, Россия, г. Волгоград.

Орлова Ю.А., канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» Волгоградского государственного технического университета, Россия, г. Волгоград.

Денисова О.А., канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

Доломатов М.Ю., д-р. хим. наук, профессор кафедры «Физика» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

Паймурзина Н.Х., аспирант Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

Шуляковская Д.О., аспирант, инженер кафедры «Физика» Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

Шуткова С.А., аспирант Уфимского государственного университета экономики и сервиса, Россия, г. Уфа.

ABOUT THE AUTHORS

Gizatullin F.A., Dr. Sci. Tech., prof. chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Salikhov R.M., senior lecturer, senior scientific employee chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Chigvintsev V.A., technical Director – first Deputy General Director of JSC «Ufa accessories manufacturing association», Russia, Ufa.

Lobanov A.V., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Kabashov V.Yu., Dr. Sci. Tech., docent Bashkir state agrarian university, Russia, Ufa.

Ismagilov R.R., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Rakhmanova Yu.V., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Roginskaya L.E., Dr. Sci. Tech., prof. chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Yalalova Z.I., post-graduate student Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Urakseev M.A., Dr. Sci. Tech., prof. chair of «Information and measuring technics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Levina T.M., Cand. Sci. Tech., docent branch Ufa state petroleum technological university in Salavat, Russia, Salavat.

Khairullin I.Kh. Dr. Sci. Tech., prof. chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Giniyatullin D.M., engineer LLC «OBO BETTERMANN», Russia, Ufa.

Pashali D.Yu., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Electromechanics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Shabanov V.A., Cand. Sci. Tech., docent, head chair of «Electrical engineering and electrical equipment of enterprises» Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa.

Khakimov E.F., student Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa.

Sharipova S.F., post-graduate student Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa.

Yarullin R.B., Dr. Sci. Tech., docent, prof. chair of «Machines, apparatuses, devices and service technologies» Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Linenko A.V., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Electrical machinery and equipment» Bashkir state agrarian university, Russia, Ufa.

Abdrahimov Yu.R., Dr. Sci. Tech., prof., head chair of «Industrial safety and labour protection» Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa.

Fedosov A.V., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Industrial safety and labour protection» Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa.

Alekseeva I.E., student Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa.

Ilyasov I.R., geologist JSC «Gazpromneft-Noyabrskneftegaz», Russia, Noyabrsk.

Mukhamadiev A.A., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Information and measuring technics» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Kirgizov D.I., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Natural-scientific disciplines» branch Kazan National Research Technical University named after Andrey N. Tupolev in Bugulma, Russia, Bugulma.

Ivanov A.A., team manager LLC «TNG group», Russia, Bugulma.

Sherstyukov O.N., Dr. Sci. Tech., prof., head chair of «Radiophysics» Kazan (Volga Region) Federal University, Russia, Kazan.

Sadykov A.R., engineer LLC «TNG group», Russia, Bugulma.

Krymsky V.G., Dr. Sci. Tech., prof., head chair of «Information and measuring technics» Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Zhalbekov I.M., post-graduate student Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Imilbaev R.R., post-graduate student Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Yunusov A.R., Cand. Sci. Tech., director LLC «UfaSistemaGas», Russia, Ufa.

Kushnir V.G., Dr. Sci. Tech., prof., head chair Kostanay state university named after A.Baitursynov, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

Farrakhov R.G., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Theoretical fundamentals of electrical engineering» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Pavlov S.V., Dr. Sci. Tech., prof., head chair of «Geoinformation systems» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Efremova O.A., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Geoinformation systems», Russia, Ufa.

Pavlov A.S., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Geoinformation systems» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Sultanov A.Kh., Dr. Sci. Tech., prof., head chair of «Telecommunication systems» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Chernykh V.M., Cand. Sci. Tech., senior scientific employee chair of «Telecommunication systems» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Meshkov I.K., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Telecommunication systems» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Meshkova A.G., post-graduate student, engineer chair of «Telecommunication systems» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Ishmiyarov A.A., student, laboratory assistant chair of «Telecommunication systems» Ufa state aviation technical university, Russia, Ufa.

Shpirko A.A., master degree Volgograd state technical university, Russia, Volgograd.

Dorofeev N.S., master degree, Volgograd state technical university, Russia, Volgograd.

Rozaliev V.L., Cand. Sci. Tech., docent chair of «CAD/CAE Systems» Volgograd state technical university, Russia, Volgograd.

Orlova Y.A., Cand. Sci. Tech., docent chair of «CAD/CAE Systems» Volgograd state technical university, Russia, Volgograd.

Denisova O.A., Cand. Sci. Tech., docent chair of «Physics» Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Dolomatov M.Yu., Dr. Sci. Tech., prof. chair of «Physics» Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Paymurzina N.Kh., post-graduate student Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Shulyakovskaya D.O., post-graduate student, engineer chair of «Physics» Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Shutkova S.A., post-graduate student Ufa state university of economics and service, Russia, Ufa.

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Материалы, предоставляемые для публикации, должны быть представлены на бумажном и электронном носителе в формате MS Word по адресу: 450078, г. Уфа, ул. Чернышевского, 145. Управление образовательной политики, каб. 321. Электронный адрес: uor-ugaes@mail.ru.
4. Поля – 2,5 см с каждой стороны; шрифт – TNR, кегль 14, межстрочный интервал – полуторный; ссылки на литературу в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 или ГОСТ Р 7.05-2008).
5. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилии и инициалы авторов. Светлым курсивом: ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации, страна, город.
6. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи. УДК – в правом верхнем углу.
7. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса (по этому адресу будет выслан журнал), фамилию и инициалы получателя, телефон, e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx).
8. Обязательно прикрепить к документу фото размером не больше 5 Мб, соответствующее научному журналу.
9. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (5–6 строк), ключевые слова (5–7 слов), список литературы (не более 15 источников).
10. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВПО «УГУЭС» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
11. Графический и табличный материал должен быть представлен 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 подписываются 12-м шрифтом в правом верхнем углу, диаграммы и рисунки по центру внизу.
12. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
13. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
14. Авторы получают авторский экземпляр с опубликованной статьей, оттиски статьи (по требованию автора).
15. С аспирантов плата за опубликование статей 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 («») или (‘’).

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, рассматриваться не будут.