

ISSN 1999-5458

# Электротехнические и информационные комплексы и системы

№ 2, т. 11, 2015



# Electrical and data processing facilities and systems

№ 2, v. 11, 2015



Подписной индекс:  
91824 в каталоге «Пресса России»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭКОНОМИКИ И СЕРВИСА

УГУЭС

№ 2, т. 11, 2015

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

## Учредитель

Министерство образования и науки РФ

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

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций».

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

Главный редактор:

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

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



Зам. главного редактора:

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

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



## Члены редакционной коллегии:

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

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



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

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



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

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



В.Г. Крымский – д-р техн. наук, проф.

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



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

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



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

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



Р.Р. Сафин – д-р техн. наук, проф.

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



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

национального технического университета (Белоруссия, г. Минск)



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

«Уфимский государственный

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



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

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



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

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



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

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



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

Черниговского государственного технологического университета (Украина, г. Чернигов)



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

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



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

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



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

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



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

Технического университета (Болгария, г. Варна)



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

сотр. Института электросварки им. Е.О. Патона

Национальной академии наук Украины

(Украина, г. Киев)



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

Авивского университета (Израиль, г. Тель-Авив)



Ответственный секретарь: А.А. Мухамадиев

Технический редактор: С.С. Некрасова

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала – на сайте [www.ugues.ru](http://www.ugues.ru)

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

© Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2015

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

Тел.: +7 (347) 228-91-38.

Подписано в печать 22.06.2015 г. Формат 60×80 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14. Тираж 1000 экз. Заказ № 81.

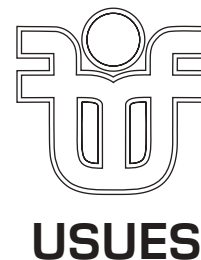
Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы», допускается только с письменного разрешения редакции.

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. 11, 2015

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

## Founder:

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

The journal is included in "The list of reviewed scientific journals and editions for publication of the main scientific results of these".

International standard serial number ISSN 1999-5458.

## Editorial board:

Editor-in-chief:

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



Deputy editor-in-chief:

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



## Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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

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

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

Access and subscription to the electronic version of the journal is available on the website [www.ugues.ru](http://www.ugues.ru).

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

© Ufa State University of Economics and Service, 2015

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

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

Signed for printing 22.06.2015. Format 60×80 1/8. Offset printing. 14 printed pages. Circulation is 1000 copies. Order № 81.

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

Content is published as provided by authors.

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## Электротехнические комплексы и системы

<i>Шапиро С.В., Саенко А.Г.</i> Аналитический метод расчета высокочастотного озонатора с бегущим барьерным разрядом .....	5
<i>Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Нелепин В.С.</i> Выбор солнечных фотоэлементов для рационального электроснабжения циркуляционного насоса гелиосистемы горячего водоснабжения .....	9
<i>Рогинская Л.Э., Шуляк А.А., Белкин А.К., Мухортова Е.И.</i> Выбор структуры тиристорно-индукторного комплекса с согласованными напряжениями инвертора и нагрузки .....	16
<i>Карбельская И.В.</i> Примеры расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии .....	23

## Информационные комплексы и системы

<i>Кучеров Б.А.</i> Решение задач прогнозирования загрузки наземных средств управления космическими аппаратами .....	30
<i>Крымский В.Г., Ахмеджанов Ф.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р.</i> Прогнозирование состояния газораспределительной сети на основе данных телеметрии для предупреждения аварийных ситуаций .....	37
<i>Бакалов В.Г., Чередниченко П.И., Скрипник С.П., Бакалов О.В.</i> Математическое моделирование процесса формирования плоской пленки на приемно - охлаждающем валке .....	43
<i>Зикий А.Н., Зламан П.Н., Пленкин А.П., Фадеева А.С.</i> Стационарный передатчик помех современным средствам связи .....	48
<i>Ахметов И.В., Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф., Сафин Р.Р.</i> Математическое моделирование и оптимизация реакций синтеза ароматических соединений .....	53

## Метрология и информационно-измерительные устройства

<i>Серенков П.С.</i> Обеспечение эффективности внутрилабораторных исследований неопределенности результатов измерений .....	59
<i>Канарейкин В.И., Важдиев К.В.</i> Устройства фазового сдвига для информационно-измерительных систем и машин .....	68
<i>Федосов А.В., Гайнуллина Л.А.</i> Методы неразрушающего контроля .....	73
<i>Морозов И.С.</i> Система определения возможности парковки автомобиля в заданном пространстве .....	79
<i>Мухамадиев А.А.</i> Функциональная модель акустооптического преобразователя температуры .....	85

## Нанoeлектроника и квантовые информационные системы

<i>Леонов В.В., Денисова О.А.</i> Электродинамика сдвигового действия и реализация режима турбулентности в конденсированных средах .....	90
<i>Доломатов М.Ю., Ковалева Э.А.</i> Новый молекулярный дескриптор для прогноза электронных состояний молекулярных систем .....	98

<b>Об авторах</b> .....	104
-------------------------	-----

# CONTENT

## Electrical facilities and systems

<i>Shapiro S.V., Saenko A.G.</i> Analytical method of calculation of highfrequency ozonator with hurrying barrier discharge.....	5
<i>Kushnir V.G., Koshkin I.V., Nelepin V.S.</i> Choice of solar cells for power management of the circulation pump of the solar hot water supply system.....	9
<i>Roginskaya L.E., Shulyak A.A., Belkin A.K., Muhortova E.I.</i> Choice of structure thyristor-inductor complex with agreed voltage of inverter and load.....	16
<i>Karabelskaya I.V.</i> Examples of calculation of electric fields at electrochemical protection of pipelines against corrosion.....	23

## Data processing facilities and systems

<i>Kucherov B.A.</i> Solving tasks of load prediction of ground control facilities for spacecrafts.....	30
<i>Krymsky V.G., Akhmedzhanov F.M., Imilbaev R.R., Yunusov A.R.</i> Prognostics of the state of gas distribution network on the basis of telemetry-provided data for preventing accidents.....	37
<i>Bakalov V.G., Cherednichenko P.I., Skrypnyk S.P., Bakalov O.V.</i> Mathematical modeling of process of formation of a flat film on the reception cooling roll.....	43
<i>Zikiy A.N., Zlaman P.N., Pljonkin A.P., Fadeeva A.S.</i> Stationary noise jammer against modern communication facilities.....	48
<i>Akhmetov I.V., Gubaydullin I.M., Koledina K.Ph., Safin R.R.</i> Mathematical modeling and optimization fusion reactions aromatic compounds.....	53

## Metrology and information-measuring devices

<i>Serenkov P.S.</i> The effectiveness ensuring of single laboratory research of measurement results uncertainty.....	59
<i>Kanareykin V.I. Vazhdaev K.V.</i> Devices of phase shift for information measuring systems and machines.....	68
<i>Fedosov A.V., Gaynullina L.A.</i> Methods of non-destructive testing.....	73
<i>Morozov I.S.</i> System of definition of possibility of the parking of the car in the set space.....	79
<i>Mukhamadiev A.A.</i> Functional model of the acousto-optical transducer of temperature.....	85

## Nanoelectronics and quantum data systems

<i>Leonov V.V., Denisova O.A.</i> Electrodynamics shearing action mode of turbulence and sales in condensed matter.....	90
<i>Dolomatov M.Yu., Kovaleva E.A.</i> New molecular descriptors for prediction of the energies states molecular systems.....	98

<b>About the authors</b> .....	104
--------------------------------	-----

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS



**Шапиро С.В.**  
**Shapiro S.V.**

*доктор технических наук,  
профессор кафедры «Физика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа*



**Саенко А.Г.**  
**Saenko A.G.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Физика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 628.314

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ОЗОНАТОРА С БЕГУЩИМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ

В статье приведены результаты компьютерного моделирования электрического поля высокочастотного озонатора, разработанного в научно-исследовательской лаборатории физики электронных процессов и наноматериалов УГУЭС. Моделирование было выполнено с помощью пакета Maple 14. Основная цель компьютерного моделирования – осуществить аналитический расчет разрядного блока высокочастотного озонатора, выбрать необходимые геометрические характеристики этого блока. Разрядный блок представляет собой цилиндр, выполненный из особо плотной керамики, наружная поверхность которой заключена в проводник, являющийся низковольтным электродом. Внутренняя полость цилиндра является активной зоной, в которой под воздействием высокого напряжения, подаваемого на электроды, выполненные из проводящих нитей, развивается барьерный разряд. Этот разряд и инициирует химическую реакцию превращения двухатомных молекул кислорода в трехатомные молекулы озона. При этом установлено, что барьерный разряд в активной зоне газоразрядного модуля является бегущим – граница ионизированной зоны, характеризующаяся изотензионной поверхностью, напряженность которой равна пробивному напряжению воздуха  $E_{пр} = 3$  кВ/мм. Путем использования метода зеркальных отображений составлены уравнения напряженностей электрического поля в газоразрядной трубке, которые и легли в основу компьютерной модели. Установлено оптимальное число высоковольтных электродов и соответствующее оптимальное их расположение.

*Ключевые слова:* высокочастотный озонатор, газоразрядная трубка, виртуальный электрод, зона ионизированного газа, бегущий барьерный разряд.

## ANALYTICAL METHOD OF CALCULATION OF HIGHFREQUENCY OZONATOR WITH HURRYING BARRIER DISCHARGE

The results of computer simulation of the electric field of high-frequency ozonizer developed in the research laboratory of physics of electronic processes and nanomaterials UGUES. Modeling was performed using a package

of Maple 14. The main purpose of computer simulations - carried out an analytical calculation of high-frequency ozonizer discharge unit – to select the required geometrical characteristics of this unit. Discharge unit is a cylinder made of extremely dense ceramic outer surface of which is enclosed in a conductor, which is low-voltage electrode. The internal cavity is a cylinder core in which under the influence of the high voltage applied to electrodes made of conductive filaments develops barrier discharge. This bit initiates a chemical reaction and the conversion of diatomic molecules of oxygen in the triatomic ozone molecules. It was found that the barrier discharge in the core of the gas discharge module is running – the boundary of the ionized zone, characterized izotenzionnoy surface tension is equal to the breakdown voltage of air  $E_{pr} = 3 \text{ kV/mm}$ . By using the method of mirror images are made up of the equation of the electric field in the discharge tube, which formed the basis of a computer model. The optimal number of high-voltage electrodes and their corresponding optimal location.

*Key words:* high-frequency ozonizer discharge tube, a virtual electrode area of the ionized gas, running barrier discharge.

Разработанные в научно-исследовательской лаборатории физики электронных процессов и наноматериалов УГУЭС ультразвуковые и субультраультовые озонаторы [1, 2] показали свою эффективность в новейших технологических процессах. В связи с этим появилась потребность в усовершенствовании методики их расчета, в значительной степени разработанной в конце прошлого столетия [3].

В этой статье излагаются новые данные по выбору основных конструктивных величин таких озонаторов, полученные путем их математического моделирования в системе Maple 14 фирмы Waterloo Maple (ниже кратко именуемой Maple 14).

На рис. 1а дано поперечное сечение газоразрядной трубки озонатора – основного его модуля. Точками на этом рисунке обозначены высоковольтные нитеобразные электроды, отстоящие от оси трубки на расстоянии  $R_1$ . Диаметр поперечного сечения каждого из этих электродов  $2r_{np}$ . Газоразрядная (активная) зона этой трубки ограничена цилиндрическим диэлектриком, выполненным из плотного кремнезема [1]. Внутренний диаметр этой трубки принят равным  $R$ .

Снаружи трубки находится низковольтный электрод, который выполнен в последних моделях наших озонаторов в виде алюминиевого параллелепипеда с отверстиями для размещения газоразрядных модулей и охлаждающей жидкости [2].

Для расчета электрических процессов в газоразрядном модуле применен метод зеркальных отображений [4].

На рис. 1б дана расчетная схема поперечного сечения газоразрядной трубки с учетом такого отображения. Как видим, каждому высоковольтному электроду на этой схеме поставлен в соответствие зеркальный электрод, отраженный от «зеркала», в качестве которого принята внутренняя поверхность цилиндрической трубки, то есть цилиндр радиуса  $R$ . То, что именно эту поверхность следует принять в качестве зеркальной (эквипотенциальной), обосновано, в частности, в [1]. Зеркальные электроды ( $-\tau$ ) имеют тот же диаметр, что и исходные  $-2r_{np}$ , и располагаются на расстоянии  $R_2$  от оси цилиндра, который определяется по формуле  $R_2 = R^2 / R_1$  (1).

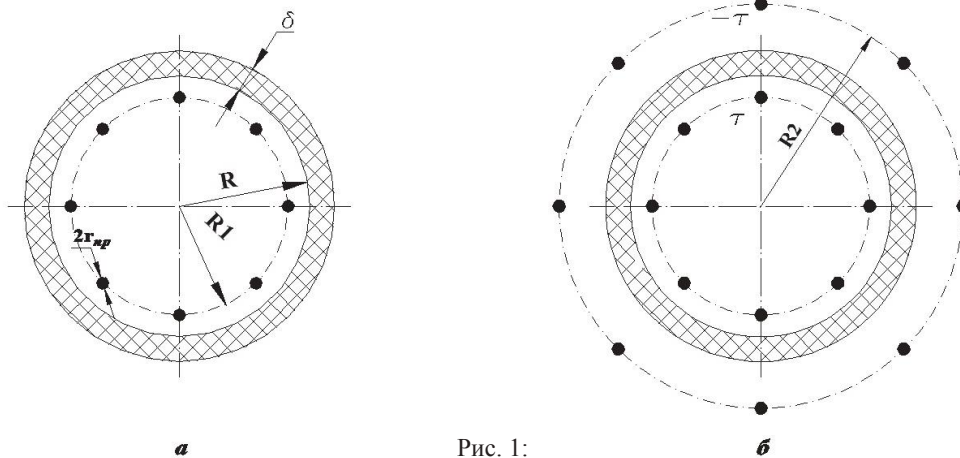


Рис. 1:

а) поперечный разрез газоразрядной трубки с нитевидными высоковольтными электродами, где  $R$  – внутренний радиус керамического цилиндра;  $R_1$  – расстояние от центра цилиндра до высоковольтных электродов;  $r_{np}$  – радиус высоковольтного электрода;  $\delta$  – толщина диэлектрического барьера;

б) расчетная схема поперечного сечения газоразрядной трубки с зеркально отображенными электродами, где  $R_2$  – расстояние от центра цилиндра до зеркального отображения электродов;  $\tau$  и  $-\tau$  – линейная плотность заряда высоковольтного и зеркально отраженного электродов

На рис. 2 показано развитие разряда вокруг высоковольтного электрода в течение каждого полупериода изменения напряжения, полученное на компьютерной модели схемы 1б. Оно осуществляется следующим образом. Сначала по

мере роста напряжения пробой (ионизация воздуха) происходит в слое, приближенном к высоковольтному электроду, а затем распространяется в более отдаленные слои (бегущий барьерный разряд) [3].

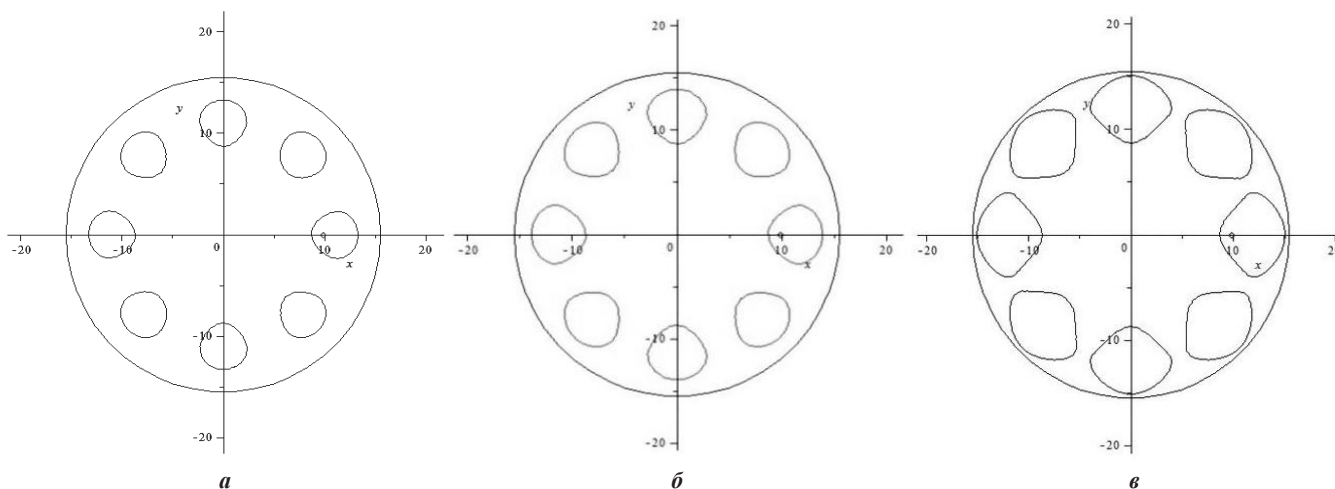


Рис. 2. Развитие разряда в активной зоне трубки от высоковольтного электрода к низковольтному: фигуры а, б, в показывают развитие разряда – увеличение площади поперечного сечения зоны ионизации – по мере увеличения мгновенного значения напряжения на электродах разрядной трубки

Напряженность поля в произвольной точке активной зоны определяется следующим образом:

$$E_x = A \cdot \sum_{k=1}^N \left( \frac{X_1}{X_1^2 + Y_1^2} - \frac{X_2}{X_2^2 + Y_2^2} \right);$$

$$E_y = A \cdot \sum_{k=1}^N \left( \frac{Y_1}{X_1^2 + Y_1^2} - \frac{Y_2}{X_2^2 + Y_2^2} \right),$$

где  $E_x$  – проекция вектора напряженности на ось  $x$ ;  
 $E_y$  – проекция вектора напряженности на ось  $y$ ;

$$A = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0},$$

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  
 $X_1$  – координата по оси  $x$  до  $k$ -го высоковольтного электрода,

$$X_1 = x - R_1 \cos \frac{2\pi k}{N};$$

$Y_1$  – координата по оси  $y$  до  $k$ -го высоковольтного электрода,

$$Y_1 = y - R_1 \cos \frac{2\pi k}{N};$$

$X_2$  – координата по оси  $x$  до  $k$ -го виртуального электрода,

$$X_2 = x - R_2 \cos \frac{2\pi k}{N};$$

$Y_2$  – координата по оси  $y$  до  $k$ -го виртуального электрода,

$$Y_2 = y - R_2 \cos \frac{2\pi k}{N};$$

$N$  – число электродов (для данного озонатора  $N=8$ );  
 $k$  – номер электрода.

Пробой в зоне распространяется от высоковольтного электрода по мере роста разности потенциалов на электродах озонатора вдоль поверхности с напряженностью

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \text{const} = E_{пр},$$

где  $E_{пр}$  – напряжение пробоя воздуха,  $E_{пр} = 3$  кВ/м.

Зная величину напряженности в каждой точке активной зоны, можно построить изотензионные линии – линии одинаковой напряженности ( $E = \text{const}$ ). Изотензионная линия, касающаяся внутренней поверхности диэлектрического барьера, определяет предельную стадию бегущего разряда. На рис. 3 показано семейство изотензионных линий, полученное в результате моделирования.

Математическое моделирование осуществлялось с помощью программного пакета Maple 14 [6]. Проведенные на компьютерной модели исследования показали, что максимальный суммарный объем ионизированной зоны в разрядном промежутке при заданном числе электродов будет в том случае, когда эти зоны представляют собой участки вокруг каждого из электродов, которые одновременно касаются поверхности диэлектрического барьера и практически соприкасаются друг с другом (рис. 4).

В результате моделирования было установлено оптимальное число высоковольтных электродов НОПТ=8 и соответствующее оптимальное соотно-



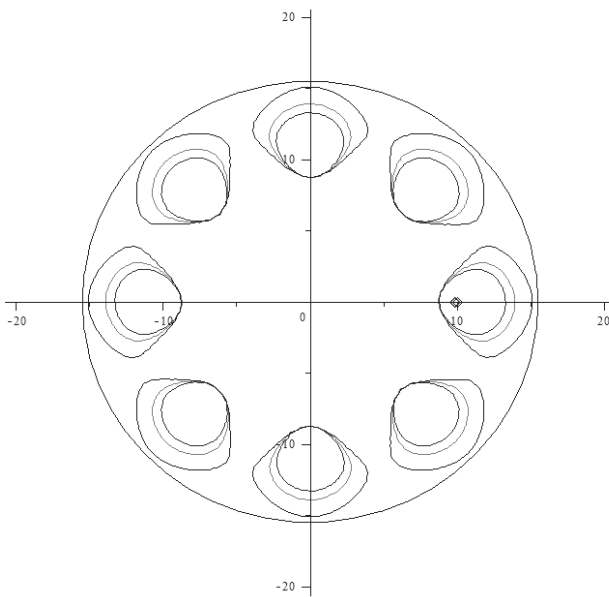


Рис. 3. Семейство изотензионных линий в газоразрядной трубке озонатора

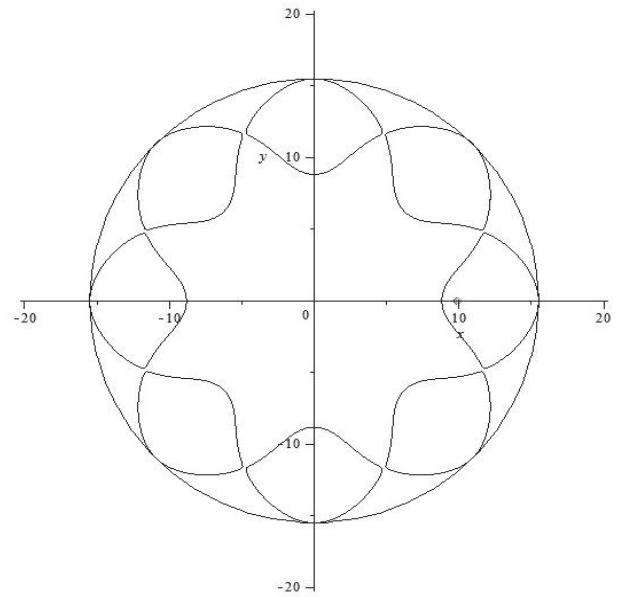


Рис. 4. Максимальная зона ионизации 8-электродной газоразрядной трубки

шение между внутренним радиусом газоразрядной керамической трубки и расстоянием от оси трубки до высоковольтных электродов. Для данной конфигурации трубки оно равно

$$\frac{R}{R_1} = 1,587.$$

При таком соотношении максимальная площадь ионизированной зоны в поперечном сечении газоразрядной трубки составляет 43% от всей площади активной зоны.

#### Список литературы

1. Шапиро С.В. Высокочастотный озонатор с охлаждаемым алюминиевым электродом [Текст] / С.В. Шапиро, А.Г. Саенко, М.А. Садыков, Е.В. Мичков // *Электротехнические комплексы и системы*. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 49–56.
2. Шапиро С.В. (ред.) Ультразвуковые и субультразвуковые генераторы озона [Монография] / С.В. Шапиро, С.А. Дунаев, А.Г. Саенко, М.А. Садыков, Е.В. Мичков. – LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 120 с.
3. Шапиро С.В. Высокочастотный озонатор с бегущим барьерным разрядом [Текст] / С.В. Шапиро, А.Ш. Амирханов, А.Г. Саенко // *Межвузовский научный сборник «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы»*. – Уфа: УГАТУ, 2002.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле [Текст] / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. школа, 2001. – 231 с.
5. Шапиро С.В. Элементы теории высокочастотного озонатора с бегущим барьерным разрядом

[Текст] / С.В. Шапиро // *Межвузовский научный сборник «Электротехнические комплексы и системы»*. – Уфа: УГАТУ, 2005.

6. Дьяконов В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах [Текст] / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК-Пресс, 2011. – 800 с.

#### References

1. Shapiro S.V. Vysokochastotnyj ozonator s ohlazhdaemym aljuminievym jelektrodom [t ekst] / S.V. Shapiro, A.G. Saenko, M.A. Sadykov, E.V. Michkov // *Jelektrotehnicheckie komplekсы i sistemy*. – 2014. – t. 10. – № 1. – S. 49–56.
2. Shapiro S.V. (red.) Ul'trazvukovye i subul'trazvukovye generatory ozona [Monografija] / S.V. Shapiro, S.A. Dunaev, A.G. Saenko, M.A. Sadykov, E.V. Michkov. – LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 120 s.
3. Shapiro S.V. Vysokochastotnyj ozonator s begushhim bar'ernym razrjadom [t ekst] / S.V. Shapiro, A.Sh. Amirhanov, A.G. Saenko // *Mezhvuzovskij nauchnyj sbornik «Jelektromehaniка, jelektrotehnicheckie komplekсы i sistemy»*. – Ufa: UGATU, 2002.
4. Bessonov L.A. Teoreticheckie osnovy jelektrotehnikki: Jelektromagnitnoe pole [t ekst] / L.A. Bessonov. – M.: Vyssh. shkola, 2001. – 231 s.
5. Shapiro S.V. Jelementy teorii vysokochastotnogo ozonatora s begushhim bar'ernym razrjadom [t ekst] / S.V. Shapiro // *Mezhvuzovskij nauchnyj sbornik «Jelektrotehnicheckie komplekсы i sistemy»*. – Ufa: UGATU, 2005.
6. D'jakonov V.P. Maple 10/11/12/13/14 v matematicheskikh raschetah [t ekst] / V.P. D'jakonov. – M.: DMK-Press, 2011. – 800 s.



**Кушнир В.Г.**  
**Kushnir V.G.**

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



**Кошкин И.В.**  
**Koshkin I.V.**

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



**Нелепин В.С.**  
**Nelepin V.S.**

*магистрант,  
Костанайский  
государственный университет  
имени А. Байтурсьнова,  
Казахстан, г. Костанай*

УДК 621.668

## **ВЫБОР СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА ГЕЛИОСИСТЕМЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

На сегодняшний день, несмотря на то, что солнечная энергетика стремится к большим масштабам развития, все равно доля выработки как тепловой, так и электрической энергии от солнца находится на низком уровне. Поэтому для повышения эффективности использования солнечных панелей и коллекторов необходимо подбирать оборудование как можно с большей точностью. В статье рассматривается конструкция типового трубчатого солнечного жидкостного коллектора, его характерные особенности. Предлагается способ, при котором элементы замкнутой системы всесезонного солнечного коллектора получают электроэнергию не от традиционной сети 380/220 В, а от солнечного фотоэлемента. Проведены исследования активности солнечной радиации за характерные сутки года, по значениям которых впоследствии производятся расчеты по необходимому расходу теплоносителя по конструкциям коллектора. Расход теплоносителя непосредственно связан с работой циркуляционного насоса и, соответственно, с работой системы солнечной электростанции. В статье производится расчет мощности циркуляционного насоса системы горячего водоснабжения, который получает питание от автономной солнечной электростанции. Приведенный расчет позволяет с достаточной точностью определять электрическую нагрузку циркуляционного насоса в течение характерных суток года, что необходимо для выбора типа и мощности солнечного фотоэлемента для электропитания насосной установки. По расчетному графику нагрузки насоса формируются критерии выбора параметров всех элементов солнечной электростанции: фотоэлектрическая установка, контроллер, инвертор, аккумулятор. Предполагается одно допущение, что циркуляционный насос выбран на переменный род тока, для чего требуется инвертирующее устройство.

*Ключевые слова:* солнечная электрическая станция, система солнечного горячего водоснабжения, циркуляционный насос, солнечная радиация, мощность, график нагрузок.

## **CHOICE OF SOLAR CELLS FOR POWER MANAGEMENT OF THE CIRCULATION PUMP OF THE SOLAR HOT WATER SUPPLY SYSTEM**

To date, despite the fact that solar energy seek large scale of production still share both thermal and electrical energy from the sun is at a low level. Therefore, to improve efficiency of solar collector panels and equipment should be selected as much as possible with higher accuracy. The article discusses the design of a model of the tubular solar collector fluid, its distinctive features. A method in which elements of a closed system multigrade

solar collector does not receive electricity from traditional networks 380/220 and from solar photocell. The research activity of solar radiation for specific day of the year, the value of which in consequence calculations on necessary expenses for the coolant reservoir structures. Flow rate is directly related to the operation of the circulation pump and, respectively, with the system of the solar power plant. The paper calculates the power of the circulation pump hot water system, which is powered by an autonomous solar power. These calculations can adequately determine the electrical load of the circulation pump for specific days of the year, it is necessary to select the type and capacity of solar cell to power the pump unit. According to the settlement graphics load pump formed the selection criteria parameters of all elements of the solar power plant: photovoltaic plant, controller, inverter, battery. It is assumed one assumption that the circulation pump is selected to alternating current type, which requires inverting device.

*Key words:* solar power station, solar hot water system, circulation pump, solar radiation, power load schedule.

Солнечная энергия является экологически чистой. Использование солнечной энергии позволяет сберечь природные невозобновляемые ресурсы. Применение электрической станции для питания циркуляционного насоса системы горячего водоснабжения позволит полностью сделать работу нагревателя автономной.

Сплит-система, произведенная на базе солнечного коллектора (рис. 1), представляет собой обычный солнечный коллектор, выполненный из набора тепловых трубок (heat pipe), которые подключаются к действующему источнику теплоснабжения. Частичное

покрытие внутреннего защитного слоя вакуумированных трубок преобразует солнечную энергию в тепловую и передает ее тепловым трубкам по алюминиевым пластинам (ребрам). Жидкость, находящаяся в тепловой трубке, переходит в пар, который поднимается в конденсатор. Тепло проходит через теплообменник, и пар переходит в жидкое состояние, возвращаясь в основание трубки. По медной трубке тепло проводится в жидкий теплоноситель (антифриз, жидкость или вода). Сам солнечный коллектор подсоединяется к теплообменнику и циркуляционному насосу, питающемуся от сети переменного тока напряжением 220 В.



Рис. 1. Конструкция нагревательного элемента солнечного коллектора

Предлагаемый способ заключается в электропитании циркуляционного насоса как одного из элементов солнечной электростанции, являющегося неавтономным элементом, от возобновляемого источника – солнечной электростанции.

Всесезонный солнечный жидкостный коллектор подсоединяется к теплообменнику и циркуляционному насосу, который будет питаться электроэнергией от солнечной батареи. Функциональная схема конструкции представлена на рис. 2.

При расчете циркуляционного насоса вышеописанной системы горячего водоснабжения необходимо учитывать ряд факторов. Как правило, для обеспечения бесперебойной работы насоса необходимо знать значение напора теплоносителя (в нашем случае антифриза) и его расход. Для расчета параметров циркуляционного насоса будем исходить из максимальной производительности самих коллекторов.

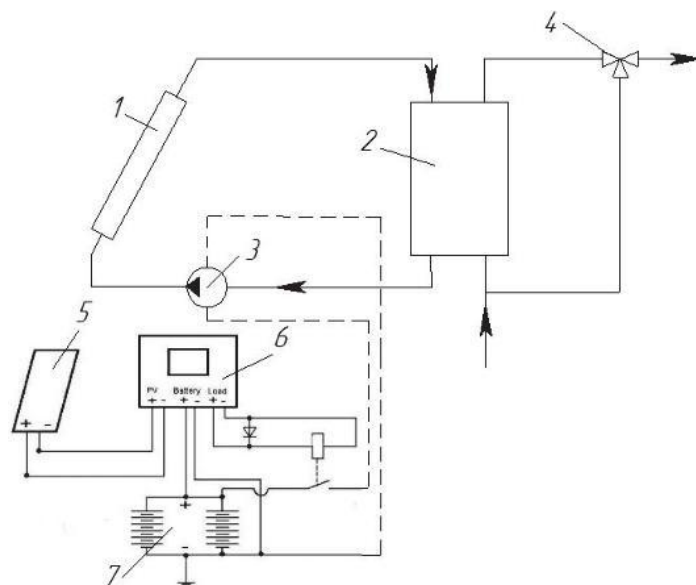


Рис. 2. Система солнечного нагревателя:

1 – коллектор; 2 – бак-накопитель; 3 – насос; 4 – клапан; 5 – солнечная батарея;  
6 – контроллер заряда аккумулятора; 7 – аккумуляторная батарея

Расчет расхода антифриза выполняется по формуле:

$$G = \frac{Q}{c \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (1)$$

где  $Q$  – параметр, характеризующий тепловую потребность;  $c$  – удельная теплоемкость жидкости;  $t_2$  – температура на выходе, для расчета в нашем случае возьмем за  $70^\circ\text{C}$ ;  $t_1$  – температура на входе, для исследования данный параметр составит примерно  $10^\circ\text{C}$ .

Параметры  $t_1$  и  $t_2$  взяты условно, так как на территории Костанайской области в холодное время года солнечный коллектор не сможет поднять температуру более чем на 60 градусов, поэтому для расчетов принимается разность температур в 60 градусов Цельсия, хотя параметр  $t_1$  имеет переменный характер.

Параметр  $Q$  характеризует тепловую потребность, в нашем случае это потребность горячей воды, стоит отметить, что тепловая потребность  $Q$  является переменной величиной. В сплит-системе имеется замкнутый контур, по которому движется теплоноситель. По этому контуру тепловая энергия передается на участке, находящемся в баке-накопителе (он же теплообменник), эта теплопередача является источником полезной энергии для нагрева воды. Поэтому за параметр  $Q$  мы принимаем ту часть энергии, которая забирается на нужды столовой из бака-накопителя солнечного водонагревателя. Для нужд столовой необходимо примерно 90–100 литров воды температурой 50–60 градусов Цельсия. Чтобы обеспечить данные требования, воспользуемся обыч-

ным постоянным числом – это теплоемкость воды, она составляет  $4200 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$ . Если перевести джоули в ватты, то можно прийти к выводу: для нагрева одного килограмма воды на один градус Цельсия необходимо  $1,2 \text{ Вт}$  энергии.

Как отмечалось выше, потребность в горячей воде является величиной изменчивой, и определить ее точно невозможно. Поэтому для определения этого параметра будем исходить из максимальной энергии, которую может произвести солнечный коллектор в зависимости от солнечной радиации.

Для оценки потенциала солнечной энергии были проведены исследования по солнечной радиации. Значения по солнечной радиации были получены благодаря метеостанции, которая соединена непосредственно с компьютерными системами, а также при помощи архива данных по солнечной радиации. Все полученные значения радиации были усреднены за один летний месяц и сведены в таблицу 1, как за один день.

Расчет параметра  $Q$  производится из следующих соображений: исследуемая действующая система горячего водоснабжения имеет солнечный коллектор, площадь его составляет  $2 \text{ м}^2$ . Из табл. 1 возьмем почасовую радиацию в  $\text{Вт/м}^2$ , при этом учтем, что КПД коллектора составляет  $0,6$ , таким образом, максимальная энергия складывается из площади коллектора, солнечной радиации на квадратный метр и КПД коллектора, то есть, например, найдем параметр  $Q$  по табл. 1 соответствующей радиации в 08 часов 03 минуты:  $Q = 3,1 \cdot 2 \cdot 0,6 = 3,72 \text{ Вт}$ .

Таблица 1

Усредненные значения солнечной радиации

Время измерения	Ток, А	Напряжение, В	Температура, °С	Влажность воздуха, %	Солнечная радиация, Вт/м
1:00:00	-	-	8,1	18,0	0
1:00:02	0,2138	0,053	8,1	18,0	0
2:00:02	0,2136	0,0583	7,4	18,8	0
3:00:03	0,2132	0,0549	6,9	19,0	0
4:00:05	0,211	0,0724	6,9	19,0	0
5:00:05	0,2089	0,0777	6,3	19,0	0
6:00:05	0,2074	0,5553	5,9	19,0	0
7:03:16	0,2298	21,1663	5,5	19,0	0
8:03:16	0,3147	31,4682	5,0	19,1	3,1
9:03:16	0,2075	34,58	4,9	20,0	54,9
10:03:17	0,2058	34,9485	5,5	20,0	168,6
11:03:17	0,2089	34,4924	6,7	20,0	328,1
12:03:30	0,2097	34,0861	8,6	20,0	524,8
13:03:31	0,2084	33,9667	10,8	20,0	640,8
14:03:32	0,2121	33,8586	12,0	20,0	712,2
15:07:36	0,212	33,8755	12,9	20,0	767,1
16:07:37	0,218	33,907	13,4	19,5	695,8
17:07:37	0,221	33,8808	14,3	18,5	680,3
18:07:37	0,2231	33,1502	14,7	17,3	587,7
19:07:37	0,2275	32,2757	14,9	16,3	472,5
20:07:38	0,2283	31,5812	14,6	16,0	303,4
21:07:39	0,2242	28,797	14,3	16,3	143,1
22:07:39	0,2193	9,4751	13,6	17,5	27,4
23:07:45	0,2193	9,4751	12,2	19,0	0
23:08:19	0,2174	0,0788	12,2	19,0	0

Таким образом, полученные значения являются максимальной тепловой потребностью. Аналогичным способом рассчитываем параметр  $Q$  для всех значений суточной радиации и результаты сводим в табл. 2. Расчет расхода жидкости выполняется для каж-

дого значения  $Q$  по формуле (1):

$$G = \frac{3,1}{4200 \cdot (70 - 10)} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Кг/с.}$$

Аналогично рассчитываем следующие значения и сводим в табл. 2.

Таблица 2

Данные по расходу жидкости в зависимости от солнечной радиации

КПД коллектора	Солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup>	Теплопотребность $Q$ , Вт/м <sup>2</sup>	Расход жидкости в контуре водонагревателя, Кг/с
0,6	3,1	3,7	$1,2 \cdot 10^{-5}$
0,6	54,9	65,9	$2,6 \cdot 10^{-4}$
0,6	168,6	202,3	$8 \cdot 10^{-4}$
0,6	328,1	393,6	$1,5 \cdot 10^{-3}$
0,6	524,8	629,7	$2,4 \cdot 10^{-3}$
0,6	640,8	769	$3 \cdot 10^{-3}$
0,6	712,2	854,4	$3,3 \cdot 10^{-3}$
0,6	767,1	920,5	$3,7 \cdot 10^{-3}$
0,6	695,8	835	$3,3 \cdot 10^{-3}$

КПД коллектора	Солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup>	Теплопотребность $Q$ , Вт/м <sup>2</sup>	Расход жидкости в контуре водонагревателя, Кг/с
0,6	680,3	816,4	$3,3 \cdot 10^{-3}$
0,6	587,7	705,2	$2,8 \cdot 10^{-3}$
0,6	472,5	567	$2,3 \cdot 10^{-3}$
0,6	303,4	364,8	$1,4 \cdot 10^{-3}$
0,6	143,1	171,7	$6,7 \cdot 10^{-4}$
0,6	27,4	32,9	$1,3 \cdot 10^{-4}$

Как отмечалось выше, одним из немаловажных параметров для выбора насоса для исследуемой установки является напор жидкости. Этот параметр является важным потому, что в самом замкнутом контуре имеется сопротивление, которое образуется от самых разных факторов. Например, сопротивление в трубах контура, сопротивление, вызванное изгибами трубопровода, и др. То есть эти факторы вызывают потери давления в сплит-системе. Таким образом, напор можно рассчитать по выражению:

$$H = 1,3 \cdot \sum [R \cdot L] \cdot Z, \quad (2)$$

где  $R$  – потери давления в водопроводе;  $L$  – длина трубопровода – 8 м;  $Z$  – коэффициент запаса, выбирается по справочным данным и составляет 2,2.

Общая длина водопровода для исследуемой установки составляет 8 м.

Расчет напора:

$$H = 1,3 \cdot (\sum [22 \cdot 8] * 2,2) / 10000 = 0,05 \text{ м.}$$

Рассчитываем подачу жидкости:

$$V = G / (1,16 \cdot \Delta T), \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – разность температур, для нашего случая она составляет 60 °С.

$$V = 0,012 / (1,16 \cdot 60) = 0,00017 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Аналогичным способом рассчитываем подачу для остальных значений расхода жидкости.

Производим расчет мощности насоса по выражению:

$$P = 1,5 (\rho \cdot H \cdot V \cdot g) / \eta, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\eta$  – КПД насоса = 0,7.

$$P = 1,5 (1000 \cdot 0,05 \cdot 0,00017 \cdot 9,8) / 0,7 = 0,17 \text{ Вт.}$$

Аналогичным способом рассчитываем мощность насоса для остальных значений подачи и напора жидкости, сводим полученные значения в табл. 3.

Таблица 3

Значения мощности насоса в зависимости от переменных параметров подачи жидкости

Расход жидкости в контуре водонагревателя, Кг/с	Напор жидкости, м	Подача жидкости насосом, м <sup>3</sup> /ч	Мощность насоса, Вт
$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$
$2,6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	3,9
$8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	11,6
$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	22,1
$2,4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	35,7
$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	45,2
$3,3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	49,4
$3,7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	55,7
$3,3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	49,4
$3,3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	49,4
$2,8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	42
$2,3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	34,7
$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	21
$6,7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	10,1
$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	1,9

Для большей наглядности изменения мощности циркуляционного насоса от тепловой потребности

системы горячего водоснабжения можно построить суточный график нагрузки насоса (рис. 3).

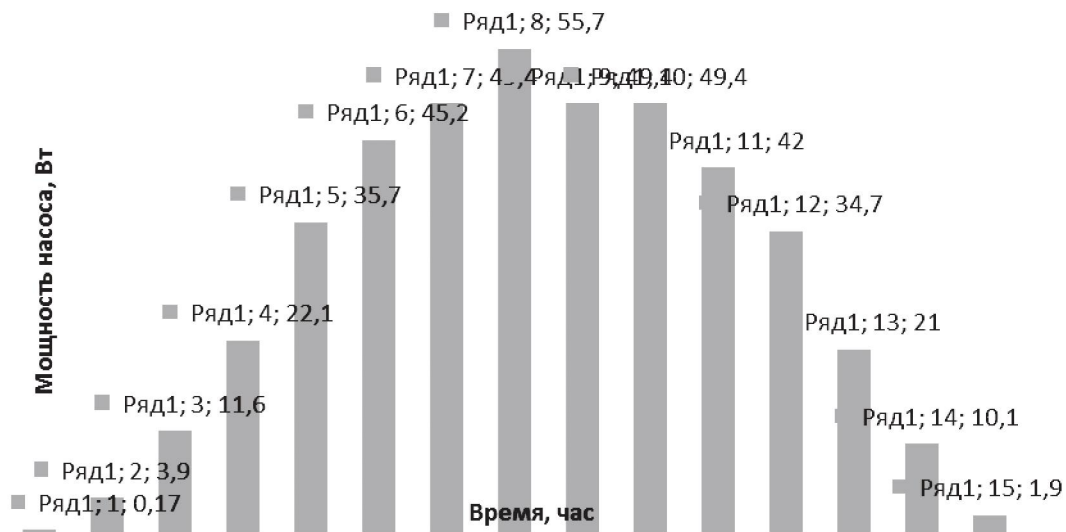


Рис. 3. Суточный график нагрузки насоса

Из рис. 3 видно, что нагрузка плавно растет и затем плавно падает. Это происходит потому, что работа насоса прямо пропорциональна параметру тепловой потребности, который, в свою очередь, пропорционален солнечной радиации.

Для оценки подбора солнечной батареи для циркуляционного насоса необходимо знать не только установленную мощность, но и количество энергии, потребляемой насосом в сутки. В табл. 3 мощность насоса приводится по каждому часу в течение суток. Поэтому энергию, потребленную за сутки насосом, можно определить по выражению:

$$P_{\text{потр}} = \sum P_i, \quad (5)$$

где  $P_i$  – мощность, соответствующая каждому часу работы.

$$P_{\text{потр}} = 432,1 \text{ Вт/ч.}$$

Еще одним немаловажным критерием выбора насоса является рабочее напряжение насоса. Рабочее напряжение насосной установки является переменным 12 В, что предполагает наличие гибридного коллектора, совмещенного с инвертором.

Таким образом, после получения полной картины нагрузки циркуляционного насоса выбирается солнечная электростанция.

Выбор солнечной батареи производим по условию:

$$P_{\text{вырабат}} > \text{или} = P_{\text{потр}}. \quad (6)$$

Потребляемая мощность из предыдущих расчетов уже известна и составляет 432,1 Вт·ч в сутки. Для расчета выработанной мощности используется значение инсоляции. Для исследуемого региона, то есть для Костанайской области, значение дневной

инсоляции находим, суммируя последнюю колонку табл. 1, и получаем  $E_{\text{дневная}} = 6109,8 \text{ Вт·ч/м}^2$ .

Находим энергию, выработанную солнечной батареей:

$$P_{\text{вырабат}} = E_{\text{дневная}} \cdot P_{\text{с.б}} / 1000, \quad (7)$$

где  $P_{\text{с.б}}$  – предполагаемая мощность солнечной батареи – 80 Вт.

$$P_{\text{вырабат}} = 6109,8 \cdot 80 / 1000 = 488,8 \text{ Вт.}$$

Окончательно выбираем одну стандартную солнечную панель мощностью 80 Вт.

Для обеспечения должной работы солнечного водонагревателя необходимо обеспечить правильный тепловой баланс. Данный баланс обеспечивается наличием в системе циркуляционного насоса, который, в свою очередь, питается электрической энергией, выработанной от солнечной станции. Следовательно, работа всей системы горячего водоснабжения напрямую зависит от солнечной электростанции, а точнее от солнечных элементов. Естественно, солнечная активность носит изменчивый характер. Например, если на улице кратковременно стало пасмурно, то, соответственно, солнечная радиация падает. Эта кратковременная затененность на сам солнечный коллектор большого влияния не окажет, так как вода долго остывает, почти в 10 раз дольше, чем железо, однако в солнечной батарее при затененности резко снижается вырабатываемая электроэнергия, и если в этот момент работал циркуляционный насос, то он может перестать работать. Для недопущения такого явления необходимо использовать аккумулятор электрической энергии. Причем аккумулятор должен быть с неким запасом электрической энергии. Расчет аккумулятора произведем с опре-

деления необходимой емкости. Она определяется по выражению:

$$C = \frac{P}{U} \Delta t_{HB}, \quad (8)$$

где  $P$  – мощность солнечной батареи;  $U$  – номинальное напряжение;  $\Delta t_{HB}$  – время, за которое аккумулятор заряжаться не будет, например, ночью, при загрязнении или заснеженности солнечных панелей.

В проведенных исследованиях параметр составляет 12 часов, то есть это средняя цифра между зимним и летним временем:

$$C = \frac{80}{12} 12 = 80 \text{ А}\cdot\text{ч.}$$

Естественно, емкости 80 А·ч будет достаточно для обеспечения должной работы циркуляционного насоса, но при этом аккумуляторная батарея разрядится полностью. Таким образом, необходимо руководствоваться паспортными данными аккумуляторов, например: аккумулятор, в котором используется электролит, способен выдерживать глубину разряда 50%, а АГМ-аккумуляторы имеют глубину разряда порядка 70–80%. Таким образом, с учетом вышесказанных доводов выводится формула для определения емкости аккумулятора:

$$C = \frac{100}{\Gamma_p} \frac{P}{U} \Delta t_{HB}, \quad (9)$$

где  $\Gamma_p$  – глубина разряда = 80%.

$$C = \frac{100}{80} \frac{80}{12} 12 = 100 \text{ А}\cdot\text{ч.}$$

Еще одним важным фактором при выборе аккумуляторных батарей является расчет по графику нагрузок. Многие электрические приемники работают в разных режимах. Например, режим полной нагрузки, режим частичной нагрузки, режим холостого хода и так далее. При расчете аккумуляторов по режимам работы электрического потребителя выражение (9) запишется в следующем виде:

$$C = \frac{100}{\Gamma_p U} (P_1 \Delta t_1 + P_2 \Delta t_2), \quad (10)$$

где  $P_1, P_2$  – нагрузка;  $\Delta t_1, \Delta t_2$  – временные периоды работы циркуляционного насоса при нагрузке  $P_1, P_2$  соответственно.

Согласно графику электрических нагрузок известно, что нагрузка меняется каждый час, таким образом,  $\Delta t$  будет составлять 1 час:

$$C = \frac{100}{80 \cdot 12} (0,17 + 3,9 + 11,6 + 22,1 + 35,7 + 45,2 + 49,4 + 55,7 + 49,4 + 49,4 + 42 + 34,7 + 21 + 10,1 + 1,9) = 45 \text{ А}\cdot\text{ч.}$$

При определении количества аккумуляторных батарей необходимо выбрать рабочее напряжение системы. Так как общая потребляемая мощность циркуляционного насоса невысокая – 432,1 Вт, то есть эта мощность лежит в пределах 0–1 000 Вт, то рабочее напряжение выбираем 12 В.

Для безотказной работы автономного питания циркуляционного насоса, помимо аккумуляторных и солнечных батарей, необходим еще один немаловажный компонент – это контроллер заряда аккумулятора. Данный компонент выполняет связную функцию между солнечными и аккумуляторными батареями, изменяя род тока и осуществляя функцию контроля заряда аккумуляторов. Из предыдущих расчетов стало известно, что напряжение системы было выбрано 12 В, таким образом, контроллер тоже должен иметь напряжение 12 В с последующим инвертированием для электропитания циркуляционного насоса.

#### Список литературы

1. Ключев В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов [Текст] / В.И. Ключев, В.М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
2. Виссарионов В.И. Солнечная энергетика [Текст] / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 276 с.
3. Алферов Ж.И. Фотоэлектрическая солнечная энергетика [Текст] / Ж.И. Алферов / В сб.: Будущее науки. – М.: Знание, 1978. – С. 92–101.
4. Якубчик П.П. Насосы и насосные станции: учебное пособие [Текст] / П.П. Якубчик. – СПб.: ПГУПС, 1997. – 107 с.

#### References

1. Kljucev V.I. Jelektroprivod i avtomatizacija obshepromyshlennyh mehanizmov [Tekst] / V.I. Kljucev, V.M. Terehov. – M.: Jenergija, 1980. – 360 s.
2. Vissarionov V.I. Solnechnaja jenergetika [Tekst] / V.I. Vissarionov, G.V. Derjugina, V.A. Kuznecova, N.K. Malinin. – M.: Izdatel'skij dom MJeI, 2008. – 276 s.
3. Alferov Zh.I. Fotojelektricheskaja solnechnaja jenergetika [Tekst] / Zh.I. Alferov / V sb.: Budushhee nauki. – M.: Znanie, 1978. – S. 92–101.
4. Jakubchik P.P. Nasosy i nasosnye stancii: uchebnoe posobie [Tekst] / P.P. Jakubchik. – SPb.: PGUPS, 1997. – 107 s.





**Рогинская Л.Э.**  
**Roginskaya L.E.**

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



**Шуляк А.А.**  
**Shulyak A.A.**

кандидат технических  
наук, доцент,  
заместитель  
директора научно-  
производственного  
предприятия «Курай»,  
Россия, г. Уфа



**Белкин А.К.**  
**Belkin A.K.**

ведущий инженер  
федерального  
государственного  
унитарного предприятия  
«Научное конструкторско-  
технологическое бюро  
«Вихрь»,  
Россия, г. Уфа



**Мухортова Е.И.**  
**Muhortova E.I.**

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

УДК 621.365.5

## ВЫБОР СТРУКТУРЫ ТИРИСТОРНО-ИНДУКТОРНОГО КОМПЛЕКСА С СОГЛАСОВАННЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ ИНВЕРТОРА И НАГРУЗКИ

Под тиристорно-индукторным комплексом будем понимать соединение двух основных частей индукционной установки: высокочастотного преобразователя частоты, выполненного на базе автономного инвертора, и индуктора для термообработки материалов.

При этом следует учитывать, что нагрузочный контур инвертора, предназначенный для термообработки металлов, имеет активно-индуктивный характер и представляет индукторно-конденсаторный модуль. Поэтому необходимо совместное рассмотрение согласующего и компенсирующего элементов.

В данной статье рассматриваются вопросы согласования выходных параметров инвертора с параметрами нагрузочного колебательного контура.

Показано, что для получения высокого коэффициента мощности, при котором токи, протекающие через полупроводниковые элементы инвертора, не будут превышать допустимой величины, могут применяться последовательный, параллельный или последовательно-параллельный способы компенсации коэффициента мощности нагрузочного колебательного контура. Кроме того, в статье рассматриваются преимущества того или иного способа компенсации и, что представляет теоретическую ценность и практическую новизну, приводится, во-первых, обобщенная схема колебательного контура нагрузки, а во-вторых, показано, что для получения максимальной мощности в нагрузке необходимо иметь такую частоту, при которой эквивалентное активное сопротивление  $R_{экв}$  имеет максимальное значение. Однако в этом случае необходим поиск максимума мощности, то есть применение экстремального регулирования. Близость частот, при которых имеют место различные характерные режимы, позволяет осуществлять согласование с помощью тех параметров, которые при максимуме мощности в нагрузке близки к нулю. Такими параметрами служат: сдвиг фаз между током и напряжением нагрузочного контура –  $\varphi$  и разность токов в индуктивной и емкостной ветвях –  $(I_L - I_C)$ .

Кроме того, в статье представлены аналитические зависимости параметров согласования для параллельного контура, для автотрансформаторного способа подключения нагрузочного контура и для схемы с емкостным делителем напряжения.

Таким образом, каждый из предлагаемых способов бестрансформаторного повышения напряжения обладает рядом достоинств и недостатков. Показано, что наиболее широкими возможностями обладает согласование параметров источника питания и нагрузки с помощью трансформаторов. Применение высокочастотных трансформаторов позволяет как повышать, так и понижать выходное напряжение источника,

а использование современных ферромагнитных материалов – аморфных или нанокристаллических сталей приводит к повышению их эффективности.

*Ключевые слова:* затухание, инвертор, индуктор, индукционная установка, коэффициент мощности, полупроводниковый элемент, преобразователь частоты, способ компенсации, схема замещения, тиристорно-индукционный комплекс, эквивалентное активное сопротивление.

## CHOICE OF STRUCTURE THYRISTOR-INDUCTOR COMPLEX WITH AGREED VOLTAGE OF INVERTER AND LOAD

A thyristor-inductor complex we mean a combination of two main parts induction plant: a high-frequency inverter, made on the basis of a stand-alone inverter, and an inductors for the heat treatment of materials.

It should be borne in mind that the load circuit of the inverter, designed for heat treatment of metals, has an active-inductive and represents inductor-capacitor module. It is therefore necessary joint consideration of the matching and compensating elements.

This article deals with the coordination of the inverter output parameters with the parameters of the load oscillation circuit.

It is shown that to obtain high power factor at which the currents flowing through the semiconductor elements of the inverter will not exceed the permissible value may be used serial, parallel or series-parallel method for power factor correction of the load oscillation circuit. In addition, the article discusses the advantages of this or that compensation and that is the theoretical value and practical novelty – are, firstly, a generalized diagram of the oscillation circuit load, and secondly, it is shown that to obtain maximum power load must be the frequency at which the equivalent resistance  $R_{eq}$  has a maximum value. However, in this case, the search for the maximum power is required, i.e. the use of extreme control. The proximity of the frequencies at which there are different characteristic modes allow for alignment with the help of the parameters that at the maximum power in the load close to zero. These parameters are: the phase shift between current and voltage of load circuit –  $\varphi$  and the difference currents in inductive and capacitive branches –  $(IL - IC)$ .

In addition, the paper presents the analytical dependence of the parameters of matching for parallel circuit, for autotransformer connection method of load circuit and for the circuit with a capacitive voltage divider.

Thus, each of the following methods transformer less voltage boost has a number of advantages and disadvantages. It is shown that the most ample opportunities have the matching of the power supply and load using transformers. The use of high-frequency transformer allows both raise and lower the output voltage of the source, and the use of modern ferromagnetic materials – amorphous or nanocrystalline steels leads to increased efficiency.

*Key words:* a frequency converter, an inductor, an equivalent active resistance, attenuation, equivalent circuit, factor power, inverter, induction-thyristor complex, induction unit, method of compensation, semiconductor element.

Под тиристорно-индукторным комплексом будем понимать соединение двух основных частей индукционной установки: высокочастотного преобразователя частоты и индуктора для термообработки материалов. Из всего многообразия тиристорно-индукторных комплексов, разрабатываемых НКТЬ «Вихрь», наиболее широкое применение в промышленности нашли тиристорно-индукционные комплексы, преобразователи, частоты которых выполнены на базе последовательных резонансных автономных инверторов со встречно-параллельными диодами [1].

Рассмотрим подробнее одну из электрических схем (рис. 1) и работу таких инверторов. Плечи моста данного инвертора образованы тиристорами VS1...VS4, встречно-параллельно которым подключены диоды VD1...VD4. Одна диагональ моста состоит из коммутирующих: дросселя  $L_{K1}$  и конденса-

тора  $C_{K1}$ , а другая – из защитного дросселя  $L_{31}$ , нагрузки  $Z_{H1}$ , имитирующей индукторный модуль, и фильтрового конденсатора  $C_{\Phi1}$ . Мост подключается к источнику питания  $U_d$  (выпрямителю) через входные дроссели  $L_{d1}$ ,  $L_{d2}$ .

Основные достоинства рассматриваемой схемы инвертора заключаются в постоянстве напряжения на тиристорах при изменении параметров нагрузки в широком диапазоне и значительном времени, предоставляемом тиристорам на восстановление их управляющих свойств.

Инвертор в квазиустановившемся режиме работает следующим образом. Фильтровый конденсатор  $C_{\Phi1}$  нормально заряжен через входные дроссели  $L_{d1}$ ,  $L_{d2}$ , защитный дроссель  $L_{31}$  и нагрузку  $Z_{H1}$  до напряжения  $U_d$  источника питания (выпрямителя). Пусть коммутирующий конденсатор  $C_{K1}$  имеет полярность напряжения, указанную на рис. 1 а.

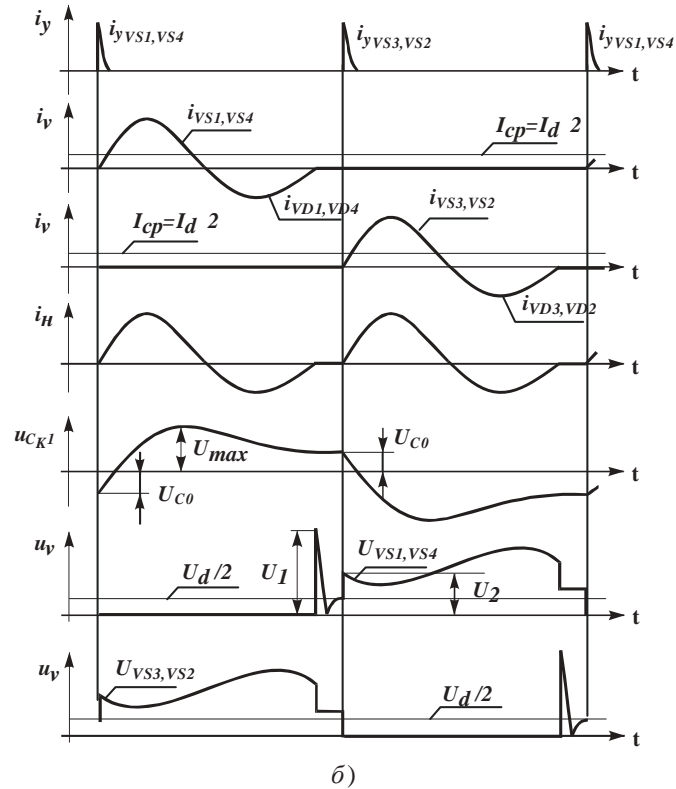
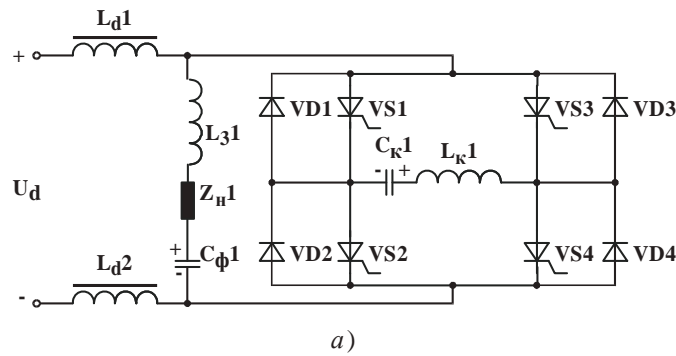


Рис. 1. Мостовой последовательный инвертор со встречно-параллельными диодами и удвоением частоты:

а – схема; б – временные диаграммы, поясняющие принцип действия инвертора ( $i_y$  – импульсы управления тиристорами;  $i_v$  – ток ключей;  $i_n$  – ток нагрузки;  $u_{ck1}$  – напряжение на коммутирующем конденсаторе;  $u_v$  – напряжение на тиристорах)

На рис. 1 б приведены временные диаграммы, поясняющие принцип действия инвертора. При подаче управляющих импульсов  $i_{y\ VS1, VS4}$  на тиристоры VS1, VS4 они включаются, и начинается перезаряд коммутирующего конденсатора  $C_{K1}$  по цепи:  $C_{\phi1}-Z_{H1}-L_{31}-VS_1-C_{K1}-L_{K1}-VS4-C_{\phi1}$ . При этом ток нагрузки течет в направлении, которое условно назовем прямым. Параметры инвертора рассчитаны так, что процесс перезаряда носит колебательный характер. Поэтому, как только напряжение перезаряда коммутирующего конденсатора станет выше напряжения источника питания  $U_d$  (напряжения фильтрового конденсатора  $C_{\phi1}$ ) и ток тиристоров VS1, VS4 пройдет через нуль, они выключаются. Тем самым заканчивается процесс формирования положительной по-

луволены тока нагрузки. После выключения тиристоров VS1, VS4 включаются диоды VD1, VD4, и ток нагрузки начинает протекать в обратном направлении, формируя отрицательную полуволну тока по цепи:  $C_{K1}-VD1-L_{31}-Z_{H1}-C_{\phi1}-VD4-L_{K1}-C_{K1}$ . Как только напряжение на коммутирующем конденсаторе  $C_{K1}$  станет ниже напряжения источника питания  $U_d$  и ток диодов VD1, VD4 пройдет через нуль, они выключаются. В течение промежутка времени, когда ток проводили диоды VD1, VD4 к тиристорам VS1, VS4, было приложено отрицательное напряжение, равное падению напряжения. Далее подаются управляющие импульсы  $i_{y\ VS3, VS2}$  на тиристоры VS3, VS2, которые, включаясь, создают цепь перезаряда коммутирующего конденсатора  $C_{K1}$ :  $C_{\phi1}-Z_{H1}-L_{31}-VS3-L_{K1}-C_{K1}-VS2-C_{\phi1}$ , формируя

положительную полуволну тока нагрузки. После выключения тиристоры VS3, VS2 включаются диоды VD3, VD2, формируя отрицательную полуволну тока нагрузки по цепи:  $C_{к1}-L_{к1}-VD3-L_{з1}-Z_{н1}-C_{ф1}-VD2-C_{к1}$ .

Таким образом, в течение одного цикла работы всех полупроводниковых приборов получаем в нагрузке два полных периода синусоидального тока (напряжения). Поэтому такие инверторы и называют инверторами с удвоением частоты.

При эксплуатации таких комплексов возникает вопрос о необходимости согласования выходных электромагнитных параметров инвертора с параметрами нагрузочного колебательного контура (нагрузки). Это связано с тем, что выходное напряжение инвертора нестандартно и при питании преобразователя от силовой трехфазной сети 3~50 Гц, 380 В составляет 260...300 В [1].

При этом следует учитывать, что нагрузочный контур инвертора, предназначенный для термообработки металлов, имеет активно-индуктивный характер и представляет индукторно-конденсаторный модуль. Поэтому необходимо совместное рассмотрение согласующего и компенсирующего элементов.

Уменьшение эквивалентного активного сопротивления нагрузочного контура вызывает затягивание процесса нагрева и плавки. Увеличение этого сопротивления приводит к росту затухания колебательного контура инвертора,  $d$ :

$$d = \frac{R_H}{\sqrt{L_0 / C_K}},$$

где  $R_H$  – активное сопротивление нагрузки;  $L_0 = L_3 + L_K$  – полная индуктивность колебательного контура инвертора;  $L_3$  – индуктивность защитного дросселя;  $L_K$  – индуктивность коммутирующего дросселя;  $C_K$  – емкость коммутирующего конденсатора.

Для получения высокого коэффициента мощности, при котором токи, протекающие через полупроводниковые элементы инвертора, не будут превышать допустимой величины, могут применяться последовательный, параллельный или последовательно-параллельный способы компенсации коэффициента мощности нагрузочного колебательного контура [2, 3].

Выбор полупроводниковых элементов следует производить, как в случае активной нагрузки, однако с учетом некоторого увеличения максимального значения тока на величину амплитуды высокочастотной составляющей, которая приближенно может быть определена из соотношения

$$I_m = \sqrt{2} I_H \frac{Z_H}{\omega L_d},$$

где  $I_H$ ,  $Z_H$  – ток и сопротивление нагрузочного контура.

Применение того или иного способа компенсации реактивной мощности нагрузочного колебательного контура определяется, прежде всего, номинальными напряжениями высокочастотного оборудования, серийно выпускаемого промышленностью: индукторы, конденсаторы ЭСВ, ЭСВК, ЭЭВК.

Возможные виды емкостной компенсации комплекса приведены на рис. 2 а–в.

Поскольку при параллельной компенсации напряжение на индукторе и компенсирующей батарее конденсаторов равно выходному напряжению инвертора, то применение параллельного способа компенсации в чистом виде (рис. 2 а) приведет к неоправданно завышенной величине емкости компенсирующей батареи конденсаторов, что значительно увеличивает массогабаритные показатели комплекса и экономически нецелесообразно. Кроме того, индукторы плавильных печей и индукторы для нагрева заготовок из-за низкого напряжения получают с малым числом витков и чрезмерно большим шагом намотки, что приводит к значительному усложнению конструкции, особенно при больших мощностях.

Применение последовательной компенсации возможно лишь при весьма низких значениях выходного напряжения инвертора, равного активной составляющей напряжения на индукторе. Поэтому для согласования выходного напряжения инвертора с напряжением на зажимах индуктора применяется ряд способов, к которым относятся:

1. Применение высокочастотных согласующих трансформаторов и автотрансформаторов [4].
2. Применение специальных резонансных инверторов, позволяющих получать напряжение на нагрузке как ниже, так и выше выпрямленного напряжения при постоянной мощности нагрузки [5].
3. Применение смешанных способов компенсации, совмещающих последовательные и параллельные резонансные цепи. Схемы подобных контуров приведены на рис. 2 б, в.

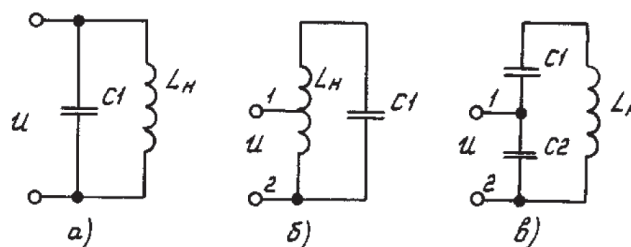


Рис. 2. Система «индуктор – металл» с различными видами емкостной компенсации:

- а – простой параллельный контур с последовательной схемой замещения индуктора; б – автотрансформаторный колебательный контур; в – последовательно-параллельный колебательный контур

Рассмотрим особенности каждого из способов:

1. Наиболее широкими возможностями обладает согласование параметров источника питания и нагрузки с помощью трансформаторов. Применение высокочастотных трансформаторов позволяет как повышать, так и понижать выходное напряжение источника, а использование современных ферромагнитных материалов – аморфных или нанокристаллических сталей приводит к повышению их эффективности. Эти материалы отличаются высокой индукцией насыщения и малыми потерями при повышенных частотах [4]. Одним из способов использования для компенсации реактивной мощности резонанса напряжений является также применение согласующего трансформатора.

2. Согласно [5] бестрансформаторное повышение напряжения нагрузки достигается в симметричном резонансном инверторе некоторым уменьшением частоты управления по сравнению с резонансной частотой нагрузки. При этом повышение напряжения индуктора объясняется тем, что чисто активное сопротивление  $R_3$  заменяется последовательно соединенными  $R_3$  и  $X_3$ , причем  $X_3$  – это сопротивление эквивалентной индуктивности индуктора. К достоинствам такого способа относится возможность получения выходного напряжения, величина которого может быть как ниже, так и выше выпрямленного. Однако коэффициент мощности нагрузочной цепи понижается, что является недостатком данного способа.

3. При смешанном способе компенсации для согласования параметров преобразователя с нагрузкой используют либо автотрансформаторную схему подключения (рис. 2 б), либо схему с емкостным делителем напряжения (рис. 2 в).

При автотрансформаторной схеме включения компенсирующая батарея конденсаторов подключается параллельно всему индуктору, а к тиристорному преобразователю подключается только часть его витков.

При использовании схемы с емкостным делителем напряжения выход тиристорного преобразователя подключается к выходным зажимам делителя, а индуктор – к входным.

Согласно рис. 2 нагрузку тиристорного преобразователя со смешанным способом компенсации можно представить в виде обобщенного колебательного контура, приведенного на рис. 3.

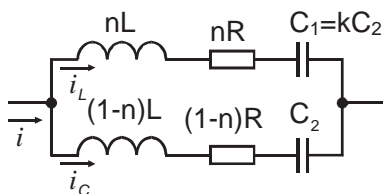


Рис. 3. Обобщенный колебательный контур нагрузки

При параллельной компенсации (рис. 2 а)  $n=1, k=\infty$ ; при автотрансформаторном включении (рис. 2 б)  $n=var, k=\infty$ ; при использовании схемы с емкостным делителем напряжения (рис. 2 в)  $n=1, k=var$ .

Во всех рассматриваемых случаях частоты, при которых имеет место максимум мощности ( $\omega_p, R_{эKB, макс}$ ), одинаковы, однако сами мощности, фазовый резонанс ( $\omega_\phi, \phi=0$ ), максимум токов в ветвях ( $I_L, I_C$ ), а также равенство токов различны [4, 6].

Для получения максимальной мощности в нагрузке необходимо иметь такую частоту, при которой эквивалентное активное сопротивление  $R_{эKB}$  имеет максимальное значение. Однако в этом случае необходим поиск максимума мощности, то есть применение экстремального регулирования. Близость частот, при которых имеют место различные характерные режимы, позволяет осуществлять согласование с помощью тех параметров, которые при максимуме мощности в нагрузке близки к нулю. Такими параметрами служат: сдвиг фаз между током и напряжением нагрузочного контура –  $\phi$  и разность токов в индуктивной и емкостной ветвях – ( $I_L - I_C$ ).

Принимая за базовые значения: частоту  $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_{эKB} C_{эKB}}$ , сопротивление  $R_0 = R$ , напряжение  $u_0 = I_0 R$ , ток или мощность  $P_0 = I_0 = I_0^2 R$ , получим зависимости [6, 7]:

$$\begin{aligned} P_* &= R_{эKB,*} = f_1(\omega_*), \\ \phi &= f_2(\omega_*), \\ I_{L*} - I_{C*} &= f_3(\omega_*), \\ U_H &= f(\omega_*). \end{aligned}$$

Для параллельного контура (рис. 2 а) эти величины равны:

$$\begin{aligned} P_* &= R_{эKB,*} = \frac{1}{\omega_*^2 / Q^2 + (1 - \omega_*^2)^2}; \\ \omega_{P*}^2 &= 1 - 1/2Q^2; \\ \phi &= \arctg Q \omega_* (1 - \omega_*^2 - 1/Q^2); \\ \omega_{\phi*}^2 &= 1 - 1/Q^2; \\ I_{L*} - I_{C*} &= \frac{1 - \omega_* \sqrt{\omega_*^2 + 1/Q^2}}{\sqrt{\omega_*^2 / Q^2 + (1 - \omega_*^2)^2}}; \\ \omega_{LC*}^2 &= -1/2Q^2 + \sqrt{1 + 1/4Q^4}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для автотрансформаторного способа подключения нагрузочного контура (рис. 2 б):

$$P_* = R_{эKB,*} = n(1-n) + \frac{n^2}{\omega_*^2 / Q + (1 - \omega_*^2)^2};$$

$$\begin{aligned}
\omega_{P*}^2 &= 1 - 1/2Q^2; \\
\phi &= \arctg Q \omega_* \frac{\omega^4 (1-n) + \omega_*^2 \left[ (1-n)/Q^2 + n-2 \right] + 1 - n/Q^2}{\omega^4 (1-n) + \omega_*^2 (1/Q^2 - 2)(1-n) + 1}; \\
\omega_{\phi*}^2 &= -0,5 \left( 1/Q + \frac{n-2}{1-n} \right) \pm \sqrt{0,25 \left( 1/Q + \frac{n-2}{1-n} \right)^2 - \frac{1}{1-n} + \frac{n}{(1-n)Q^2}}; \\
I_{L*} - I_{C*} &= \frac{\sqrt{\left[ 1 - (1-n)\omega_*^2 \right]^2 + (1-n^2)\omega_*^2/Q^2}}{\sqrt{\omega_*^2/Q^2 + (1-\omega_*^2)^2}} - \frac{n\omega_* \sqrt{\omega_*^2 + 1/Q^2}}{\sqrt{\omega_*^2/Q^2 + (1-\omega_*^2)^2}}; \\
\omega_{LC*}^2 &= - \left[ \frac{1-n}{2n-1} + \frac{n-0,5}{Q^2(2n-1)} \right] \pm \sqrt{\left[ \frac{1-n}{2n-1} + \frac{n-0,5}{Q^2(n-1)} \right]^2 + \frac{1}{2n-1}}; \\
U_{нагр} &= \frac{1}{\sqrt{(1-n)^2 \omega_*^2/Q^2 + \left[ 1 - (1-n)\omega_*^2 \right]^2}}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Для схемы с емкостным делителем напряжения (рис. 2 в):

$$\begin{aligned}
P_* &= R_{ЭКВ,*} = \left( \frac{k}{k+1} \right)^2 \frac{1}{\omega_*^2/Q + (1-\omega_*^2)^2}; \\
\omega_{P*}^2 &= 1 - 1/2Q^2; \\
\phi &= \arctg \frac{k+1}{k} Q \omega_* \left\{ (1-\omega_*^2) - 1/Q^2 - (1-\omega_*^2) / \left[ \omega_*^2 (k+1) \right] \right\}; \\
\omega_{\phi*}^2 &= 0,5 \left( \frac{k+2}{k+1} - 1/Q^2 \right) \pm \sqrt{0,25 \left( \frac{k+2}{k+1} - 1/Q^2 \right)^2 - \frac{1}{(k+1)Q^2}}; \\
I_{L*} - I_{C*} &= \frac{k}{k+1} \frac{1}{\sqrt{\omega_*^2/Q^2 + (1-\omega_*^2)^2}} - \\
&\quad - \frac{1}{k+1} \frac{\sqrt{\left[ 1 - (k+1)\omega_*^2 \right]^2 + (k+1)^2 \omega_*^2/Q^2}}{\sqrt{\omega_*^2/Q^2 + (1-\omega_*^2)^2}}; \\
\omega_{LC*}^2 &= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Q^2} - \frac{2}{k+1} \right] \pm \sqrt{\left[ \frac{k}{k+1} \right]^2 - \frac{1}{(k+1)Q^2} + \frac{1}{4Q^4}}; \\
U_{H*} &= \frac{U_H}{U} = \frac{(K+1) \sqrt{\omega_*^2/Q^2 + \omega_*^2}}{\sqrt{(K+1)^2 \omega_*^2/Q^2 + \left[ 1 - (K+1)\omega_*^2 \right]}}.
\end{aligned} \tag{3}$$

Согласно приведенным выражениям (1)...(3) для контура (рис. 2 а), начиная с  $Q=4$ , частоты  $\omega_{p^*}$ ,  $\omega_{\phi^*}$ ,  $\omega_{LC}$  практически одинаковы, то есть поддержание  $\omega = \omega_{\phi}$  или  $\omega = \omega_{LC}$  эквивалентно  $\omega = \omega_p$  – условию максимума мощности.

Для контуров (рис. 2 б, рис. 2 в) связь между частотами  $\omega_p$ ,  $\omega_{\phi}$ ,  $\omega_{LC}$  более сложная. Однако при  $Q > Q_{min}$ ,  $n > 0,5$  и  $k > 1$  всегда имеются частоты  $\omega_{\phi} \approx \omega_p$ ,  $\omega_{LC} \approx \omega_p$ . Следовательно, для контуров с высокой добротностью и практически используемых соотношениях  $n$  и  $k$  можно использовать для согласования параметров тиристорного преобразователя и нагрузки частоты  $\omega_{\phi}$  или  $\omega_{LC}$ .

Из (2) следует, что при достаточно высокой добротности  $\omega_* \rightarrow 1$ , а  $U_{нагр} \approx 1/n$  и растет с уменьшением  $n$ . Недостатком увеличения напряжения при автотрансформаторном включении индуктора является то, что наблюдается «провал» температуры в зоне соединения секций индуктора. Это объясняется тем, что в одной из секций ток имеет индуктивный характер, а в другой – емкостный, то есть токи направлены приблизительно противоположно.

Согласно (3) при достаточно большом значении  $Q$  напряжение нагрузки можно определить как

$$U_H \approx \frac{K+1}{K},$$

однако, чем больше  $K$ , тем меньше увеличение напряжения. При этом резонансная частота определяется величиной  $C_3$ :

$$C_3 = C_1 C_2 / (C_1 + C_2).$$

Следовательно, каждый из предлагаемых способов бестрансформаторного повышения напряжения обладает рядом достоинств и недостатков.

Таким образом, выбор структуры тиристорно-индукторного комплекса с согласованными напряжениями индуктора и нагрузки определяет способ компенсации реактивной мощности индуктора. Согласующий высокочастотный трансформатор позволяет выбрать любой способ компенсации для получения наиболее рациональной схемы системы «источник питания – нагрузка». Остальные способы выбираются в зависимости от конструкции индуктора и разницы напряжений индуктора и нагрузки. Например, при автотрансформаторном включении нагрузки необходимо иметь отпайку в индукторе. А при последовательном включении конденсаторов их эквивалентная емкость уменьшается.

#### Список литературы

1. Кацнельсон С.М. Анализ электромагнитных процессов в мостовом инверторе со встречно-параллельными диодами и удвоением частоты [Текст] / С.М. Кацнельсон // Тиристорные преобразователи

частоты для индукционного нагрева металлов: сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УАИ, 1971. – Вып. 22. – С. 6–37.

2. Белкин А.К. Элементы индукционных установок [Текст] / А.К. Белкин, Л.И. Гутин, И.Н. Таназлы, А.А. Шуляк. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 140 с.

3. Гутин Л.И. Исследование автотрансформаторного способа подключения нагрузки к тиристорному инвертору [Текст] / Л.И. Гутин // Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов: сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УАИ, 1972. – Вып. 39. – С. 80–91.

4. Рогинская Л.Э. Выбор параметров высокочастотных согласующих трансформаторов с магнитопроводом из аморфной электротехнической стали [Текст] / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов // Межвузовский научный сборник «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы». – Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 42–47.

5. Рогинская Л.Э. Выбор структуры и параметрический синтез симметричного резонансного инвертора [Текст] / Л.Э. Рогинская, А.В. Иванов, М.М. Мухоменов, А.М. Уржумсков // Электротехника. – 1998. – № 7. – С. 1–5.

6. Казанцев В.Г. Анализ способов автоподстройки частоты автономных инверторов, нагруженных на колебательный контур [Текст] / В.Г. Казанцев, Л.Э. Рогинская // Электротехника. – 1994. – № 10. – С. 17–20.

7. Рогинская Л.Э. Выбор способов автоподстройки частоты в резонансных преобразователях частоты для электротехнологии [Текст] / Л.Э. Рогинская, В.Г. Казанцев, Ш.М. Мухамадиев // Межвузовский научный сборник «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы». – Уфа: УГАТУ, 2001. – С. 95–105.

#### References

1. Kacnel'son S.M. Analiz jelectromagnitnyh processov v mostovom invertore so vstrechno-parallelnymi diodami i udvoeniem chastoty [Tekst] / S.M. Kacnel'son // Tiristornye preobrazovateli chastoty dlja indukcionnogo nagreva metallov: sb. nauch. tr. – Ufa: Izd-vo UAI, 1971. – Vyp. 22. – S. 6–37.

2. Belkin A.K. Jelementy indukcionnyh ustanovok [Tekst] / A.K. Belkin, L.I. Gutin, I.N. Tanazly, A.A. Shuljak. – M.: Jenergoatomizdat, 2007. – 140 s.

3. Gutin L.I. Issledovanie avtotransformatornogo sposoba podkljuchenija nagruzki k tiristorному invertoru [Tekst] / L.I. Gutin // Tiristornye preobrazovateli chastoty dlja indukcionnogo nagreva metallov: sb. nauch. tr. – Ufa: Izd-vo UAI, 1972. – Vyp. 39. – S. 80–91.

4. Roginskaja L.Je. Vybor parametrov vysokochastotnyh soglasujushhih transformatorov s magnitoprovodom iz amorfnoj jelectrotehničeskoj stali [Tekst] /

L.Je. Roginskaja, A.S. Gorbunov // Mezhvuzovskij nauchnyj sbornik «Jelektromehanika, jelektrotehnicheskie komplekсы i sistemy». – Ufa: UGATU, 2010. – S. 42–47.

5. *Roginskaja L.Je.* Vybor struktury i parametricheskij sintez simmetrichnogo rezonansnogo invertora [Tekst] / L.Je. Roginskaja, A.V. Ivanov, M.M. Mul'menko, A.M. Urzhumskov // Jelektrotehnika. – 1998. – № 7. – S. 1–5.

6. *Kazancev V.G.* Analiz sposobov avtopodstrojki chastoty avtonomnyh invertorov, nagružen-

nyh na kolebatel'nyj kontur [Tekst] / V.G. Kazancev, L.Je. Roginskaja // Jelektrotehnika. – 1994. – № 10. – S. 17–20.

7. *Roginskaja L.Je.* Vybor sposobov avtopodstrojki chastoty v rezonansnyh preobrazovateljah chastoty dlja jelektrotehnologii [Tekst] / L.Je. Roginskaja, V.G. Kazancev, Sh.M. Muhamadiev // Mezhvuzovskij nauchnyj sbornik «Jelektromehanika, jelektrotehnicheskie komplekсы i sistemy». – Ufa: UGATU, 2001. – S. 95–105.



**Карабельская И.В.**

**Karabel'skaya I.V.**

аспирант кафедры «Физика»,

доцент кафедры «Информатика и ИКТ»

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный

университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 537.3-047.37

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ КОРРОЗИИ

В статье изложены методы решения систем параллельных трубопроводов в неоднородной среде: методы расчета электрических полей при электрохимической защите трубопроводов от коррозии, рассмотрены некоторые задачи расчета параметров электрохимической защиты трубопроводов от коррозии. Подобные задачи возникают в различных проблемах прикладной электрохимии. Для каждой задачи, рассмотренной в примерах, сформулирована математическая модель самосогласованной краевой задачи, описывающей электрические поля с цилиндрическими неоднородностями, электродами и изоляторами; вычислительные алгоритмы понижения размерности задачи, иллюстрирующие возможности применения дифференциально-разностного метода по переменной  $z$ , применения дифференциально-разностного метода с аппроксимацией производных по  $u$  для понижения размерности данной краевой задачи, преобразующейся в  $n$  двумерных краевых задач.

Одной из проблем, выдвигаемых современным техническим прогрессом в области трубопроводного транспорта, является повышение его надежности. Требование достижения высокой надежности нередко противоречит другим необходимым характеристикам, таким как сокращение металлоемкости сооружений, низкая стоимость и некоторые другие. Надежность магистральных нефтегазопроводов во многом определяется эффективностью комплексной защиты, которая включает в себя защиту изоляционными покрытиями и катодной поляризацией (катодной и протекторной защитой).

В процессе эксплуатации со временем изоляционные покрытия частично разрушаются под действием воды, перемещений грунта или частично механически повреждаются из-за неоднородного грунта (например, о камни), и катодная защита становится главной в обеспечении надежной работы трубопроводов. Для обеспечения надежной электрохимической защиты трубопроводов от коррозии необходимы знания параметров, обеспечивающих распределение защитной плотности тока и потенциала вдоль трубопроводов. Такие параметры можно рассчитать методами математического моделирования и вычислительного эксперимента. Для решения задач расчета электрических полей разрабатывались общие и специальные методы математической физики [8, 13–14, 17–19].



В этих работах имеется достаточно полный обзор рассмотренных задач расчета параметров электрохимической защиты металлических сооружений и трубопроводов в частности.

Здесь же будет показано изложение методов решения систем параллельных трубопроводов в неоднородной среде. Изложенные катоды легко переносятся на расчеты распределения тока в системах параллельных цилиндров с произвольной гладкой направляющей. Такие задачи возникают при оптимизации гальванообработки металлов, технологии гальванопластики и в других проблемах прикладной электрохимии. Рассмотрим некоторые задачи расчета параметров электрохимической защиты трубопроводов от коррозии.

В данной работе предлагаются разработанные, апробированные на ЭВМ, комбинированные алгоритмы численного анализа электрических полей, описываемых трехмерными нелинейными самосогласованными краевыми задачами в неоднородной среде с цилиндрическими неоднородными включениями, изоляторами и электродами. Этот класс моделей охватывает достаточно широкий спектр теоретических задач электрических и тепловых полей, имеющих важные практические приложения [1–7, 9–10, 15–16].

*Ключевые слова:* математическая модель, самосогласованная краевая задача, исследования электрических полей постоянного тока, системы со сложными и геометрическими параметрами, дифференциально-разностный метод по переменной  $z$ , преобразование задачи в  $n$  двумерных краевых задач, понижение размерности задачи.

## EXAMPLES OF CALCULATION OF ELECTRIC FIELDS AT ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF PIPELINES AGAINST CORROSION

The article describes methods for solving systems of parallel pipes in a heterogeneous environment: methods for calculating electric fields at electrochemical protection of pipelines against corrosion, are considered some of the tasks of calculating the parameters of electrochemical corrosion protection of pipelines. Similar problems arise in various problems of applied electrochemistry. For each problem discussed in the examples formulated a mathematical model of a self-consistent boundary value problem describing the electric field with cylindrical inhomogeneities electrodes and insulators; computational algorithms dimension reduction problem, illustrating the possibility of applying differential-difference method in the variable  $z$ , use of differential-difference method with approximation of derivatives of  $y$  to reduce the dimension of the boundary value problem is converted into  $n$ -dimensional boundary value problems.

One of the problems posed by modern technological developments in the field of pipeline transport, is to increase its reliability. The requirement to achieve high reliability is often in conflict with other required characteristics, such as the reduction of metal constructions, low cost, and others. The reliability of oil and gas pipelines is largely determined by the effectiveness of comprehensive protection that includes protection insulating coatings and cathodic polarization (cathode and cathodic protection).

In operation, with time insulating cover partially destroyed by water, soil movement or partly mechanically damaged due to the inhomogeneous soil (such as stones), and cathodic protection becomes central to ensuring the safe operation of pipelines. To ensure reliable electrochemical corrosion protection of pipelines requires knowledge of parameters, ensuring distribution of protective current density and potential along the pipeline. These parameters can be calculated by mathematical modeling and computational experiment. To solve the problems of calculation of the electric fields developed general and special methods of mathematical physics [8, 13–14, 17–19].

In these works there is a fairly comprehensive overview of the problems of the considered parameters of electrochemical protection of steel structures and pipelines in particular.

There will also be shown the presentation of methods for solving systems of parallel pipelines in a heterogeneous environment. The above cathodes are easily transferred to the calculation of the current distribution systems of parallel cylinders with arbitrary smooth directing. Such problems arise when optimizing metal electroplating, electroforming technology and other developments in applied electrochemistry. Consider some of the problem of calculating the parameters of electrochemical corrosion protection of pipelines.

In this paper we propose to develop, test on a computer, numerical analysis algorithms combined electric fields described by the three-dimensional self-consistent nonlinear boundary value problems in heterogeneous environments with cylindrical heterogeneous inclusions, insulators and electrodes. This class of models covers a fairly wide theoretical problems of electric and thermal fields with important practical applications [1–7, 9–10, 15–16].

*Key words:* mathematical model, self-consistent boundary problem, the study of the electric fields of direct current, complex system and geometrical parameters, differential-difference method in the variable  $z$ , the conversion problem in  $n$ -dimensional boundary value problems, reducing the dimension of the problem.

*Пример 1.* Защита системы трубопроводов, расположенных в тоннеле.

Трубопроводы защищены катодными станциями, расположенными на концах тоннеля. В качестве

анодов применяются анодные заземлители, расположенные внутри и вне тоннеля.

Электрическое поле находится решением следующей краевой задачи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} &= -\frac{1}{\sigma_1} \sum_j I_j \delta(x-x_j) \delta(y-y_j) \delta(z-z_j), \quad (x, y, z) \in \Omega_1; \\ \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} &= 0, \quad (x, y, z) \in \Omega_2; \\ \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} &= -\frac{1}{\sigma_3} \sum_q I_q \delta(x-x_q) \delta(y-y_q) \delta(z-z_q), \quad (x, y, z) \in \Omega_2; \\ \left. \frac{\partial u_i}{\partial z} \right|_{z=0} &= 0, \quad \left. \frac{\partial u_i}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad i = 1, 2, 3; \\ u_1 + c_p(x, y) \sigma_1 \left. \frac{\partial u_1}{\partial n} \right|_{\Gamma_p} &= U_{Mp}(z), \quad p = 1, 2, \dots, L, \quad 0 < z < H; \\ u_3 &\rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty; \\ \left. \frac{\partial u_i}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0, \quad i = 1, 2, 3; \\ u_1 - u_2 \Big|_{\sqrt{x^2 + y^2} = R_1} &= 0, \quad \sigma_1 \left. \frac{\partial u_1}{\partial n} \right|_{\sqrt{x^2 + y^2} = R_1} + \sigma_2 \left. \frac{\partial u_2}{\partial n} \right|_{\sqrt{x^2 + y^2} = R_1} = 0, \\ u_2 - u_3 \Big|_{\sqrt{x^2 + y^2} = R_2} &= 0, \quad \sigma_2 \left. \frac{\partial u_2}{\partial n} \right|_{\sqrt{x^2 + y^2} = R_2} + \sigma_3 \left. \frac{\partial u_3}{\partial n} \right|_{\sqrt{x^2 + y^2} = R_2} = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\Omega_1$  ( $0 < z < H, \sqrt{x^2 + y^2} < R_1$ ) – область полутоннеля;  
 $\Omega_2$  ( $0 < z < H, R_1 < \sqrt{x^2 + y^2} < R_2$ ) – область оболочки тоннеля;  
 $\Omega_3$  ( $0 < z < H, \sqrt{x^2 + y^2} > R_2$ ) – внешняя область;  
 $(x_j, y_j, z_j), (x_q, y_q, z_q)$  – координаты точечных источников защитного тока, расположенных соответственно

в тоннеле и вне тоннеля;  $\sigma_i$  – удельные электрические проводимости областей  $\Omega_i$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $R_1$  и  $R_2$  – внутренний и внешний радиусы тоннеля;  $\Gamma_p$  – контур  $p$ -го трубопровода;  $H$  – длина тоннеля.

Применением дифференциально-разностного метода по переменной  $z$  задача (1) преобразуется в  $n$  двумерных краевых задач:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_{1s}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_{1s}}{\partial y^2} - \lambda^2_s U_{1s} &= -\frac{1}{\sigma_1} \sum_j I'_j \delta(x-x_j) \delta(y-y_j); \\ \frac{\partial^2 U_{2s}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_{2s}}{\partial y^2} - \lambda^2_s U_{2s} &= 0; \\ \frac{\partial^2 U_{3s}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_{3s}}{\partial y^2} - \lambda^2_s U_{3s} &= -\frac{1}{\sigma_3} \sum_q I''_q \delta(x-x_q) \delta(y-y_q); \\ U_{1s} + c_p(x, y) \sigma_1 \left. \frac{\partial U_{1s}}{\partial n} \right|_{\Gamma_p} &= U_{Mps}, \quad p = 1, 2, \dots, L; \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 & u_{3s} \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty \\
 & \left. \frac{\partial U_{is}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad i = 1, 2, 3; \\
 & U_{1s} - U_{2s} \Big|_{\sqrt{x^2+y^2}=R_1} = 0, \quad \sigma_1 \frac{\partial U_{1s}}{\partial n} + \sigma_2 \frac{\partial U_{2s}}{\partial n} \Big|_{\sqrt{x^2+y^2}=R_1} = 0; \\
 & U_{2s} - U_{3s} \Big|_{\sqrt{x^2+y^2}=R_2} = 0, \quad \sigma_2 \frac{\partial U_{2s}}{\partial n} + \sigma_3 \frac{\partial U_{3s}}{\partial n} \Big|_{\sqrt{x^2+y^2}=R_2} = 0; \\
 & s = 1, 2, 3, \dots, n.
 \end{aligned}$$

Решения задач (2) сведены к решению системы интегральных уравнений относительно плотности тока на контурах  $\Gamma_p$ . Краевые условия на  $x=0$ , на  $\sqrt{x^2 + y^2} = R_1$ ,  $\sqrt{x^2 + y^2} = R_2$   $\frac{1}{r} = R_2$  и на беско-

нечности учтены функциями Грина (ядрами интегральных преобразований, которые получены решением граничных задач):

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial^2 G_{1s}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_{1s}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 G_{1s}}{\partial \varphi^2} - \lambda^2_s G_{1s} = -\frac{1}{r} \delta(r - \rho) \delta(\varphi - \psi); \\
 & \frac{\partial^2 G_{is}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G_{is}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 G_{is}}{\partial \varphi^2} - \lambda^2_s G_{is} = 0; \quad i = 2, 3; \\
 & G_{is}(0, \varphi) < \infty, \quad \left. \frac{\partial G_{is}}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial G_{is}}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=\pi}, \quad i = 1, 2, 3; \\
 & G_{1s} - G_{2s} \Big|_{r=R_1} = 0, \quad \sigma_1 \frac{\partial G_{1s}}{\partial r} - \sigma_2 \frac{\partial G_{2s}}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = 0; \\
 & G_{2s} - G_{3s} \Big|_{r=R_2} = 0, \quad \sigma_2 \frac{\partial G_{2s}}{\partial r} - \sigma_3 \frac{\partial G_{3s}}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = 0; \\
 & G_{3s} \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty; \\
 & s = 1, 2, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Решение задач (3) получено в аналитическом виде методом конечных интегральных преобразований и представлено косинус – рядом Фурье.

*Примечание.* Аналогично рассматривается и задача расчета распределения электрического поля точечных и цилиндрических электродов с произвольной направляющей, расположенных в зоне  $\Omega_1$  и  $\Omega_3$  кругового цилиндра радиуса  $R$ , высоты  $H$  с диафрагмой вида зоны  $\Omega_2$ . Подобные задачи возникают в различных проблемах прикладной электрохимии.

На границе  $R$  могут быть условия вида

$$U_3 + C_0 \sigma_3 \frac{\partial U_3}{\partial n} \Big|_{\sqrt{x^2+y^2} = R} = 0,$$

где  $C_0$  – некоторая константа или функция координат  $x$  и  $y$ .

*Пример 2.* Катодная защита системы трубопроводов в вертикально-неоднородной среде. В этом случае электрическое поле находится решением краевой задачи (при симметрическом расположении анодов):

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} = -\frac{1}{\sigma} \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad i = 1, 2, \dots, N;$$

$$\left. \frac{\partial u_i}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, u_i \rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty; \quad (4)$$

$$u_N \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow \infty;$$

$$\left. \frac{\partial u_i}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial u_i}{\partial y} \right|_{y=H} = 0, i = 1, 2, \dots, N;$$

$$[u]_{z=a_q} = 0, \left[ \sigma \frac{\partial u}{\partial n} \right]_{z=a_q} = 0, q = 1, 2, \dots, N-1.$$

Здесь  $\sigma$  принимает одно значение из  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ , которое соответствует среде, где расположен анодный заземлитель.

Для простоты будем считать, что система трубопроводов находится в одном  $k$ -м слое, тогда граничные условия на трубопроводах принимают вид:

$$u_k + C_P(x, z) \sigma_k \left. \frac{\partial u_k}{\partial n} \right|_{\Gamma_p} = u_{Mp}(y), p = 1, 2, \dots, L; 0 < z < H. \quad (5)$$

Дифференциально-разностным методом, с аппроксимацией производных по  $y$ , задача (4), (5) расщепляется на  $n$  двумерных краевых задач вида:

$$\frac{\partial^2 U_{is}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_{is}}{\partial z^2} - \lambda^2 {}_s U_{is} = -\frac{I'}{\sigma} (x - x_0) \delta(z - z_0);$$

$$\left. \frac{\partial U_{1s}}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, U_{is} \rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty, U_{Ns} \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow \infty;$$

$$[U_s]_{z=a_q} = 0, \left[ \sigma \frac{\partial U_s}{\partial n} \right]_{z=a_q} = 0, q = 1, 2, \dots, N-1;$$

$$U_{ks} + c_p(x, y) \sigma_k \left. \frac{\partial U_{ks}}{\partial n} \right|_{\Gamma_p} = U_{Mps}, p = 1, 2, \dots, L, s = 1, 2, \dots, n.$$

Для данного случая функция Грина строится решением краевой задачи:

$$\frac{\partial^2 G_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G_i}{\partial z^2} - \lambda^2 {}_s G_i = -\delta(x - \alpha) \delta(y - \beta);$$

$$\left. \frac{\partial G_1}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, G_i \rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty, G_N \rightarrow 0 \text{ при } z \rightarrow \infty;$$

$$[G]_{z=a_q} = 0, \left[ \sigma \frac{\partial G}{\partial n} \right]_{z=a_q} = 0, q = 1, 2, \dots, N-1,$$

где  $\alpha, \beta$  – находятся в  $k$ -м слое. Решение этой задачи находится аналогично.

Аналогично рассматривается задача при расположении трубопроводов и нескольких анодных заземлителей в нескольких средах.

#### Список литературы

1. Карбельская И.В. Исследования электрических полей постоянного тока в системах со сложны-

ми геометрическими параметрами [Текст] / И.В. Карбельская // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 45–51.

2. Долوماتов М.Ю. Проектирование ИС по свойствам и электронным характеристикам сложных многокомпонентных органических систем [Текст] / М.Ю. Долوماتов, И.В. Карбельская, Э.А. Ковалева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 45–51.

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

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

5. *Болотнов А.М.* Методы расчета трехмерных краевых задач для эллиптических уравнений в многосвязных областях с цилиндрическими границами [Текст] / А.М. Болотнов, В.Т. Иванов, Г.Я. Кильдибекова, И.В. Карабельская. – Деп. в ВИНТИ 4.12.86. № 8870. – В 86. – Уфа: БГУ, 1986. – 49 с.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

16. *Иванов В.Т.* Методы расчета трехмерных электрических полей в электролитах [Текст] / В.Т. Иванов // Краевые задачи математической физики и их приложения. – Уфа: БФАН СССР, 1976. – С. 18–53.

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

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

#### References

1. *Karabel'skaja I.V.* Issledovanija jelektricheskikh polej postojannogo toka v sistemah so slozhnymi i geometricheskimi parametrami [Tekst] / I.V. Karabel'skaja // Jelektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 45–51.

2. *Dolomatov M.Ju.* Proektirovanie IS po svojstvam i jelektronnym harakteristikam slozhnyh mnogokomponentnyh organicheskikh sistem [Tekst] / M.Ju. Dolomatov, I.V. Karabel'skaja, Je.A. Kovaleva // Jelektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 45–51.

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

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

5. *Bolotnov A.M.* Metody rascheta trehmernyh kraevykh zadach dlja jellipticheskikh uravnenij v mnogosvjaznyh oblastjah s cilindricheskimi granicami [Tekst] / A.M. Bolotnov, V.T. Ivanov, G.Ja. Kil'dibekova, I.V. Karabel'skaja. – Dep. v VINITI 4.12.86. № 8870. – В 86. – Уфа: БГУ, 1986. – 49 с.

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

7. *Ivanov V.T.* Optimizacija jelektricheskikh polej, kontrol' i avtomatizacija gal'vanoobrabotki [Tekst] / V.T. Ivanov, V.G. Gusev, A.N. Fokin. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 211 s.
8. *Andreev I.N.* Korrozija metallov i ih zashhita [Tekst] / I.N. Andreev. – Kazan': Tatarskoe kn. izd-vo, 1979. – 120 s.
9. *Zaborovskij A.I.* Jeletktorazvedka [Tekst] / A.I. Zaborovskij. – M.: Gostehnefizdat, 1948.
10. *Dahnov V.N.* Jelektricheskije i magnitnye metody issledovanija skvazhin [Tekst] / V.N. Dahnov. – M.: Nedra, 1981. – 334 s.
11. *Kozyrin A.K.* Jelektricheskaja korreljacija razrezov skvazhin [Tekst] / A.K. Kozyrin. – M.: Nedra, 1985.
12. *Ivanov V.T.* Metody reshenija prjamyh i obratnyh zadach jelektrokarotazha [Tekst] / V.T. Ivanov, M.S. Masjutina. – M.: Nauka, 1983. – 143 s.
13. *Ivanov V.T.* Nekotorye problemy vychislitel'noj matematiki primenitel'no k raschetam jelektricheskikh polej v jelektrohimicheskikh sistemah [Tekst] / V.T. Ivanov; preprint dokl. Prezidiumu BFAN SSSR. – Ufa: BFAN SSSR, 1983. – 39 s.
14. *Samarskij A.A.* Problemy primenenija vychislitel'noj tehniki [Tekst] / A.A. Samarskij // Vestnik AN SSSR. – 1984. – № 11. – S. 17–29.
15. *Ivanov V.T.* [Tekst] / V.T. Ivanov // Tez. dokl. Vsesojuznoj konf. «Teorija informacionnyh sistem i sistem upravlenija s raspredelennymi parametrami»: ch.1. – Ufa: BFAN SSSR, 1976. – S. 19–20.
16. *Ivanov V.T.* Metody rascheta trehmernyh jelektricheskikh polej v jelektrolitah [Tekst] / V.T. Ivanov // Kraevye zadachi matematicheskoy fiziki i ih prilozhenija. – Ufa: BFAN SSSR, 1976. – S. 18–53.
17. *Ivanov V.T.* Raschet trehmernyh jelektricheskikh polej v neodnorodnoj srede s protjazhennymi tonkimi cilindricheskimi jelektrodami [Tekst] / V.T. Ivanov, N.P. Glazov, M.M. Mahmutov. – Jelektrichestvo. – 1985. – № 6. – S. 48–52.
18. *Samarskij A.A.* Vvedenie v chislennye metody [Tekst] / A.A. Samarskij. – M.: Nauka, 1982. – 271 s.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS



**Кучеров Б.А.**

**Kucherov B.A.**

*аспирант кафедры «Информационные технологии  
и управляющие системы ГБОУ ВО МО «Технологический  
университет», Россия, г. Королев*

УДК 681.5.034

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ НАЗЕМНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Рассматриваются вопросы, связанные с прогнозированием и оценкой загрузки средств управления космическими аппаратами. Показана важность данной задачи для проблемы распределения средств управления космическими аппаратами.

Выявлены факторы, которые следует учитывать при прогнозировании загрузки средств управления: состав группировки космических аппаратов, состав наземного комплекса управления космическими аппаратами, технологические циклы управления космическими аппаратами, плановые эксплуатационные мероприятия, работоспособность средств и статистические данные об их работе. Отмечено влияние указанных факторов на загрузку средств.

Дано краткое описание разработанной модели полета космических аппаратов по околоземной орбите. Показаны пути использования данной модели при решении задач прогнозирования загрузки средств управления, в том числе: оценка достаточности средств для управления заданной группировкой космических аппаратов; выявление узких мест в программном обеспечении, используемом при распределении средств управления; использование при проведении тренировок и обучении персонала; оперативное и наглядное информирование специалистов о наземной и космической ситуации. Рассмотрена возможность моделирования как существующей, так и перспективной группировки космических аппаратов. Отмечены перспективы усовершенствования модели.

Освещен вопрос моделирования состояния средств управления космическими аппаратами. Показано, что для оценки процента работоспособных средств, при которой нагрузка на систему останется приемлемой, может быть проведено моделирование ситуаций выхода из строя различного числа средств управления.

Показана важность оценки нагрузки на органы, обеспечивающие использование средств управления космическими аппаратами. Отмечено влияние количества потенциальных конфликтных ситуаций при использовании средств управления на указанную нагрузку и на оперативность решения задачи распределения средств управления. Представлен подход к прогнозированию количества таких конфликтных ситуаций, который заключается в моделировании выбора зон радиовидимости для составления заявок на использование средств управления космическими аппаратами. Указаны возможные критерии для отбора зон радиовидимости. Приведены результаты прогнозирования количества потенциальных конфликтных ситуаций при использовании четырех средств управления для управления различным числом космиче-

ских аппаратов (до 35) на двухнедельном интервале. Отмечен прогрессирующий характер зависимости количества конфликтных ситуаций от числа космических аппаратов.

*Ключевые слова:* модель полета, распределение средств управления, космический аппарат, конфликтная ситуация, орган планирования, наземный комплекс управления, достаточность средств, планирование, оценка нагрузки, орбитальная группировка.

## SOLVING TASKS OF LOAD PREDICTION OF GROUND CONTROL FACILITIES FOR SPACECRAFTS

Issues related to prediction and evaluation of load of control facilities (ground stations) for spacecrafts are considered. The significance of this task for problem of allocation (scheduling) control facilities for spacecrafts is shown.

Factors to be allowed in load prediction of control facilities are found out: structure of spacecrafts constellation, structure of ground control complex, technology cycle of control, planned maintenance activities, state of control facilities and statistic about their work. Their influence on load of control facilities are noted.

Brief description of developed model of spacecrafts flights on the near-Earth orbit is given. The ways of using this model in solving task of load prediction of control facilities for spacecrafts are shown. Some of these ways are: evaluation of sufficiency of control facilities to control given constellation of spacecrafts; detection bottlenecks in software used for allocation control facilities; using during workouts and training of specialists; efficient and obvious informing specialists about ground and space situation. Opportunity of modeling as current as further spacecrafts constellation is considered. The prospects of the model are noted.

Issue of modeling state of control facilities for spacecrafts is considered. It is shown that to evaluate percent of working facilities, under which load on system will be acceptable, modeling of situation with malfunctions of different count of control facilities can be performed.

Importance of evaluation of load on authorities providing usage of control facilities for spacecrafts is shown. It is noted that count of potential conflict situations while using control facilities has influence on mentioned load and efficiency of solving task of allocation control facilities for spacecrafts. The approach to prediction of count of such conflict situations is presented. It consists in modeling of choosing zones of radio visibility to prepare requests for using control facilities for spacecrafts. Possible criteria for choosing zones of radio visibility are shown. The results of prediction of count of potential conflict situations while using 4 control facilities to control different count of spacecrafts (up to 35) during two weeks are given. Progressive character of dependence of conflict situations count from spacecrafts count are noted.

*Key words:* flight model, allocation of control facilities, spacecraft, conflict situation, planning authority, ground control complex, sufficient of facilities, scheduling, evaluation of load, orbital constellation.

### Введение

В настоящее время в соответствии с Федеральной космической программой России на 2006–2015 годы идет бурное наращивание группировки космических аппаратов (КА), что вместе с использованием малопунктной (2–4 наземных пункта) технологии управления КА предъявляет новые требования к процессу управления группировкой КА [1–5].

Средства управления, с помощью которых осуществляется управление группировкой КА, являются средствами коллективного использования. Средства управления представляют собой унифицированные наземные станции, предназначенные как для передачи на КА командно-программной информации, так и для приема с КА телеметрической информации и ряда других задач. Одни и те же средства могут использоваться для управления КА различного назначения. Для обеспечения бесконфликт-

ного использования средств управления необходимо централизованное их распределение [5–8].

При увеличении числа космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений возрастает нагрузка на средства управления, что приводит к увеличению количества конфликтных ситуаций. Под конфликтной ситуацией понимается противоречие заявки существующим ресурсным ограничениям [3].

Заметим, что распределение средств управления КА является одной из основных составляющих процесса управления группировкой КА. В связи с этим к указанному процессу также предъявляются новые требования, в том числе в части оперативности. Для соответствия предъявляемым требованиям необходимо решение целого комплекса задач, к числу которых относится и прогнозирование загрузки средств управления космическими аппаратами.



### **Факторы, учитываемые при прогнозировании загрузки средств управления**

При решении задач прогнозирования загрузки средств управления КА необходимо учитывать целый ряд факторов, таких как состав группировки КА, состав наземного комплекса управления КА, технологические циклы управления (ТЦУ) КА, плановые эксплуатационные мероприятия, работоспособность средств и статистические данные об их работе.

Так, одним из ключевых факторов является состав группировки КА. Сведения о нем включают в себя данные о количестве КА, о типах их орбит и т. д. В условиях прогрессирующего роста группировки КА при малом изменении состава наземного комплекса управления загрузка средств будет неуклонно возрастать.

Состав наземного комплекса управления также имеет крайне существенное влияние на загрузку средств управления КА. Сведения о нем включают в себя данные о количестве средств управления и их расположении, а также технические характеристики средств, обуславливающие возможность их применения для КА различных типов. Например, средства управления с неполноповоротной антенной системой не могут в полной мере использоваться для управления КА на низкоэллиптических орбитах.

От ТЦУ КА зависит, какую нагрузку на средства управления будет создавать каждый КА. Это обусловлено тем, что ТЦУ определяет требуемое количество сеансов связи в сутки.

Проведение плановых эксплуатационных мероприятий для средств управления КА накладывает ограничения на их применение или вовсе делает его невозможным. Примером таких мероприятий может служить техническое обслуживание.

От состояния (исправности) средств управления и выполнения ими сеансов связи также зависит их загрузка. Так, при выходе из строя одного средства запланированные на него сеансы должны быть перераспределены между исправными средствами, что вызовет увеличение их нагрузки. При большой общей загруженности средств выход из строя нескольких наземных станций может повлечь за собой превышение допустимой нагрузки. Это может привести к снижению оперативности управления группировкой КА, т. к. может повлечь невозможность своевременной выдачи управляющих воздействий на КА и прием информации с них.

При невыполнении сеансов связи возникает необходимость в проведении дополнительных сеансов, что также сказывается на загрузке средств.

Рассмотрим подробнее решение таких аспектов

задачи прогнозирования загрузки средств управления КА, как прогнозирование загрузки при изменение состава группировки КА и средств их управления. Стоит отметить, что данные факторы оказывают существенное влияние на загрузку средств.

### **Моделирование полета космических аппаратов**

Для решения задач прогнозирования загрузки средств управления КА необходима возможность моделирования полета КА. В частности, это позволит определить возможные временные интервалы для проведения сеансов связи.

Рассмотрим подробнее модель, которая может быть использована при решении задач прогнозирования загрузки средств управления КА. Исходными данными для модели являются состав группировки космических аппаратов и состав средств их управления. Сведения о составе группировки включают в себя названия космических аппаратов и параметры их орбиты (или начальные условия их движения). К сведениям о составе средств управления относятся названия и географические координаты наземных пунктов их размещения.

Баллистические расчеты в данной модели выполняются по исходным данным в формате TLE (Two-line element set), который представляет собой двухстрочные наборы усредненных кеплеровых орбитальных элементов, генерируемых службой North American Aerospace Defense Command (NORAD) и свободно распространяемых в сети Интернет [8–11].

При этом для расчетов по низкоорбитальным КА, период обращения которых менее 225 минут, используется модель SGP4 (Simplified General Perturbations – обобщенные упрощенные возмущения). Для расчетов по высокоорбитальным КА используется модель SDP4 (Simplified Deep Space Perturbations – упрощенные возмущения дальнего космоса) [8–11].

Визуализация результатов моделирования осуществляется с использованием трехмерной графики. На трехмерной модели осуществляется отображение Земли, КА и их орбит, а также наземных пунктов. Каждый КА может быть отображен индивидуальной трехмерной моделью. Имеется возможность отображения поля обзора КА. Пример визуализации результатов моделирования с использованием трехмерной графики представлен на рис. 1 [8].

Стоит отметить, что при визуализации результатов ход модельного времени может быть естественным или ускоренным. Также возможно отображение результатов моделирования на фиксированный момент времени [8].

Разработанная модель может быть использо-

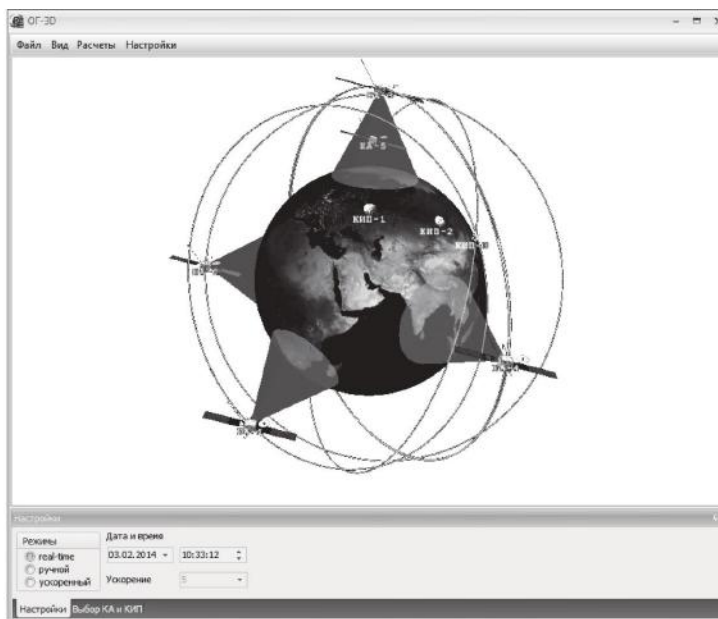


Рис. 1. Пример визуализации результатов моделирования

вана для моделирования как существующей, так и перспективной группировки КА. Исходные данные для моделирования перспективной группировки могут быть получены путем подбора из находящихся на орбите таких КА, параметры орбиты которых наиболее близки к параметрам перспективных КА. Составление гипотетической группировки из находящихся на орбите КА может также использоваться при моделировании группировки, количество КА в которой существенно превышает существующее или перспективное. Это может быть применено при оценке предельных возможностей и характеристик различных систем, в частности программного обеспечения распределения средств управления КА.

Заметим, что модель может быть усовершенствована путем реализации баллистических расчетов по кеплеровым элементам орбиты. Моделирование полета космических аппаратов по заданным параметрам их орбиты может позволить повысить точность решения задач прогнозирования для конкретной группировки. Так, орбиты моделируемых космических аппаратов могут быть заданы точно в соответствии с параметрами орбиты перспективных космических аппаратов, планируемых к запуску. Для сравнения, при использовании TLE не всегда возможно найти существующий космический аппарат с параметрами орбиты, которые с необходимой степенью точности соответствуют требуемым.

Прогноз и проверки могут быть выполнены для различных составов и состояний наземного комплекса управления КА. Возможно моделирование различных ситуаций, в том числе возникновение не-

штатной ситуации на КА и/или средстве управления. В перспективе при моделировании может задаваться вероятность выполнения сеанса связи средством.

Модель может применяться для выявления узких мест в используемом программном обеспечении путем проверки его работы в различных ситуациях. Результаты таких проверок могут быть использованы при формулировании требований к модернизации программного обеспечения.

Другим возможным применением модели в процессе распределения средств управления КА может служить ее использование при оценке достаточности средств для управления заданной группировкой. Критерием достаточности средств может являться обеспечение выполнения технологического цикла управления КА с требуемой вероятностью. Как известно, ТЦУ определяет состав и периодичность операций, проводимых с КА. ТЦУ может быть весьма сложным, включать множество условий, ограничений, особенностей и т. п. Использование базовой модели ТЦУ при моделировании полета группировки КА позволит повысить качество ее использования. Под базовой понимается модель простого ТЦУ, достаточного для решения поставленных задач. В качестве упрощенного критерия оценки достаточности средств может рассматриваться возможность запланировать без конфликтных ситуаций требуемое количество сеансов связи.

Среди других применений модели в распределении средств управления КА можно выделить: использование при проведении тренировок и обучении персонала; оперативное и наглядное инфор-

мирование специалистов о состоянии КА и средств управления.

#### Моделирование состояния средств управления КА

Для решение задач прогнозирования загрузки средств управления КА необходимо также моделирование состояния указанных средств. Для этого может быть использован следующий подход. Последовательно может быть проведено моделирование ситуаций, когда из строя выходит различное число средств управления. При этом временные интервалы неработоспособности средств в ряде случаев могут быть сформированы с использованием генератора псевдослучайных чисел. Это позволит, в числе прочего, оценить, при каком проценте работоспособных средств нагрузка на систему остается приемлемой.

#### Нагрузка на органы, обеспечивающие использование средств управления

Помимо загрузки средств, интерес также представляет нагрузка на органы, обеспечивающие их использование. Одним из факторов, влияющих на такие органы, является количество потенциальных конфликтных ситуаций при использовании средств управления.

Для оценки количества таких ситуаций из рассчитанных зон радиовидимости могут быть отобраны по несколько зон на каждый КА и может быть принято, что сеансы связи запланированы на отобранные зоны. Так, для управления большинством КА на этапе штатной эксплуатации требуется в среднем по три сеанса связи в сутки. На этапе летных испытаний, как правило, проводятся в среднем восемь сеансов связи в сутки. В качестве критерия для отбора зон радиовидимости может выступать такая баллистическая характеристика зоны, как угол места [12–14]. Другой подход к отбору зон может заключаться в их случайном выборе из множества пригодных для проведения сеансов связи. Пригодность зоны к проведению сеанса связи определяется значениями угла места, ее длительностью и прочими факторами.

Для прогнозирования нагрузки на органы, обеспечивающие их использование, был проведен расчет зон радиовидимости по 35 космическим аппаратам для четырех наземных пунктов на двухнедельный интервал. Для отбора зон радиовидимости для сеансов связи был применен первый из вышеописанных подходов, при этом для каждого КА было отобрано по три зоны. Для полученной выборки зон радиовидимости было рассчитано количество конфликтных ситуаций. Полученная зависимость количества конфликтных ситуаций от числа космических аппаратов представлена на рис. 2 [12].

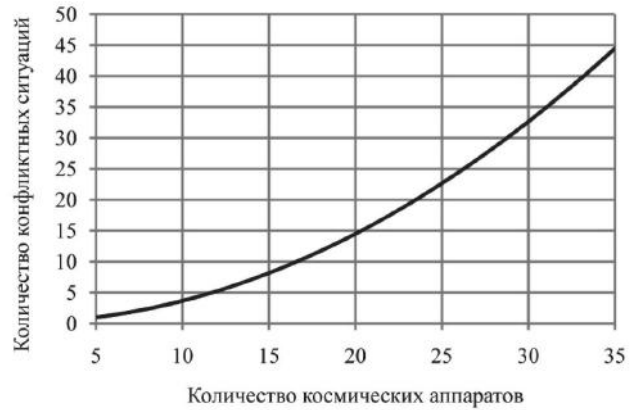


Рис. 2. Зависимость количества конфликтных ситуаций от числа КА

Таким образом, при увеличении числа КА возрастание количества конфликтных ситуаций будет иметь прогрессирующий характер. Как следствие, нагрузка на органы, обеспечивающие использование средств управления, также будет возрастать прогрессирующе.

Для снижения нагрузки по разрешению конфликтных ситуаций и повышения оперативности данного процесса могут быть использованы алгоритмы их автоматизированного разрешения.

#### Заключение

Таким образом, наращивание группировки КА приводит к прогрессирующему возрастанию нагрузки на органы, обеспечивающие использование средств управления космическими аппаратами. Возрастание нагрузки обусловлено ростом количества конфликтных ситуаций. При решении задач прогнозирования нагрузки может быть использована модель полета космических аппаратов по околоземной орбите. Дальнейшее повышение оперативности распределения средств управления КА в условиях наращивания группировки КА и, как следствие, возрастания количества конфликтных ситуаций возможно путем развития возможностей по автоматизированному разрешению конфликтных ситуаций.

#### Список литературы

1. Макаров М.И. Анализ проблем создания перспективных технологий измерений и управления космическими средствами [Текст] / М.И. Макаров, С.С. Кукушкин, В.Б. Рудков // Ракетно-космическая техника. Информационные системы и технологии. Научные труды. В 2-х т. Т. 1. М.: НИИ КС им. А.А. Максимова. – 2012. – С. 86–107.
2. Артюшенко В.М. Современные исследования в области теоретических основ информатики, системного анализа, управления и обработки ин-

формации / В.М. Артюшенко, Т.С. Аббасова, И.М. Белюченко, Н.А. Васильев, В.Н. Зиновьев, Ю.В. Стреналюк, Г.Г. Вокин, К.Л. Самаров, М.Е. Ставровский, С.П. Посеренин, И.М. Разумовский, В.Ю. Фоминский. Монография / под науч. ред. док. техн. наук, проф. В.М. Артюшенко. – Королев, ГБОУ ВПО ФТА, 2014. – 318 с.

3. *Артюшенко В.М.* Повышение оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 59–66.

4. *Артюшенко В.М.* Современные направления развития корпоративных сетей спутниковой связи [Текст] / В.М. Артюшенко, Т.С. Аббасова, Б.А. Кучеров // Двойные технологии. – 2014. – № 3 (68). – С. 67–72.

5. *Артюшенко В.М.* Информатизация управления группировкой космических аппаратов [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Прикладная информатика. – 2013. – № 6 (48). – С. 6–14.

6. *Артюшенко В.М.* Обработка информационных параметров сигнала в условиях аддитивно-мультипликативных негауссовских помех [Текст] / В.М. Артюшенко: монография. – Королев МО: Изд-во «Канцлер», 2014. – 298 с.

7. *Артюшенко В.М.* Алгоритмы адаптации линий спутниковой связи по мощности передающих устройств земных станций при работе в составе узловой сети [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – № 4. – С. 64–73.

8. *Артюшенко В.М.* Роль информатизации в повышении оперативности распределения средств управления космическими аппаратами [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 4. – С. 67–72.

9. *Vallado D.A.* Revisiting spacetrack report #3: Rev 2 [Text] / D.A. Vallado, P. Crawford, R. Hujsak, T.S. Kelso // AIAA Astrodynamics Specialists Conference and Exhibit. – 2006. – 94 p. DOI: 10.2514/6.2006-6753.

10. *Dong W.* An Accuracy Analysis of the SGP4/SDP4 Model [Text] / Wei Dong, Zhao Chang-yin // Chinese Astronomy and Astrophysics. – 2010. – Vol. 34, № 1. – P. 69–76. DOI: 10.1016/j.chinastron.2009.12.009.

11. *Артюшенко В.М.* Организация информационного обмена между элементами наземного комплекса управления группировкой космических аппаратов [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Прикладная информатика. – 2014. – № 1 (49). – С. 33–43.

12. *Артюшенко В.М.* Оценка экономической

эффективности использования автоматизированной системы распределения средств управления космическими аппаратами в условиях ресурсных ограничений [Текст] / В.М. Артюшенко, Б.А. Кучеров // Вестник Поволжского государственного университета сервиса. Серия «Экономика». – 2013. – № 5 (31). – С. 131–136.

13. *Artyushenko V.M.* Statistical Characteristics of Envelope Outliers Duration of non-Gaussian Information Processes / V.M. Artyushenko, V.I. Volovach // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). – Rostov-on-Don, Russia, September 27-30, 2013. – Kharkov: KNURE. – 2013. – P. 137–140. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673139.

14. *Artuschenko V.M.* Modeling transmission rate of ground stations when working as part of a meshed network [Text] / V.M. Artuschenko, B.A. Kuchеров // Austrian Journal of Technical and Natural sciences. – 2014. – № 7–8. – P. 96–99.

#### References

1. *Makarov M.I.* Analysis of the problems of creating advanced technologies measurement and control of space means [Text] / M.I. Makarov, S. S. Kukushkin, V.B. Rudakov // Rocket Space Engineering. Information systems and technologies. Scientific papers. In 2 volumes. Vol. 1. – Moscow: NII KS im. A.A. Maksimova, 2012. – P. 86–107.

2. *Artuschenko V.M.* Modern research in the area of theoretical basics of informatics, system analysis, control and information processing / V.M. Artyushenko, T.S. Abbasova, I.M. Belyuchenko, N.A. Vasil'ev, V.N. Zinov'ev, Yu. V. Strenalyuk, G. G. Vokin, K.L. Samarov, M.E. Stavrovskiy, S. P. Poserenin, I.M. Razumovskiy, V.Yu. Fominskiy. Monograph / under the scientific edition of Doctor of Engineering Science, professor V.M. Artyushenko. – Korolev, GBOU VPO FTA, 2014. – 318 p.

3. *Artuschenko V.M.* Increasing efficiency of conflict-free control for spacecraft constellation with resource restrictions [Text] / V.M. Artuschenko, B.A. Kuchеров // Electrical and data processing facilities and systems. – 2013. – № 3. – V. 9. – P. 59–66.

4. *Artyushenko V.M.* Modern trends of corporate satellite networks [Text] / V. M. Artyushenko, T.S. Abbasova, B.A. Kuchеров // Dual technology. – 2014. – № 3 (68). – P. 67–72.

5. *Artuschenko V.M.* Informatization of control for spacecraft constellation [Text] / V. M. Artuschenko, B.A. Kuchеров // Applied informatics. – 2013. – № 6 (48). – P. 6–14.

6. *Artuschenko V.M.* Processing information parameters of signal under additive-multiplicative non-

Gaussian noise [Text] / V. M. Artuschenko. – Korolev, Moscow region: publisher «Kancler», 2014. – 298 p.

7. *Artuschenko V.M.* Adaptation algorithms of satellite communication links by transmitter power on ground stations when working as part of a meshed network [Text] / V.M. Artuschenko, B.A. Kucherov // Electrical and data processing facilities and systems. – 2014. – V. 10. – № 4. – P. 64–73.

8. *Artuschenko V.M.* Significance of informatization in increasing efficiency of distribution of control facilities for spacecrafts [Text] / V.M. Artuschenko, B.A. Kucherov // Mechatronics, Automation, Control. – 2014. – № 4. – P. 67–72.

9. *Vallado D.A.* Revisiting spacetrack report #3: Rev 2 [Text] / D.A. Vallado, P. Crawford, R. Hujsak, T.S. Kelso // AIAA Astrodynamics Specialists Conference and Exhibit. – 2006. – 94 p. DOI: 10.2514/6.2006-6753

10. *Dong W.* An Accuracy Analysis of the SGP4/SDP4 Model [Text] / Wei Dong, Zhao Chang-yin // Chinese Astronomy and Astrophysics. – 2010. – Vol. 34, № 1. – P. 69–76. DOI:10.1016/j.chinastron.2009.12.009.

11. *Artuschenko V.M.* Organization of information

exchange between the elements of ground control complex for spacecraft constellation [Text] / V.M. Artuschenko, B.A. Kucherov // Applied informatics. – 2014. – № 1 (49). – P. 33–43.

12. *Artuschenko V.M.* Evaluation of economic efficiency of automated systems of control distribution for spacecrafts in conditions of limited resources [Text] / V.M. Artuschenko, B.A. Kucherov // Bulletin of Povolzhskiy State University of Service: Series «Economy». – 2013. – № 5 (31). – P. 131–136.

13. *Artyushenko V.M.* Statistical Characteristics of Envelope Outliers Duration of non-Gaussian Information Processes / V.M. Artyushenko, V.I. Volovach // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013). – Rostov-on-Don, Russia, September 27-30, 2013. – Kharkov: KNURE. – 2013. – P. 137–140. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673139.

14. *Artuschenko V.M.* Modeling transmission rate of ground stations when working as part of a meshed network [Text] / V.M. Artuschenko, B.A. Kucherov // Austrian Journal of Technical and Natural sciences. – 2014. – № 7–8. – P. 96–99.



**Крымский В.Г.**  
**Krymsky V.G.**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-управляющие системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа



**Ахмеджанов Ф.М.**  
**Akhmedzhanov F.M.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-управляющие системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа



**Имильбаев Р.Р.**  
**Imilbaev R.R.**

аспирант кафедры «Информационно-управляющие системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», инженер ООО «УфаСистемаГаз», Россия, г. Уфа



**Юнусов А.Р.**  
**Yunusov A.R.**

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

УДК 681.518.5

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ТЕЛЕМЕТРИИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Системы телеметрии (СТ) становятся чрезвычайно важными компонентами комплексов автоматизации эксплуатации газораспределительных сетей (ГС). СТ позволяют осуществлять непрерывный контроль технологических параметров сетей (значений давления газа и температуры в заданных точках ГС, срабатывания запорной арматуры и т. д.). Собранные с помощью СТ данные могут передаваться диспетчеру в соответствии с технологией GPRS по каналу связи, работающему на базе стандарта GSM. На основе этой информации диспетчер должен принять обоснованные решения о наличии опасных тенденций в изменении параметров для предупреждения возможных аварийных ситуаций. Между тем в существующих вариантах построения автоматизированных комплексов для ГС правильность подобных решений в основном зависит от интуиции диспетчера.

Представленная статья предлагает формировать поддержку принимаемых решений путем реализации процедур прогнозирования изменения критических параметров ГС. С учетом погрешностей их измерения прогнозирование производится с использованием моделей, рассматривающих интервально-значные временные ряды и интервальный аналог известного алгоритма Хольта. В рамках этого алгоритма по определенным правилам находятся начальные векторы границ интервала значений контролируемого параметра, после чего с помощью рекуррентных формул рассчитываются его взвешенные уровни и тренды для всех моментов времени, применительно к которым накоплена измерительная информация. Весовые коэффициенты, в свою очередь, вычисляются по результатам решения задачи нелинейной оптимизации численным методом. Таким образом, выбранный подход осуществляет двойное экспоненциальное сглаживание, что позволяет достичь высокого качества прогнозирования. Окончательный прогноз получается путем линейного преобразования вектора уровней и вектора трендов для последнего из указанных моментов времени. Программный модуль, реализующий такой алгоритм, предлагается включать в системы обработки телеметрической информации с целью обеспечения быстрого реагирования на неблагоприятные тенденции развития ситуаций в процессе эксплуатации газораспределительной сети.

*Ключевые слова:* газораспределительные сети, прогнозирование, системы телеметрического контроля, интервальнозначные временные ряды, алгоритм Хольта.

## PROGNOSTICS OF THE STATE OF GAS DISTRIBUTION NETWORK ON THE BASIS OF TELEMETRY-PROVIDED DATA FOR PREVENTING ACCIDENTS

Telemetry systems (TS) have become very important components of the automation facilities for exploitation of gas distribution networks (GDN). TS allow fulfilling continuous control of the network technological parameters (values of gas pressure and temperature in the required points of GDN, operations of stop valves, etc.). The data accumulated in such a way can be transmitted to control manager in accordance with GPRS technology via communication bus working on the basis of GSM. Due to this information, the control manager has to make justified decisions to prevent possible accidents. However the correctness of the above decisions made for the existing versions of automation facilities for GDN mostly depend on the control manager's intuition.

The paper offers to form the decision support by means of realizing the procedures of prognostics of GDN critical parameter change. With respect to measurement errors, the forecast is obtained using the models which exploit interval-valued time series and interval modification of well-known Holt's algorithm. Within this algorithm, the initial vectors including the bounds of the interval of the controlled parameter values are found according to certain rules, and then the parameter weighted levels and trends are computed via recurrence formulas for all times, in relation to which the measurement information has been accumulated. In turn the weighting coefficients are derived by solving a nonlinear optimization problem numerically. Thus, the approach provides a double exponential smoothing, which leads to high-quality predictions. The final forecast is obtained by linear transformation of the vector of levels and the vector of trends for the last of these points in time. It is proposed to include the software module that implements such an algorithm into the system of processing of telemetry data for ensuring rapid response to adverse trends in the development of situations in the operation of a gas distribution network.

*Key words:* gas distribution network, prognostics, telemetry system, interval-valued time series, Holt's algorithm.

### Введение

К основным задачам, возникающим в процессе эксплуатации газораспределительных сетей (ГС), следует отнести необходимость соблюдения требований по безопасности транспортировки газа, очистки его от механических примесей, обеспечения заданных значений давления газа на всех участках ГС от магистральных линий до оборудования конечных пользователей. Для решения перечисленных задач в состав ГС вводят системы газорегуляторных пунктов (ГРП). Каждый ГРП представляет собой комплекс технологического оборудования и устройств, предназначенный для понижения входного давления газа до требуемого уровня, а также для выполнения следующих функций [1]:

- автоматического поддержания заданного выходного давления независимо от изменения расхода и входного давления газа (в заданном диапазоне их значений);

- автоматического прекращения подачи газа при повышении или понижении выходного давления сверх или ниже допустимых заданных значений;

- очистки газа от механических примесей;
- учета газа.

В соответствии с особенностями размещения оборудования различают несколько типов ГРП. В их числе особое значение имеют блочные (ГРПБ) и шкафные (ШГРП) газорегуляторные пункты. Применительно к ГРПБ оборудование монтируется в одном или нескольких помещениях контейнерного типа. В случае ШГРП оборудование монтируется в несгораемом шкафу.

В зависимости от исполнения ГРП могут иметь несколько линий понижения давления. Газ после поступления в ГРП проходит через фильтр, где очищается от механических примесей. Далее, пройдя через предохранительно-запорный клапан (ПЗК), он поступает на регулятор давления, где давление снижается до заданного уровня и поддерживается постоянным. Системы ПЗК и предохранительный сбросной клапан (ПСК) предназначены для предотвращения аварийных ситуаций. При сбое в работе регулятора давления ПСК сбрасывает лишнее давление в атмосферу. В свою очередь, если аварийный

сброс газа не оказал должного эффекта, то срабатывает ПЗК, который перекрывает линию редуцирования. Это приводит к тому, что доступ газа потребителю через эту линию понижения давления прекращается.

Для обеспечения безаварийной работы ГС требуется постоянное наблюдение за основными параметрами ГРП: показаниями давления газа на входе и выходе каждой из линий понижения давления, состояниями ПЗК и ПСК. Кроме этого, необходимо располагать информацией о состоянии систем контроля доступа в помещение ГРП для предотвращения несанкционированных действий посторонних лиц. И, наконец, следует учитывать, что ГРП принадлежат к классу пожаровзрывоопасных объектов. Сказанное объясняет важность получения актуальной, полной и достоверной информации о состоянии ГРП. На основе ее анализа можно снизить аварийность за счет реализации своевременных превентивных мер со стороны организаций, эксплуатирующих газораспределительные сети [2].

В настоящее время обязанности по контролю состояния ГС на определенном участке возложены на аварийно-диспетчерскую службу (АДС). В целях непосредственного наблюдения за объектами ГС (в частности, ГРП) применяются периодические обходы соответствующих участков. Между тем все чаще ставится вопрос об использовании для указанных целей автоматизированных средств мониторинга состояния удаленных объектов. Системы телеметрии (СТ) давно стали чрезвычайно важными компонентами комплексов автоматизации эксплуатации ГС. СТ позволяют осуществлять непрерывный контроль технологических параметров сети. На базе информации, полученной с помощью СТ и представленной в АДС, диспетчер может принять решения о наличии опасных тенденций в изменении параметров для предупреждения аварийных ситуаций.

Контролируемые в процессе мониторинга параметры ГРП можно условно разделить на два класса [3]:

- параметры, зависимость которых от времени представляет собой непрерывную функцию (примеры: давления, температуры), – параметры 1-го класса;

- параметры, значения которых соответствуют двузначной логике 'true' или 'false' (пример: сигнал датчика положения двери – «открыто» или «закрыто»), – параметры 2-го класса.

Как правило, для каждого сигнала, соответствующего какому-либо параметру 1-го класса, установлены границы допустимого интервала значений (уставки). Наиболее «критичными» показаниями яв-

ляются давления на входе и выходе ГРП и положение предохранительного запорного клапана (ПЗК).

Контроллер телеметрии непрерывно осуществляет сбор и анализ всех показаний датчиков, характеризующих работу ГРП. В случае необходимости осуществляется передача полученных данных на сервер. Собранные с удаленных объектов показания сохраняются в базе данных. В результате анализа обработанных данных непосредственно перед их сохранением формируются «алерты» – информационные сообщения, которые незамедлительно отображаются на автоматизированном рабочем месте (АРМ) диспетчера. Эти вспомогательные сообщения предназначены для того, чтобы привлечь внимание диспетчера на возможное возникновение нештатной ситуации на объекте в связи с выходом контролируемого параметра за допустимые пределы. Кроме того, аналогичным образом формируются сообщения о «возврате» объекта в нормальное рабочее состояние, если контролируемые показания опять оказались в допустимой области.

Таким образом, диспетчер, как правило, получает сигналы об аварийных ситуациях постфактум (когда тот или иной параметр уже вышел за допустимые пределы). Между тем на практике необходимо действовать в режиме предупреждения таких ситуаций. Следует отметить, что это замечание относится к ситуациям в связи с изменениями параметров 1-го класса, так как изменения параметров 2-го класса (например, данные телесигнализации о состоянии дверей) предсказать заранее невозможно.

По изложенным причинам («позднее» оповещение) время для принятия мер реагирования на изменения критических параметров 1-го класса существенно сокращается. Безусловно, СТ можно сконфигурировать таким образом, чтобы величины уставок были максимально приближены к верхней и нижней границам рабочего диапазона, считая, что в процессе нормального функционирования сети значения параметра только незначительно отклоняются от некоторого номинального уровня. Казалось бы, в указанном случае достоверность предупреждения аварийных ситуаций повысится. На самом деле такой подход может привести к обратному эффекту. Значения параметров, в частности давления газа, в зависимости от внешних факторов могут скачкообразно с большой амплитудой меняться в течение короткого промежутка времени. В результате будет сформировано большое количество «алертов», что может ослабить внимание диспетчера. Кроме того, «дребезг» параметра на границах уставок существенно повышает эксплуатационные расходы для системы телеметрии, так как при этом потребуются



существенно больший объем потребления трафика. Напротив, если задать величины уставок далеко от границ рабочего диапазона, то, как уже указывалось, диспетчер будет получать сообщения об аварийных событиях слишком поздно. Кроме того, следует учитывать, что показания, характеризующие значение параметра, могут продолжать изменяться после его выхода за пределы, установленные уставками. Диспетчеру важно знать, в каком направлении будет далее развиваться подобная ситуация, однако возможности своевременного получения необходимой для этого информации не предусмотрено.

Приведенные рассуждения показывают, что в составе программного обеспечения системы должны быть необходимые модули, реализующие прогноз «будущего» значения параметра на основе предыдущих измерений. Автоматизированное формирование трендов позволит диспетчеру заранее принять решение о необходимости превентивных мер реагирования. Наличие прогнозирования создаст условия для задания относительно широкого интервала между уставками (верхней и нижней границами допустимой области). Это в результате освободит внимание диспетчера от лишних информационных сообщений. К тому же достоверный прогноз поможет диспетчеру понять, каким резервом времени до возникновения аварийной ситуации на объекте он располагает. Тем самым появляется возможность максимально эффективного использования персонала для обхода объектов с наиболее нестабильным состоянием.

Задача прогнозирования осложняется наличием погрешностей измерения параметров. Указанные погрешности обусловлены несовершенством измерительной аппаратуры, возможными случайными факторами, округлением значений при переводе данных из аналогового формата в цифровой для передачи по цифровым каналам связи и др. Процедуру прогнозирования, таким образом, целесообразно разрабатывать с учетом этой особенности.

### Процедура прогнозирования

Как указывалось в [3], процедура прогнозирования, заключающаяся в вычислении значений интересующего нас параметра  $Y(t)$  в будущие моменты времени, может использовать идею определения тенденции его изменения исходя из его значений в предыдущие моменты времени. Например, если время  $t$  измеряется с условным шагом дискретности «1», то прогнозирование «на один шаг вперед» следует рассматривать как реализацию соотношения

$$Y(k+1) = f(Y(1), Y(2), \dots, Y(k-1), Y(k)), \quad (1)$$

где  $Y(k+1)$  – значение параметра в будущий момент времени;  $Y(1), \dots, Y(k)$  – «прошлые» значения этого

параметра в моменты времени  $1, 2, k-1, k$ ;  $f(\bullet)$  – некоторая функция указанных величин.

Принимая во внимание отмеченную выше погрешность измерения параметров, более корректно говорить о том, что исходная информация для прогнозирования представлена нижними  $\underline{Y}(i)$  и верхними  $\bar{Y}(i)$  границами интервалов значений  $Y(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ . Иными словами,

$$Y(i) \in [\underline{Y}(i), \bar{Y}(i)]. \quad (2)$$

Введем в рассмотрение векторы

$$\mathbf{I}_i = \left\| \underline{Y}(i), \bar{Y}(i) \right\|^T, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (3)$$

где верхний индекс  $T$  характеризует операцию транспонирования.

Фактически последовательность этих векторов  $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_k$  задает интервальнозначный временной ряд (ИВР) [4]. Процедуру прогнозирования применительно к такому временному ряду целесообразно осуществлять путем применения «интервальной» версии известного алгоритма Ч. Хольта [5] – так называемой модификации Holt<sup>I</sup>, предложенной в [6]. В свою очередь, Holt<sup>I</sup> выполняет поиск границ интервалов, содержащих значения параметра  $Y(t)$  в будущие моменты времени, на основе экспоненциального сглаживания. Согласно [6] реализация алгоритма предполагает расчеты по следующим рекуррентным соотношениям:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_r^I &= \mathbf{A}\mathbf{L}_r + (\mathbf{E} - \mathbf{A})(\mathbf{L}_{r-1}^I + \mathbf{T}_{r-1}^I), \\ \mathbf{T}_r^I &= \mathbf{B}(\mathbf{L}_r^I - \mathbf{L}_{r-1}^I) + (\mathbf{E} - \mathbf{B})\mathbf{T}_{r-1}^I, \quad r = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{L}_r^I = [\underline{L}_r, \bar{L}_r]^T$  – вектор интервальнозначного сглаженного уровня ИВР с нижней  $\underline{L}_r$  и верхней  $\bar{L}_r$  границами соответственно;  $\mathbf{T}_r^I = [\underline{T}_r, \bar{T}_r]^T$  – вектор значений нижней  $\underline{T}_r$  и верхней  $\bar{T}_r$  границ сглаженного тренда к концу интервала времени между  $(r-1)$ -м и  $r$ -м отсчетами;  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  – матрицы коэффициентов сглаживания размера  $(2 \times 2)$ :

$$\mathbf{A} = [\alpha_{ij}], \quad \mathbf{B} = [\beta_{ij}], \quad 0 < \alpha_{ij}, \beta_{ij} < 1, \quad i, j = 1, 2. \quad (5)$$

$\mathbf{E}$  – единичная матрица размера  $(2 \times 2)$ .

В качестве начальных векторов для расчетов с помощью соотношений (4) используются

$$\mathbf{L}_2^I = \mathbf{I}_2, \quad \mathbf{T}_2^I = \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1. \quad (6)$$

На осуществляемых последовательно шагах процедуры следует находить прогнозы  $\tilde{\mathbf{I}}_3, \tilde{\mathbf{I}}_4, \tilde{\mathbf{I}}_5, \dots$  для векторов  $\mathbf{I}_3, \mathbf{I}_4, \mathbf{I}_5, \dots$  по формуле

$$\tilde{\mathbf{I}}_r = \mathbf{L}_{r-1}^I + \mathbf{T}_{r-1}^I, \quad (7)$$

отражающей распространение метода Хольта [5] на «интервальный» случай.

Предпочтительные значения коэффициентов сглаживания можно найти в результате минимизации квадратичной меры ошибки [6]:

$$\begin{aligned}
 Q(\mathbf{A}, \mathbf{B}) &= \sum_{r=3}^k (\mathbf{I}_r - \tilde{\mathbf{I}}_r)^T (\mathbf{I}_r - \tilde{\mathbf{I}}_r) = \\
 &= \sum_{r=3}^k \begin{bmatrix} \bar{Y}(r) - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1} \\ \underline{Y}(r) - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{Y}(r) - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1} \\ \underline{Y}(r) - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1} \end{bmatrix} = \quad (8) \\
 &= \sum_{r=3}^k (\bar{Y}(r) - \bar{L}_{r-1} - \bar{T}_{r-1})^2 + \sum_{r=3}^k (\underline{Y}(r) - \underline{L}_{r-1} - \underline{T}_{r-1})^2.
 \end{aligned}$$

Таким образом, необходимо определить

$$\min_{\alpha_{ij}, \beta_{ij}} Q(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \quad (9)$$

при учете ограничений (5).

Данную задачу нелинейной оптимизации, в соответствии с рекомендациями [6], предлагается решать с помощью специальной версии алгоритма Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS) для ограниченного объема компьютерной памяти применительно к учету ограничений типа неравенств на значения переменных (L-BFGS-B) [7]. Следует отметить, что L-BFGS-B относится к семейству квазиньютоновских методов и использует аппроксимацию для вычисления гессиана функции цели (9). Программная реализация этого алгоритма включена в состав пакета R – свободно распространяемой программной среды для научных вычислений и обработки статистических данных [8].

При известных величинах коэффициентов сглаживания можно осуществить расчет по рекуррентным соотношениям (29) и затем выполнить прогноз значений параметра на несколько (например,  $m$ ) отсчетов времени вперед:

$$\mathbf{I}_{k+m} = \mathbf{L}_k^{\mathbf{I}} + m\mathbf{T}_k^{\mathbf{I}}. \quad (10)$$

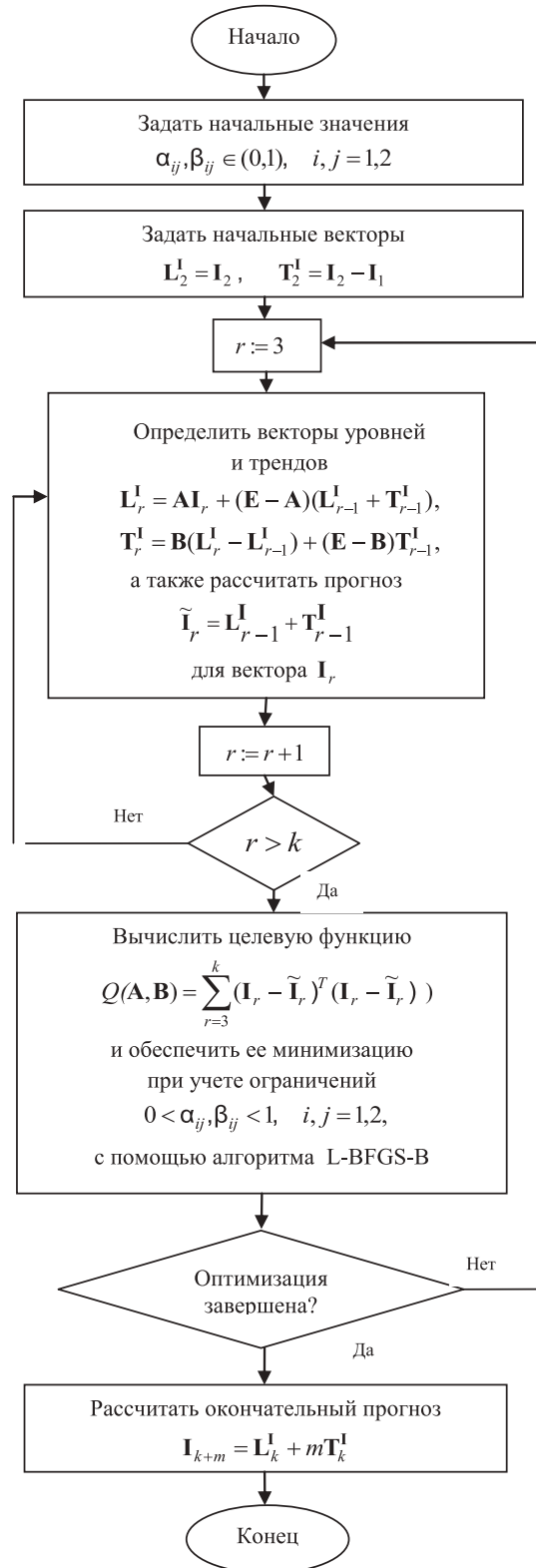
Обобщенная блок-схема алгоритма, поддерживающего процесс прогнозирования на базе ИВР-модели, представлена на рисунке.

Модуль, реализующий данный алгоритм, может быть задействован в составе программного обеспечения системы мониторинга состояния ГС, что позволяет создать условия для организации необходимой информационной поддержки принимаемых управленческих решений по предупреждению возможных аварийных ситуаций.

### Заключение

Анализ проблем, связанных с обеспечением безопасности эксплуатации газораспределительных сетей, относится к числу приоритетных направлений современных исследований. В представленной статье предлагается формировать поддержку принимаемых решений о превентивных мерах по недопущению аварий путем реализации процедур прогнозирования изменения критических параметров, которые характеризуют состояние объектов в составе сети. С учетом погрешностей их измерения прогно-

зирование производится с использованием моделей, рассматривающих интервальнозначные временные ряды и интервальный аналог известного алгоритма Хольта. По мнению авторов, такой подход позволит существенно расширить возможности для предупреждения возникновения аварийных ситуаций.



Блок-схема алгоритма прогнозирования с помощью ИВР-модели, где  $\mathbf{I}_{k+m} = [\underline{Y}(k+m), \bar{Y}(k+m)]^T$

## Список литературы

1. *ГОСТ Р 54960-2012*. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы газораспределительные. Пункты газорегуляторные блочные. Пункты редуцирования газа шкафные. Общие технические требования [Текст]. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 2013. – 19 с.
2. *Крымский В.Г.* Автоматизация управления технологическими процессами в газораспределительных сетях: проблемы, тенденции и перспективы [Текст] / В.Г. Крымский, И.М. Жалбеков, Р.Р. Имильбаев, А.Р. Юнусов // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 70–79.
3. *Крымский В.Г.* Выбор периодичности обновления информации о состоянии газораспределительной сети при использовании системы телеметрии [Текст] / В.Г. Крымский, Ф.М. Ахмеджанов, Р.Р. Имильбаев, А.Р. Юнусов // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 78–85.
4. *Maia A.L.S.*, Forecasting models for interval-valued time series [Текст] / A.L.S. Maia, F.A.T. De Carvalho, T. B. Ludermitz // *Neurocomputing*. – 2008. – V. 71. – P. 3344–3352.
5. *Holt C.C.* Forecasting seasonal and trends by exponentially weighted averages [Текст] // *ONR Memorandum № 52*. – Pittsburgh, USA: Carnegie Institute of Technology. 1957. Reprinted in: Holt C.C. Forecasting seasonal and trends by exponentially weighted averages [Текст] // *International Journal of Forecasting*. – 2004. – V. 20. – № 1. – P. 5–10.
6. *Maia A.L.S.* Holt's exponential smoothing model for interval-valued time series [Текст] / A.L. S. Maia, F.A.T. De Carvalho // *Anais do Workshop Franco-Brasileiro sobre Mineração de Dados*. – 2009. – Recife, Brazil. – P. 38–39.
7. *Byrd R.H.* A limited memory algorithm for bound constrained optimization [Текст] / R.H. Byrd, P. Lu, J. Nocedal, C. Zhu // *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*. – 1995. – V. 16. – P. 1190–1208.
8. *R Development Core Team*. R release 3.1.2 for Windows [Электронный ресурс]. – 2014. – Available from: <http://www.r-project.org/>.

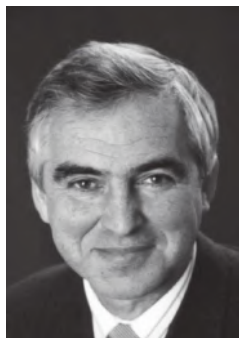
## References

1. *GOST R 54960-2012*. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Sistemy gazoraspredeitel'nye. Punkty gazoreguljatornye blochnye. Punkty reducirovaniya gaza shkafnye. Obshhie tehniczeskie trebovaniya [Tekst]. – M.: Federal'noe agentstvo po tehniczeskomu regulirovaniju i metrologii. – 2013. – 19 s.
2. *Krymskij V.G.* Avtomatizacija upravlenija tehnologičeskimi processami v gazoraspredeitel'nyh setjah: problemy, tendencii i perspektivy [Tekst] / V.G. Krymskij, I.M. Zhalbekov, R.R. Imil'baev, A.R. Junusov // *Jelektrotehniczeskie i informacionnye kompleksy i sistemy*. – 2013. – T. 9. – № 2. – S. 70–79.
3. *Krymskij V.G.* Vybor periodičnosti obnovlenija informacii o sostojanii gazoraspredeitel'noj seti pri ispol'zovanii sistemy telemektrii [Tekst] / V.G. Krymskij, F.M. Ahmedzhanov, R.R. Imil'baev, A.R. Junusov // *Jelektrotehniczeskie i informacionnye kompleksy i sistemy*. – 2014. – T. 10. – № 1. – S. 78–85.
4. *Maia A.L.S.*, Forecasting models for interval-valued time series [Tekst] / A.L.S. Maia, F.A.T. De Carvalho, T. B. Ludermitz // *Neurocomputing*. – 2008. – V. 71. – P. 3344–3352.
5. *Holt C.C.* Forecasting seasonal and trends by exponentially weighted averages [Tekst] // *ONR Memorandum № 52*. – Pittsburgh, USA: Carnegie Institute of Technology. 1957. Reprinted in: Holt C.C. Forecasting seasonal and trends by exponentially weighted averages [Tekst] // *International Journal of Forecasting*. – 2004. – V. 20. – № 1. – P. 5–10.
6. *Maia A.L.S.* Holt's exponential smoothing model for interval-valued time series [Tekst] / A.L.S. Maia, F.A.T. De Carvalho // *Anais do Workshop Franco-Brasileiro sobre Mineração de Dados*. – 2009. – Recife, Brazil. – P. 38–39.
7. *Byrd R.H.* A limited memory algorithm for bound constrained optimization [Tekst] / R.H. Byrd, P. Lu, J. Nocedal, C. Zhu // *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*. – 1995. – V. 16. – P. 1190–1208.
8. *R Development Core Team*. R release 3.1.2 for Windows [Jelektronnyj resurs]. – 2014. – Available from: <http://www.r-project.org/>.



**Бакалов В.Г.**  
**Bakalov V.G.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности»,  
Черниговский государственный технологический университет  
Украина, г. Чернигов



**Чередниченко П.И.**  
**Cherednichenko P.I.**

доктор технических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой «Машины и аппараты легкой промышленности»,  
Черниговский государственный технологический университет,  
Украина, г. Чернигов



**Скрипник С.П.**  
**Skrynyuk S.P.**

кандидат технических наук, старший преподаватель,  
Черниговский государственный технологический университет,  
Украина, г. Чернигов



**Бакалов О.В.**  
**Bakalov O.V.**

старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности»,  
Черниговский государственный технологический университет  
Украина, г. Чернигов

УДК 678.057.5

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОЙ ПЛЕНКИ НА ПРИЕМНО-ОХЛАЖДАЮЩЕМ ВАЛКЕ

Статья посвящена разработке математической модели процесса вытягивания плоской полимерной пленки между плоскощелевой головкой и приемно-охлаждающим валком, а также процесса вытягивания и сужения ширины пленки на охлаждающем валке.

Приведены формулы для расчета осевой силы, растягивающей полимерную пленку, изменения текущей силы трения пленки о приемно-охлаждающий валок в зависимости от изменения угла обхвата его пленкой.

Приведены формулы для определения текущей силы, которая стягивает полимерную пленку в поперечном направлении.

Получено дифференциальное уравнение для определения угла наклона края полимерной пленки на приемно-охлаждающем валке. Для нахождения начального угла входа полимерной пленки на валок, который растягивает и охлаждает ее, использовался численный метод «стрельбы». Суть этого метода для указанного уравнения заключается в том, что указывается конечная ширина получаемой полимерной пленки, при которой конечный угол наклона ее края равен нулю, а в обратном направлении вытягивания пленки определяется угол наклона ее края на приемно-охлаждающем валке. При этом начальный угол наклона края полимерной пленки должен обеспечивать попадание края пленки в конец плоскощелевой головки, которая формирует ее. Метод дихотомии позволяет определить с заданной точностью (менее 1 мм) конечную ширину получаемой полимерной пленки.

Предложенная математическая модель позволяет рассчитать конечную ширину получаемой полимерной пленки на установке с плоскощелевой головкой, текущую ширину пленки на приемно-охлаждающем валке и текущую ширину пленки в зависимости от расстояния между указанным валком и плоскощелевой головкой.

Математическая модель позволяет определить влияние: геометрических размеров установки (диаметра приемно-охлаждающего валка, расстояния от него до плоскощелевой головки) и коэффициента трения полимерной пленки о приемно-охлаждающий валок на ширину получаемой полимерной пленки.

Полученная математическая модель и алгоритм расчета могут быть использованы на практике при проектировании плоскощелевых головок и приемно-охлаждающих устройств, вытягивающих пленку.

*Ключевые слова:* моделирование, полимерная пленка, формирование, вытягивание, ширина пленки, коэффициент трения, приемно-охлаждающий валок.

## MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF FORMATION OF A FLAT FILM ON THE RECEIVING COOLING ROLL

The article is devoted to a mathematical simulation of a process of pulling a flat film between T-die and take-off and cooling roller, as well as a process of pulling and narrowing of a flat film on a cooling roller.

The article gives formulas for calculation of axial force stretching polymer film, variation in current flat-friction force on a take-off and cooling roller depending on variation at which angle a flat folds it.

It also gives formulas for calculation of current force that bands polymer flat crosswise.

Moreover, a differential equation for finding an edge angle of polymer flat on a take-off and cooling roller has been received. A numerical method «shooting» has been used for finding a start angle at which polymer flat enters a roller that stretches and cools it. The method works like this for mentioned equation – a finished width of polymer flat received should ensure that its finished edge angle equals to zero, whilst at the opposite direction of flat extrusion its edge angle is found on a take-off and cooling roller. In addition a start edge angle of polymer flat should ensure that a flat's edge enters a T-die's end that forms it. The dichotomy method allows to find a finished width of resulting polymer flat with precise accuracy (less than 1 mm).

The proposed mathematical simulation allows to calculate a finished width of resulting polymer flat on a T-die plant, a current width of a flat on a take-off and cooling roller and a current width of a flat depending on a distance between the roller and the T-die.

The mathematical simulation allows to measure an effect of: a geometrical dimension of a plant (i.e. a diameter of a take-off and cooling roller and a distance from it to a T-die) and a friction coefficient of polymer flat against a take-off and cooling roller on a width of a resulting polymer flat.

Founded mathematical simulation and calculation algorithm can be used in practice while projecting T-dies and take-off and cooling rollers that extrude a flat.

*Key words:* simulation, polymer flat, pulling, extrusion, width of flat, friction coefficient, take-off and cooling roller.

При производстве пленки методом плоскощелевой экструзии наибольшее влияние на качество производимой пленки оказывают два узла – экструзионная головка, которая формирует полимерную пленку из расплава, и приемно-охлаждающий валок, который вытягивает и охлаждает пленку [1–5]. Приемно-охлаждающий валок устанавливается за экструзионной головкой и обеспечивает вытягиванием необходимую толщину, ширину пленки и охлаждает ее до необходимой температуры.

В связи с этим на качество полимерной пленки влияют следующие факторы:

- реологические процессы, которые проходят в экструзионной головке;

- процесс вытягивания полимерной пленки, который имеет место на участке между экструзионной головкой и охлаждающим валком;

- процесс вытягивания полимерной пленки на охлаждающем валке, который сопровождается изменением ширины пленки.

В работе [1–5] представлена расчетная схема для определения ширины и толщины полимерной пленки при ее вытягивании между плоскощелевой

головкой и приемно-охлаждающим валком. Представленная расчетная схема базируется на том, что:

- сила трения между полимерной пленкой и валком приложена в одной точке;

- сила, которая вытягивает полимерную пленку, также приложена в одной точке и направлена перпендикулярно оси валка.

Такие допущения не совсем точно описывают процесс вытягивания полимерной пленки между плоскощелевой головкой и охлаждающим валком [1–5].

Вытягивающая сила уменьшается от максимального значения в точке касания полимерной пленки приемно-охлаждающего валка до минимального значения, которое существует в пленке после прохождения ею приемно-охлаждающего валка.

В связи с этим ширина и толщина полимерной пленки будут иными по сравнению со значениями, рассчитанными по формулам работ [1–5].

На рис. 1 показана схема действия сил на полимерную пленку при взаимодействии ее с охлаждающим валком. Из схемы видно, что перед валком сила натяжения полимерной пленки равна  $T_0$ , а после валка минимальная  $T_1$ .

Текущая сила натяжения полимерной пленки на валке  $T$  рассчитывается по формуле Эйлера [6]:

$$T = T_1 e^{f\varphi}, \quad (1)$$

где  $T_1$  – сила натяжения полимерной пленки после приемно-охлаждающего валка, которая не может быть больше напряжения упругости согласно закону Гука ( $T_1 \leq T_{Гука}$ );  $f$  – коэффициент трения полимерной пленки о приемно-охлаждающий валок;  $\varphi$  – текущий угол обхвата пленкой приемно-охлаждающего валка;  $\varphi_{зад}$  – заданный угол обхвата приемно-охлаждающего валка полимерной пленкой.

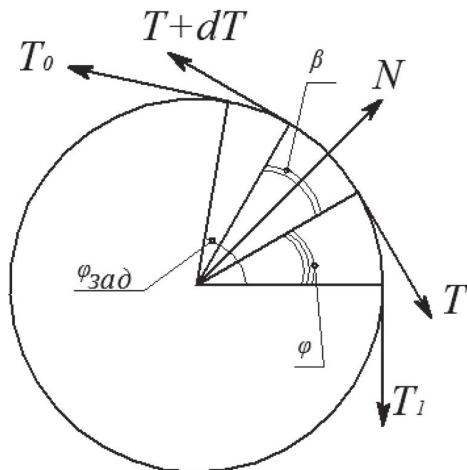


Рис. 1. Схема действия сил на полимерную пленку на приемно-охлаждающем валке

Сила трения полимерной пленки о приемно-охлаждающий валок будет определяться по формуле:

$$F_{mp} = N \cdot f, \quad (2)$$

где  $N$  – нормальная составляющая действия сил натяжения полимерной пленки.

В свою очередь, нормальная составляющая рассчитывается по формуле (рис.1):

$$N = (T + dT) \cdot \sin \frac{\beta}{2} + T \cdot \sin \frac{\beta}{2} = \sin \frac{\beta}{2} \cdot (2T + dT), \quad (3)$$

где  $\beta$  – текущий угол обхвата полимерной пленкой приемно-охлаждающего валка.

Подставляя формулу (3) в (2), получаем:

$$F_{mp} = f \cdot \sin \frac{\beta}{2} \cdot (2T + dT). \quad (4)$$

Согласно (4) эпюра распределения сил трения полимерной пленки на валке будет иметь следующий вид (рис. 2).

Подставляя формулу (1) в (4) и пренебрегая малой величиной  $dT$ , получим обобщенную формулу для определения силы трения полимерной пленки о приемно-охлаждающий валок:

$$F_{mp} = f \cdot \sin \frac{\varphi_{зад} - \varphi}{2} \cdot (T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi_{зад}} + T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi}). \quad (5)$$

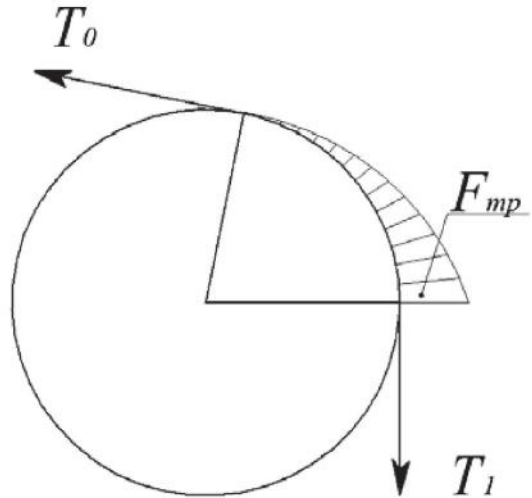


Рис. 2. Эпюра распределения сил трения полимерной пленки на приемно-охлаждающем валке

Так как поперечная сила, которая стягивает полимерную пленку, в два раза меньше силы растяжения пленки [1–5, 7], имеем:

$$F_{cm} = \frac{T - T_{Гука}}{2} \cdot \frac{b}{b_0}, \quad (6)$$

где  $b_0, b$  – начальная и текущая ширина полимерной пленки соответственно.

Подставляя формулу (1) в формулу (6), получим:

$$F_{cm} = \frac{T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi} - T_{Гука}}{2} \cdot \frac{b}{b_0}. \quad (7)$$

В точке, где текущее значение натяжения полимерной пленки  $T < T_{Гука}$ , поперечная стягивающая сила будет  $F_{cm} = 0$ .

На рис. 3 показана схема действия сил в произвольной точке на краю полимерной пленки, которая расположена на приемно-охлаждающем валке.

Проекция всех сил на ось  $Ox$  будет равняться  $\sum F_x = 0$ . Тогда получим:

$$F_{cm} + T \cdot \sin \theta = F_{mp} + T \cdot \sin(\theta + d\theta), \quad (8)$$

где  $\theta$  – угол действия растягивающей силы;  $\theta + d\theta$  – угол действия растягивающей силы в направлении плоскощелевой головки.

Из уравнения (8) находим дополнительный угол  $d\theta$ :

$$d\theta = \arcsin \frac{F_{cm} + T \cdot \sin \theta - F_{mp}}{T} - \theta. \quad (9)$$

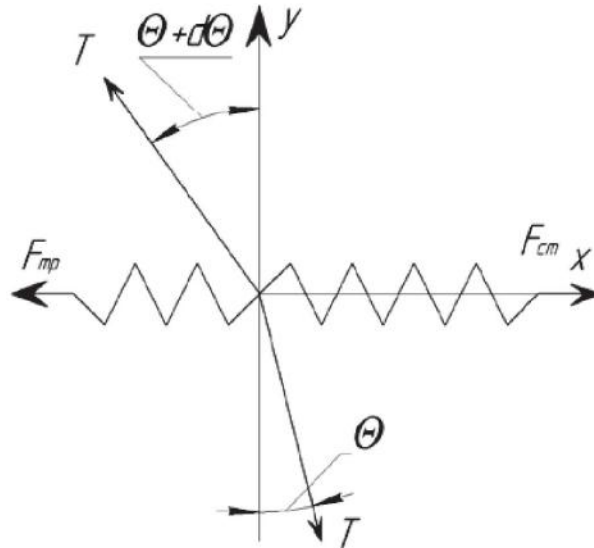


Рис. 3. Схема действия сил в произвольной точке на краю пленки, которая расположена на приемно-охлаждающем валке

Подставляя формулы (5) и (6) в формулу (9), получим дифференциальное уравнение первого порядка:

$$d\theta = \arcsin \frac{T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi} - T_{Гука} \cdot \frac{b}{b_0} + T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi} \cdot \sin \theta - f \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot (T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi_{зад}} + T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi})}{T_1 \cdot e^{f \cdot \varphi}} - \theta, \quad (10)$$

где  $\varphi_{зад}$  – заданный угол охвата полимерной пленкой приемно-охлаждающего валка;  $\varphi$  – текущий угол в радианах;  $\theta$  – угол наклона края полимерной пленки.

Учитывая, что в формулу (10) входит текущий угол  $\theta$ , определим его из начальных условий. Известно, что при  $F_{mp} > F_{cm}$  угол наклона края полимерной пленки равен нулю –  $\theta = 0$ .

Тогда расчет начинаем с точки A (рис. 4), в которой полимерная пленка выходит с приемно-охлаждающего валка. Следует отметить, что в точке A неизвестна конечная ширина полимерной пленки  $b$ .

Поэтому конечную ширину пленки  $b$  будем искать с точностью менее 1 мм методом дихотомии [8], задаваясь максимальной и минимальной шириной полимерной пленки после приемно-охлаждающего валка. Ширина полимерной пленки должна быть такой, чтобы выходящий из точки B край полимерной пленки под рассчитанным начальным углом  $\theta_{нач}$  попал в конец плоскощелевой головки – в точку C (ширина пленки на выходе из плоскощелевой головки  $b_0$ ). Этот метод в вычислительной математике называют методом «стрельбы» [8].

Исходная ширина полимерной пленки рассчитывается по формуле:

$$b_0 = b_{нач} + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \theta_{нач}, \quad (11)$$

где  $b_{нач}$  – начальная ширина полимерной пленки при ее касании охлаждающего валка;  $\theta_{нач}$  – угол,

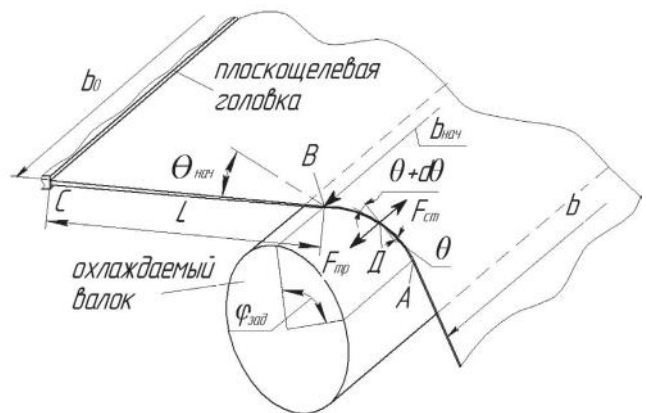


Рис. 4. Схема вытягивания полимерной пленки между плоскощелевой головкой и приемно-охлаждающим валком

который создает край полимерной пленки при ее касании охлаждающего валка в направлении к плоскощелевой головке.

Для нахождения конечной ширины полимерной пленки по уравнениям (10), (11) была разработана блок-схема и программа, которая позволяет рассчитывать ширину полимерной пленки вдоль оси ее вытягивания.

На основании результатов, рассчитанных по программе, построена зависимость конечной ширины полимерной пленки на приемно-охлаждающем валке в зависимости от расстояния от плоскоще-

левой головки (рис. 5). Из рисунка видно, что на участке между плоскощелевой головкой и приемно-охлаждающим валком ширина полимерной пленки линейно уменьшается, а на валке ширина пленки уменьшается по экспоненте.

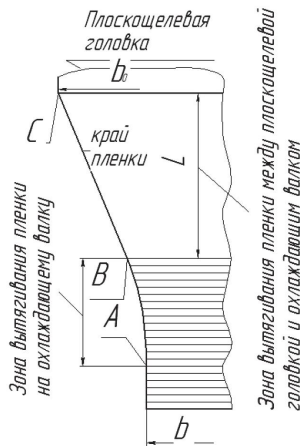


Рис. 5. Изменение расчетной ширины полимерной пленки вдоль оси вытягивания

Расчеты показали, что ширина полимерной пленки значительно зависит от коэффициента ее трения о приемно-охлаждающий валок. Из рис. 6 видно, что ширина полимерной пленки линейно уменьшается с ростом коэффициента ее трения о приемно-охлаждающий валок и ростом его диаметра.

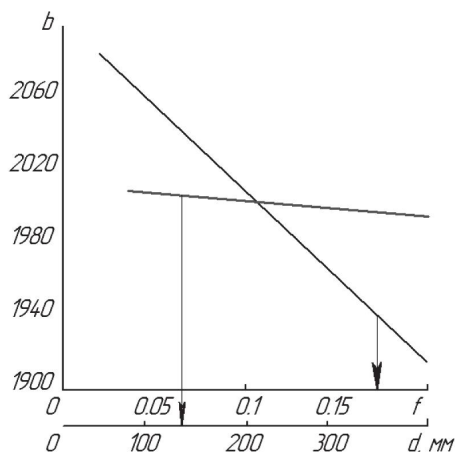


Рис. 6. График зависимости ширины полимерной пленки от коэффициента ее трения ( $f$ ) и диаметра охлаждающего валка ( $d$ )

Таким образом, предложенная математическая модель может быть использована для определения ширины полимерной пленки, производимой плоскощелевым методом, в зависимости от геометрических параметров установки (расстояния  $L$  от головки до

приемно-охлаждающего валка и его диаметра  $d$ ).

#### Список литературы

1. Бакалов О.В. Моделирование процессов получения полимерной пленки в плоскощелевой головке [Текст] / О.В. Бакалов, П.И. Чередниченко, В.Г. Бакалов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 66–72.

2. Бакалов О.В. Экспериментальне дослідження руху полімеру в плоскощільній головці [Текст] / О.В.Бакалов, П.І.Чередніченко, В.Г.Бакалов // Сб. науч. докладов VI Межд. конф. «Техника и технология хімволокна». – Чернігов, 2007. – С. 102–104.

3. Чередніченко П.І. Моделювання процесу руху полімеру у плоскощільній головці [Текст] / П.І. Чередніченко, В.Г. Бакалов, О.В. Бакалов // Математичні машини і системи. Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, 2009. – № 1. – С. 150–158.

4. Чередніченко П.І. Плоскощільні головки для ламінування матеріалів. Конструкція, розрахунок, проектування [Текст] / П.І. Чередніченко, В.Г. Бакалов, О.В. Бакалов. – Чернігов: ЧДТУ, 2009. – 141 с.

5. Белозеров Б.П. Методология создания и конструирования машиностроительных изделий [Текст] / Б.П. Белозеров, В.Л. Бирик, А.Б. Ефременков, В.Г. Бакалов. – Чернігов: ЧНТУ, 2014. – 215 с.

6. Чередніченко П.І. Машини для формування хімічних волокон і ниток із розчинів полімерів. Конструкція, розрахунок і проектування [Текст] / П.І. Чередніченко, В.Г. Бакалов. – Чернігов: ЧДТУ, 2008. – 156 с.

7. Шаповал В.М. Механика элонгационного течения полимеров [Текст] / В.М. Шаповал. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.

8. Турчак Л.И. Основы численных методов [Текст] / Л.И. Турчак. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с.

#### References

1. Bakalov O.V. Modelirovanie processov poluchenija polimernoj plenki v ploskoshhelevoj golovke [Tekst] / O.V. Bakalov, P.I. Cherednichenko, V.G. Bakalov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekxy i sistemy. – 2013. – T. 9. – № 3. – S. 66–72.

2. Bakalov O.V. Eksperimental'ne doslidzhennja ruhu polimeru v plosko-shhilinnij golovci [Tekst] / O.V. Bakalov, P.I. Cherednichenko, V.G. Bakalov // Sb. nach. dokladov VI Mezhd. konf. «Tehnika i tehnologija himvolokon». – Chernigov, 2007. – S. 102–104.

3. Cherednichenko P.I. Modeljuvannja procesu ruhu polimeru u plosko-shhilinnij golovci [Tekst] / P.I. Cherednichenko, V.G. Bakalov, O.V. Bakalov



// Matematichni mashini i sistemi. Institut problem matematichnih mashin i sistem NAN Ukraïni. – 2009. – № 1. – S. 150–158.

4. *Cherednichenko P.I.* Plaskoshhilinni golovki dlja laminuvannja materialiv. Konstrukcija, rozrahunok, proektuvannja [Tekst] / P.I. Cherednichenko, V.G. Bakalov, O.V. Bakalov. – Chernigov: ChDTU, 2009. – 141 s.

5. *Belozеров B.P.* Metodologija sozdanija i konstruirovanija mashino-stroitel'nyh izdelij [Tekst] / B.P. Belozеров, V.L. Bibik, A.B. Efremenko, V.G. Bakalov. – Chernigov: ChNTU, 2014. – 215 s.

6. *Cherednichenko P.I.* Mashini dlja formuvannja himichnih volokon i nitok iz rozchiniv polimeriv. Konstrukcija, rozrahunok i proektuvannja [Tekst] / P.I. Cherednichenko, V.G. Bakalov. – Chernigov: ChDTU, 2008. – 156 s.

7. *Shapoval V.M.* Mehanika jelongacionnogo techenija polimerov [Tekst] / V.M. Shapoval. – M.: Fizmatlit, 2007. – 176 s.

8. *Turchak L.I.* Osnovy chislennyh metodov [Tekst] / L.I. Turchak. – M.: Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987. – 320 s.



**Зикий А.Н.**  
**Zikiy A.N.**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
АО «ТНИИС»,  
Россия, г. Таганрог



**Зламан П.Н.**  
**Zlaman P.N.**

ведущий инженер-конструктор  
Научно-конструкторского бюро «Моделирующие и управляющие системы»,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
Россия, г. Таганрог



**Пленкин А.П.**  
**Pljonkin A.P.**

аспирант кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
Россия, г. Таганрог



**Фадеева А.С.**  
**Fadeeva A.S.**

студентка ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
Россия, г. Таганрог

УДК 621.396.6

## СТАЦИОНАРНЫЙ ПЕРЕДАТЧИК ПОМЕХ СОВРЕМЕННЫМ СРЕДСТВАМ СВЯЗИ

Стационарные передатчики помех широко используются службами безопасности для обеспечения конфиденциальности переговоров и совещаний. Рассмотрены структура, результаты измерения мощности и спектра на выходах четырехканального передатчика помех импортного производства. На рынке России представлено значительное количество моделей передатчиков помех современным средствам связи – GSM-900, GSM-1800, Wi-Fi, CDMA. Как правило, передатчик представляется вместе с паспортом, в котором крайне лаконично изложены основные параметры. Паразитные параметры, как правило, не указываются. К ним относятся:

- подавление гармоник основной частоты;
- неравномерность спектральной плотности в пределах одного канала;
- неидентичность каналов по выходной мощности;

– стабильность мощности и спектра помехи во времени при разогреве усилителя мощности.

Нормативная база на такие передатчики, как правило, отсутствует или недоступна потребителю, поэтому экспериментальное исследование передатчика помех является актуальным.

Целью работы является экспериментальное исследование энергетических и спектральных характеристик четырехканального передатчика помех.

Объектом исследования является серийный передатчик помех импортного производства.

*Ключевые слова:* сотовая связь, мобильная связь, беспроводной доступ, стационарный передатчик помех, скользящая помеха, спектры помех, эксперимент.

## STATIONARY NOISE JAMMER AGAINST MODERN COMMUNICATION FACILITIES

For ensure confidentiality of negotiations and conference security services widely use stationary noise jammer. The structure, results of measurement of power and output specter of four-channel import made noise jammer are considered. In Russia on market fair quantity of models of noise jammer against modern communication facilities – GSM-900, GSM-1800, Wi-Fi, CDMA are presented. As a rule, noise jammer is presented with its certificate containing critical parameters quite compact view. Parasitic parameters are not presented generally. These parameters are :

- basic frequency harmonic attenuation;
- ripple of spectral density within single channel;
- nonidentity of channels for output power;
- stability of power and specter of jamming of time under heating power amplifier.

Documentation for similar noise jammer is not available for user, as a rule; therefore experimental research of noise jammer is actual.

The intent of this article is experimental research of power and spectral characteristics of four-channel noise jammer.

The object of research is commercial four-channel import made noise jammer.

*Key words:* cellular communications, mobile communication, wireless local loop, stationary noise jammer, wobbler, specters of jamming, experiment.

Фото передатчика сверху со снятой крышкой приведено на рисунке 1. Структурная схема передатчика помех приведена на рисунке 2.

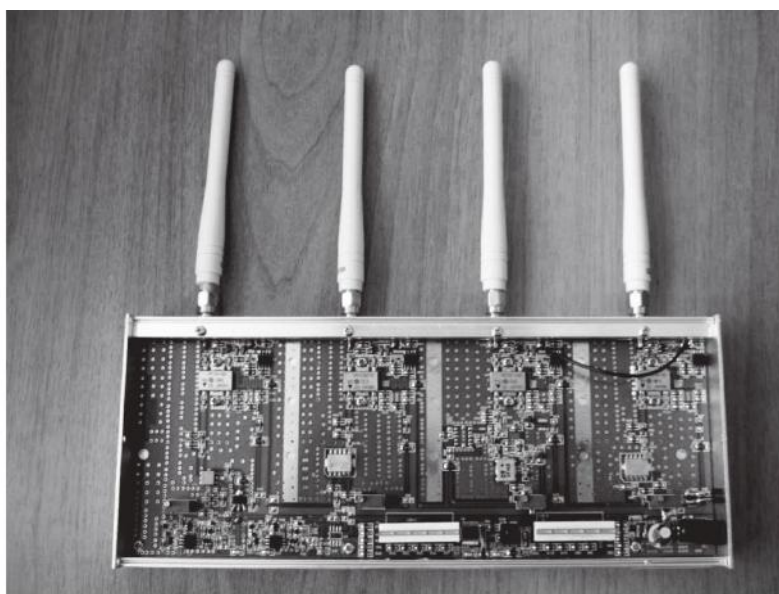


Рис. 1. Вид передатчика сверху со снятой крышкой



Рис. 2. Структурная схема передатчика помех

Целью данного исследования является измерение спектральных и энергетических характеристик передатчика помех.

Измерение спектров помех на выходах передатчика проводилось на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 3.

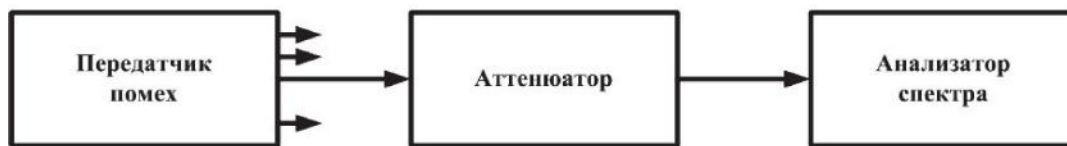
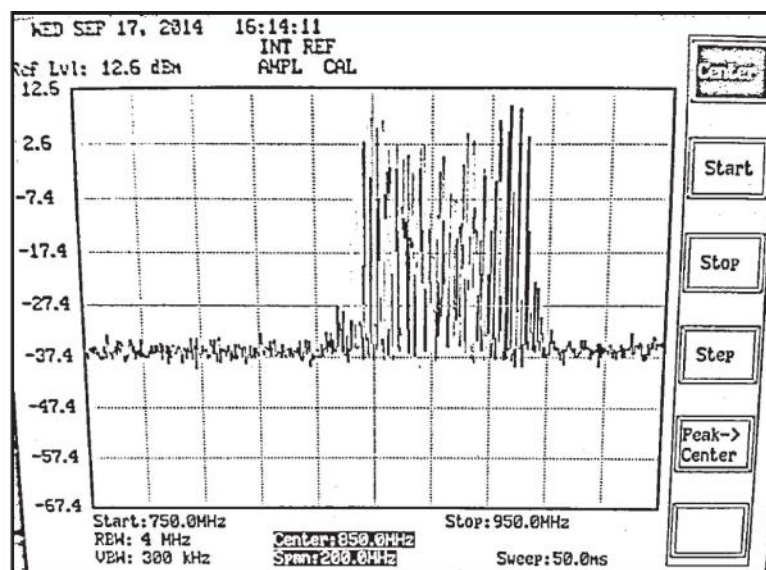


Рис. 3. Структурная схема измерительного стенда

В первом эксперименте проводилось подключение к выходу CDMA передатчика. Спектр на этом выходе показан на рисунке 4. Из этого рисунка вид-

но, что центральная частота спектра более 870 МГц, а ширина спектра около 75 МГц.

Рис. 4. Спектр сигнала на выходе CDMA ( $f_c=870$  МГц,  $\Delta f=75$  МГц)

Во втором эксперименте проводились измерения на выходе GSM (рисунок 5). На этом рисунке

видно, что центральная частота спектра около 970 МГц, а ширина спектра около 50 МГц.

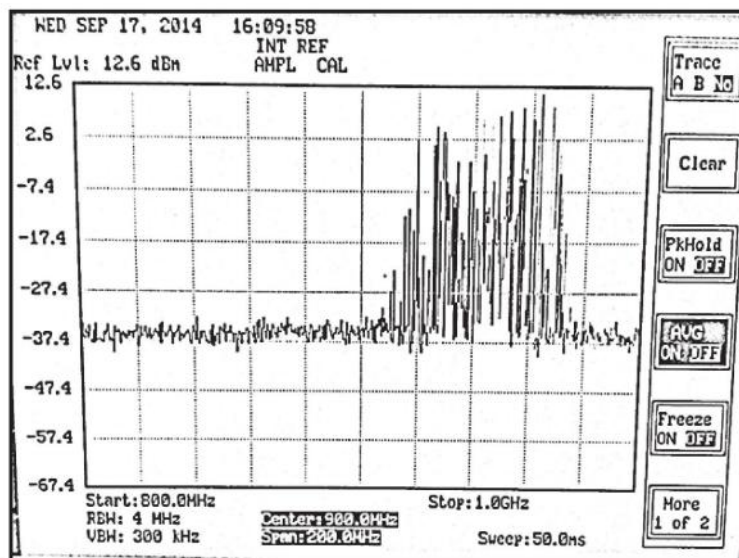


Рис. 5. Спектр сигнала на выходе GSM ( $f_c=970$  МГц,  $\Delta f=50$  МГц)

В третьем эксперименте анализатор спектра был подключен к выходу DCS. Спектр помехи на этом выходе изображен на рисунке 6. Из рисунка видно,

что центральная частота спектра около 1850 МГц, а ширина спектра примерно равна 95 МГц.

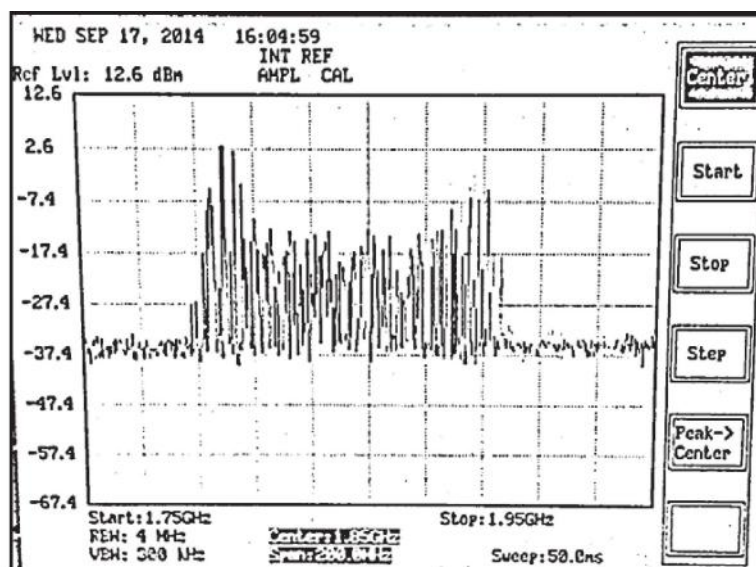


Рис. 6. Спектр сигнала на выходе DCS ( $f_c=1850$  МГц,  $\Delta f=95$  МГц)

Четвертый эксперимент заключался в том, что анализатор спектра подключили к выходу 3G передатчика помех. Спектр помехи виден на рисунке 7.

Из этого рисунка можно сделать заключение, что центральная частота спектра равна 2140 МГц, а ширина спектра составляет примерно 75 МГц.

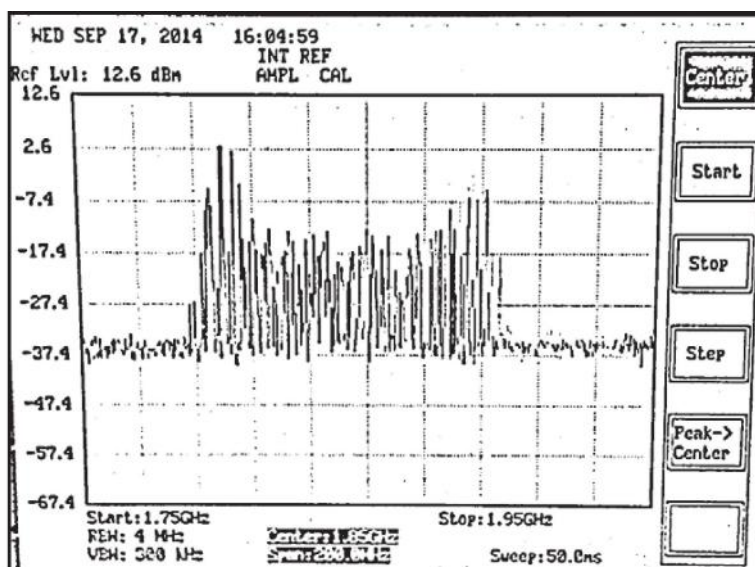


Рис. 7. Спектр сигнала на выходе 3G ( $f_c=2140$  МГц,  $\Delta f=75$  МГц)

В пятом эксперименте измерялась мощность на четырех выходах передатчика с помощью измерителя мощности типа Boonton 4231A. Для предотвращения выгорания детекторной головки измерителя

мощности использовался аттенуатор 13 дБ. Результаты измерения и расчета мощности занесены в таблицу.

Таблица

#### Результаты измерения мощности

Выход	Измеренная выходная мощность, дБм	Рассчитанная выходная мощность, дБм
CDMA	21.13	34.16
3G	18.76	31.76
GSM	19.95	33.0
DCS	18.68	31.68

#### Выводы

1. Мощность помехи на выходах CDMA и GSM превышает 2 Вт, а на выходах 3G и DCS превышает 1 Вт.

2. Спектр помехи покрывает полезные сигналы систем связи и при достаточной дальности позволяет их подавить.

3. Мощность передатчика, исследованного в данной работе, существенно больше, чем у описанного в [2], что позволяет блокировать сотовую связь на большей территории.

#### Список литературы

1. Хорев А.А. Подавители сотовой связи и беспроводного доступа [Текст] / А.А. Хорев // Защита информации. Inside. – 2012. – № 1. – С. 8–19.

2. Зикий А.Н. Портативный передатчик помех современным средствам связи [Текст] / А.Н. Зикий, Е.С. Котиков, Р.Н. Матвиенко // Вопросы специальной радиоэлектроники, серия «Общие вопросы

радиоэлектроники». – 2014. – № 2. – С. 70–73.

3. Зикий А.Н. Пятиоктавный синтезатор частот [Текст] / А.Н. Зикий, П.Н. Зламан, Д.В. Власенко // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 4. – Т. 9. – С. 31–36.

#### References

1. Horev A.A. Podaviteli sotovoj svjazi i besprovodnogo dostupa [Tekst] / A.A. Horev // Zashhita informacii. Inside. – 2012. – № 1. – S. 8–19.

2. Zikij A.N. Portativnyj peredatchik pomeh sovremennym sredstvam svjazi [Tekst] / A.N. Zikij, E.S. Kotikov, R.N. Matvienko // Voprosy special'noj radiojelekttroniki, serija «Obshhie voprosy radiojelekttroniki». – 2014. – № 2. – S. 70–73.

3. Zikij A.N. Pjatioktavnyj sintezator chastot. [Tekst] / A.N. Zikij, P.N. Zlaman, D.V. Vlasenko // Jelektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. – 2013. – № 4. – T. 9. – S. 31–36.



**Ахметов И.В.**  
**Akhmetov I.V.**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информатика и ИКТ» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа



**Губайдуллин И.М.**  
**Gubaydullin I.M.**

доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории математической химии Института нефтехимии и катализа РАН, Россия, г. Уфа



**Коледина К.Ф.**  
**Koledina K.Ph.**

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории математической химии Института нефтехимии и катализа РАН, Россия, г. Уфа



**Сафин Р.Р.**  
**Safin R.R.**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа

УДК 519.62

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА АРОМАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Разработан метод поиска кинетических параметров, основанный на многоядерных вычислительных системах и позволяющий сократить сроки исследования и освоения новых каталитических процессов. Разработанной кинетической моделью синтеза бензилиденбензиламина взаимодействием бензиламина с четыреххлористым углеродом под действием  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  доказана перспективность использования нового метода решения обратных задач химической кинетики для построения кинетических моделей сложных реакций металлокомплексного катализа. На основе кинетической модели определены условия, при которых достигается максимальный выход целевого продукта. Выявлена универсальность разработанного алгоритма; показано одно из главных преимуществ одновременно проводимых натуральных и вычислительных экспериментов – возможность планирования экспериментальных исследований; определены кинетические параметры для важной реакции синтеза ароматических соединений, описывающие экспериментальные данные в пределах погрешности количественного анализа. Разработан программный продукт для построения кинетических моделей химических реакций на основе многоядерных систем; определены перспективы использования построенного метода решения обратных задач химической кинетики для идентификации сложных механизмов реакций металлокомплексного катализа.

*Ключевые слова:* обыкновенные дифференциальные уравнения, кинетическая модель, закон действующих масс, константы скорости реакции, энергии активации, оптимизация процесса, ароматические соединения.

## MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION FUSION REACTIONS AROMATIC COMPOUNDS

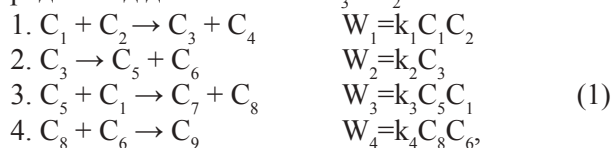
A method for the search of the kinetic parameters based on multi-core computing systems and allows to reduce the time the research and development of new catalytic processes. The kinetic model of synthesis benzilidenbenzilamina reacting benzylamine with carbon tetrachloride under the influence of  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

proved promising use of a new method for solving inverse problems of chemical kinetics for the construction of kinetic models of complex reactions of metal complex catalysis. On the basis of kinetic model describes the conditions under which the maximum yield of the desired product. Revealed the versatility of the algorithm; It shows one of the main advantages of simultaneous natural and computational experiments - the possibility of planning experimental studies; The kinetic parameters for the reactions of synthesis of important aromatics describing the experimental data within the accuracy of quantitative analysis. The software product for the construction of kinetic models of chemical reactions on the basis of core systems; identified prospects of construction of methods for solving inverse problems of chemical kinetics for the identification of complex reaction mechanisms of metal complex catalysis.

*Key words:* ordinary differential equations, kinetic model, the law of mass action, the reaction rate constant, activation energy, process optimization, aromatics.

Настоящая работа посвящена разработке кинетической модели реакции синтеза представителя ароматических соединений – бензилиденбензиламина – взаимодействием бензиламина с четыреххлористым углеродом под действием  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и определению условий проведения химической реакции для получения максимального выхода целевого продукта.

На основе анализа экспериментальных данных [1] предложена следующая схема химических превращений реакции синтеза бензилиденбензиламина взаимодействием бензиламина с четыреххлористым углеродом под действием  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ :



где  $C_i$  – концентрации компонентов, моль/л:  $C_1 = \text{C}_7\text{H}_9\text{N}$  – бензиламин,  $C_2 = \text{CCl}_4$  – четыреххлористый углерод,  $C_3 = \text{C}_7\text{H}_8\text{NCl}$  – хлорбензиламин,  $C_4 = \text{CHCl}_3$  – хлороформ,  $C_5 = \text{C}_7\text{H}_7\text{N}$  – 1-фенилметанимин,  $C_6 = \text{HCl}$  – хлористый водород,  $C_7 = \text{C}_{14}\text{H}_{13}\text{N}$  – бензилиденбензиламин,  $C_8 = \text{NH}_3$  – аммиак,  $C_9 = \text{NH}_4\text{Cl}$  – хлористый аммоний;  $W_j$  – скорость  $j$ -й реакции, моль/(л·ч);  $k_j$  – кинетическая константа скорости  $j$ -й реакции, л·моль<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup> ( $j = 1, 3, 4$ ), ч<sup>-1</sup> ( $j = 2$ ).

Кинетические уравнения схемы превращений (1) проанализированы в рамках закона действующих масс. Корректным описанием лабораторного реактора с мешалкой является модель идеального смешения.

Суммарный баланс изотермического реактора идеального смешения для  $i$ -го компонента в элементе объема реактора ( $\Delta V$ ) для варианта, когда мольная плотность газа или жидкости (или суммарная концентрация  $C$ , кмоль/м<sup>3</sup>) изменяется во времени, т. е. когда реакция протекает с изменением числа молей, определяется за счет изменения:

$$\begin{aligned} &\text{– было в момент времени } (t): C_i(t) \cdot \Delta V = C(t) \cdot \\ &X_i(t) \cdot \Delta V; \\ &\text{– стало в момент времени } (t+\Delta t): C_i(t+\Delta t) \cdot \Delta V = \\ &C(t+\Delta t) \cdot X_i(t+\Delta t) \cdot \Delta V; \\ &\text{– изменилось за время } (\Delta t) \text{ за счет химических} \\ &\text{реакций: } \left( \sum_{j=1}^J v_{ij} W_j \right) \cdot \Delta V \cdot \Delta t, \end{aligned}$$

где  $X_i = C_i/C$  – концентрация  $i$ -го компонента в мольных долях.

Тогда материальный баланс изотермического реактора идеального смешения описывается уравнением:

$$C(t) \cdot X_i(t) \cdot \Delta V - C(t+\Delta t) \cdot X_i(t+\Delta t) \cdot \Delta V + \left( \sum_{j=1}^J v_{ij} W_j \right) \cdot \Delta V \cdot \Delta t = 0$$

или

$$C(t) \cdot X_i(t) - C(t+\Delta t) \cdot X_i(t+\Delta t) + \left( \sum_{j=1}^J v_{ij} W_j \right) \Delta t = 0.$$

В пределе при  $\Delta t$ , стремящемся к нулю, получим систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{d(Cx_i)}{dt} = \sum_{j=1}^J v_{ij} W_j \quad (2)$$

с начальными условиями –  $t = 0: X_i = X_i^o, C = C_o$ .

Система уравнений (2) замыкается условием нормировки по компонентам реакционной среды:

$$\sum_{i=1}^J X_i = 1.$$

При кинетических исследованиях экспериментальные данные получают, как правило, в изотер-

мических условиях при постоянном давлении. Для газофазных реакций мольная плотность газа ( $C_o$ ) может быть рассчитана из уравнения состояния, например, уравнения Менделеева – Клапейрона для идеальных газов:  $PV = \frac{m}{M} RT = nRT$  или  $P = C_o RT$ ,  $C_o = P/(RT)$ , где  $C_o = \frac{m}{MV} = \frac{n}{V}$ .

Начальная мольная плотность жидкости ( $C_o$ ) постоянна при любых температурах.

Тогда, разделив (2) на  $C_o$ , получим систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{d(\bar{N}x_i)}{dt} = \sum_{j=1}^J v_{ij}\omega_j, \quad (3)$$

где  $\bar{N} = C/C_o$  – относительное изменение числа молей реакционной среды,  $\omega_j = W_j/C_o$  – приведенные скорости химических реакций.

Суммируя уравнения (3) с учетом условия нормировки, получим:

$$\frac{d\bar{N}}{dt} = F_N = \sum_{j=1}^J \omega_j \sum_{i=1}^I v_{ij}. \quad (4)$$

Продифференцировав уравнения (4), получим:

$$x_i \frac{d\bar{N}}{dt} + \bar{N} \frac{dx_i}{dt} = F_i = \sum_{j=1}^J v_{ij}\omega_j. \quad (5)$$

Умножим (4) на  $X_i$  и вычтем из (5). Тогда, с учетом правой части уравнения (4), получим систему дифференциальных уравнений материального баланса периодического реактора идеального смешения (6)–(7):

$$\frac{d\bar{N}}{dt} = F_N, \quad F_N = \frac{1}{V_o} \sum_{j=1}^J \delta_j \omega_j, \quad \delta_j = \sum_{i=1}^I v_{ij}, \quad (6)$$

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{F_i - X_i F_N}{\bar{N}} \quad (7)$$

с начальными условиями: при  $t = 0 - X_i = X_i^o$ ,  $\bar{N} = 1$ , где  $\bar{N} = C/C_o$  – относительное изменение числа молей реакционной смеси;  $C$  и  $C_o$  – мольная плотность и ее начальное значение, моль/л;  $X_i = C_i/C$  – концентрации компонентов, мольные доли;  $V_o$  – объем реакционного пространства, л;  $\omega_j = W_j/C_o$  – приведенные скорости реакций,  $ч^{-1}$ ;  $J$  – число стадий химического превращения;  $I$  – количество компонентов.

Правые части систем уравнений (6)–(7) для реакции синтеза бензилиденбензиламина реакцией бензиламина с четыреххлористым углеродом под действием  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  имеют следующий вид:  $F_1 = -\omega_1 - \omega_3$ ;  $F_2 = -\omega_1$ ;  $F_3 = \omega_1 - \omega_2$ ;  $F_4 = \omega_1$ ;  $F_5 = \omega_2 - \omega_3$ ;  $F_6 = \omega_2 - \omega_4$ ;  $F_7 = \omega_1$ ;  $F_8 = \omega_3 - \omega_4$ ;  $F_9 = \omega_4$ ;  $F_n = \omega_2 - \omega_4$ .

При решении обратной кинетической задачи в качестве критерия отклонения расчетных и экспери-

ментальных данных выбран следующий функционал [2]:

$$EE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left| X_{ij}^p - X_{ij}^e \right| \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $X_{ij}^p$  – расчетные значения концентраций наблюдаемых веществ, мольные доли;  $X_{ij}^e$  – экспериментально полученные значения концентраций наблюдаемых веществ, мольные доли;  $N$  – количество точек эксперимента;  $M$  – количество веществ реакции.

Для решения системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений (6)–(7) с начальными условиями при  $t = 0 - X_i = X_i^o$ ,  $\bar{N} = 1$  был выбран модифицированный метод Кутты – Мерсона пятого порядка точности.

Алгоритм решения системы дифференциальных уравнений  $\frac{dx}{dt} = f(x)$  требует пятикратного вычисления правых частей  $f(x)$ :

$$\begin{aligned} F_1 &= f(x_k) \cdot h, \\ F_2 &= f(x_k + F_1/3) \cdot h, \\ F_3 &= f(x_k + (F_1 + F_2)/6) \cdot h, \\ F_4 &= f(x_k + (F_1 + 3 \cdot F_2)/8) \cdot h, \\ x_{k+1} &= x_k + (F_1 - 3 \cdot F_2 + 4 \cdot F_4)/2, \\ F_5 &= f(x_{k+1}) \cdot h, \\ x_{k+1}^* &= x_k + (F_1 - 4 \cdot F_4 + 4 \cdot F_5), \end{aligned}$$

где  $h$  – шаг интегрирования по пространственной или временной координате;  $x_k$  – значения переменных в начале интервала интегрирования. В конце интервала интегрирования получаются два решения:  $x_{k+1}$  – методом Рунге – Кутты с точностью  $O(h^4)$  и  $x_{k+1}^*$  – методом Кутты – Мерсона с точностью  $O(h^5)$ .

Для математической идентификации кинетических моделей использовался программный комплекс ИАС ОЗХК [3] с современными технологиями высокопроизводительных вычислений [4], в котором для решения прямой кинетической задачи применялся модифицированный метод Кутта – Мерсона, а обратная задача решена генетическим алгоритмом [5].

Полученные в результате решения обратной задачи [6] численные значения констант скоростей стадий и энергий активации для синтеза бензилиденбензиламина приведены в таблице 1.



**Кинетические параметры для синтеза бензилиденбензиламина взаимодействием бензиламина с четыреххлористым углеродом под действием  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$**

Кинетические константы при температуре 23 °С, ч <sup>-1</sup>		E <sub>i</sub> , ккал/моль
K <sub>1</sub>	1.5×10 <sup>-2</sup>	10.6
K <sub>2</sub>	4.7	7.7
K <sub>3</sub>	13.4	1.6
K <sub>4</sub>	0.6	0.4

Константы (K<sub>i</sub>) являются некоторыми приведенными величинами, которые имеют размерность обратного времени и связаны с истинными константами (k<sub>i</sub>) соотношениями:

$K_1 = k_1 \cdot C_0$  (i=1, 3, 4), размерность k<sub>i</sub> (л·моль<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>);  
 $k_2 = K_2$  (ч<sup>-1</sup>).

В таблице 1 приведены константы при некоторой опорной температуре (T<sub>оп</sub>), в качестве которой выбрана T<sub>оп</sub>=23 °С, или 296 К. Пересчет констант для любой температуры производится через выбранную опорную температуру по формулам (9):

$$K_i(T) = K_i(T_{on}) \cdot \exp \left[ \frac{E_i}{RT_{on}} \left( 1 - \frac{T_{on}}{T} \right) \right];$$

$$K_i(T_{on}) = K_i^o \cdot \exp \left( - \frac{E_i}{RT_{on}} \right). \tag{9}$$

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для реакции синтеза бензилиденбензиламина приведено на рисунках 1 и 2, в таблице 2.

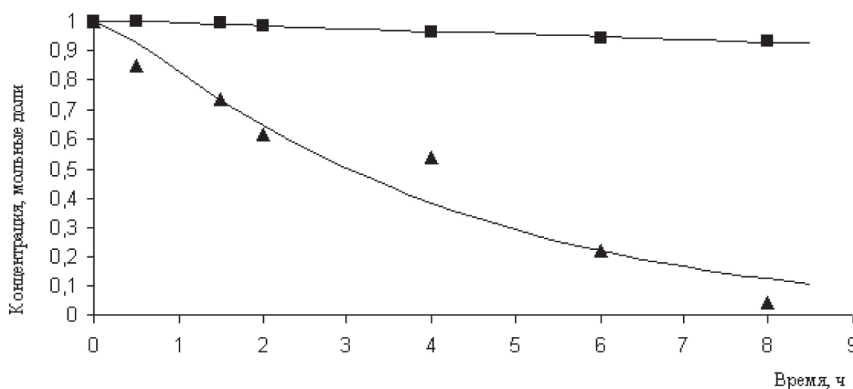


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные данные расхода бензиламина при температурах: 1 (■) – 23 °С; 2 (▲) – 85 °С

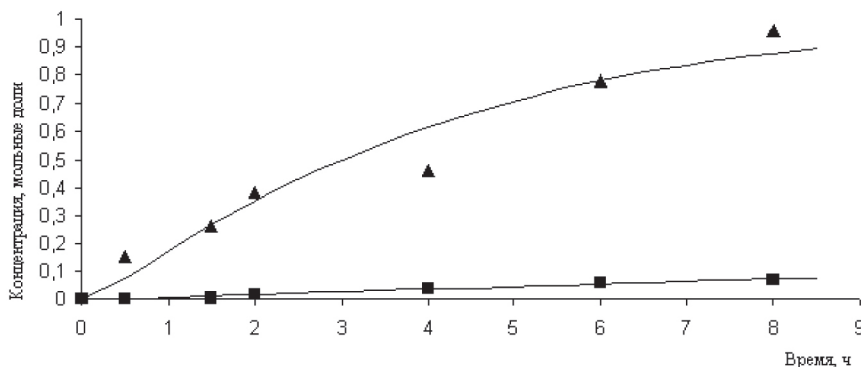


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные данные образования бензилиденбензиламина при температурах: 1 (■) – 23 °С; 2 (▲) – 85 °С

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для синтеза бензилиденбензиламина взаимодействием бензиламина с четыреххлористым углеродом под действием  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Температура опыта, °С	Время, ч	$X_1$ , мольные доли		$X_7$ , мольные доли	
		Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
23	0.5	1.0000	0.9983	0	0.0017
	1.5	0.9938	0.9894	0.0062	0.0106
	2.0	0.9844	0.9847	0.0156	0.0153
	4.0	0.9658	0.9658	0.0342	0.0342
	6.0	0.9437	0.9471	0.0563	0.0529
85	0.5	0.85	0.92	0.15	0.07
	1.5	0.74	0.73	0.26	0.27
	2.0	0.62	0.65	0.38	0.35
	4.0	0.54	0.38	0.46	0.62
	6.0	0.22	0.22	0.78	0.78
	8.0	0.04	0.12	0.96	0.88

Результаты вычислительных экспериментов по изменению выхода целевого продукта (бензилиденбензиламина,  $X_7$ ) в зависимости от соотношения  $X_1:X_2$  при пяти температурах приведены в таблице 3.

Таблица 3

Зависимость выхода целевого продукта от соотношения исходных веществ при температурах 23, 40, 60, 85, 100 °С

$X_1$ , мол. доли	$X_2$ , мол. доли	Выход $X_7$ , %мол. (23 °С)	Выход $X_7$ , %мол. (40 °С)	Выход $X_7$ , %мол. (60 °С)	Выход $X_7$ , %мол. (85 °С)	Выход $X_7$ , %мол. (100 °С)
0.45	0.55	6.3	16.2	39.8	80.6	95.4
0.40	0.60	6.9	17.8	43.7	85.5	97.5
0.37	0.63	7.2	18.7	46.0	87.9	98.3
0.35	0.65	7.4	19.3	47.5	89.0	98.7
0.30	0.70	8.0	20.8	51.1	92.3	99.3
0.25	0.75	8.5	22.3	54.6	94.5	99.6
0.10	0.90	9.7	25.7	62.6	97.6	99.9
0.05	0.95	6.3	24.8	61.3	97.1	99.8

В результате проведенных расчетов [7] найдено, что оптимальное соотношение исходных веществ, при которых выход продукта максимален:  $X_1:X_2=1:9$ .

Таким образом, построена кинетическая модель для реакции синтеза бензилиденбензиламина взаимодействием бензиламина с четыреххлористым углеродом под действием  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Проведен вычислительный эксперимент и най-

дены зависимости максимальных выходов целевых продуктов при вариации температуры реакции и соотношения исходных реагентов.

Найдено, что для получения максимального выхода бензилиденбензиламина наилучшее соотношение мольных концентраций исходных реагентов бензиламин : четыреххлористый углерод = 1:9.

## Список литературы

1. Хуснутдинов Р.И. Синтез N-бензилиден-бензиламина из бензиламина при действии железосодержащих катализаторов в CCl<sub>4</sub> [Текст] / Р.И. Хуснутдинов, А.Р. Байгузина, Р.И. Аминов // Журнал органической химии. – 2012. – Т. 48. – № 8. – С. 1063–1065.

2. Ахметов И.В. Разработка кинетической модели реакции получения метилового эфира 5-ацетил-2-пирролкарбоновой кислоты [Текст] / И.В. Ахметов, И.М. Губайдуллин, А.В. Балаев // Журнал Средневожского математического общества. – 2010. – Т. 12. – № 3. – С. 50–54.

3. Ахметов И.В. Разработка кинетических моделей с использованием параллельных вычислений на многоядерных системах [Текст] / И.В. Ахметов, И.М. Губайдуллин // Вестник Омского университета. – 2012. – № 2 (64). – С. 172–174.

4. Губайдуллин И.М. Современные технологии высокопроизводительных вычислений при моделировании детального механизма реакции каталитического гидроалюминирования олефинов [Текст] / И.М. Губайдуллин, К.Ф. Коледина, Ю.Б. Линд // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – № 6. – С. 10.

5. Губайдуллин И.М. Последовательно параллельное определение кинетических параметров [Текст] / И.М. Губайдуллин, К.Ф. Коледина, С.И. Спивак // Журнал Средневожского математического общества. – 2009. – Т. 11. – № 2. – С. 14–24.

6. Губайдуллин И.М. Автоматизированная система структурной и параметрической идентификации кинетических моделей химических реакций с участием металлоорганических соединений на основе базы данных кинетических исследований [Текст] / И.М. Губайдуллин, К.Ф. Коледина, Р.Р. Сафин // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 4 (58). – С. 10–16.

7. Ахметов И.В. Построение кинетических моделей химических реакций на основе многоядерных систем [Текст] / И.В. Ахметов, И.М. Губайдуллин // Журнал Средневожского математического общества. – 2012. – Т. 14. – № 3. – С. 38–42.

## References

1. Khusnutdinov R.I. Sintez N-benzilidenbenzilamina iz benzilamina pri deystvii zhelezosoderzhashchikh katalizatorov v CCl<sub>4</sub> [Tekst] / R.I. Khusnutdinov, A.R. Bayguzina, R.I. Aminov // Zhurnal organicheskoy khimii. – 2012. – T. 48. – № 8. – S. 1063–1065.

2. Akhmetov I.V. Razrabotka kineticheskoy modeli reaktsii poluche-niya metilovogo efira 5-atsetil-2-pirroldkarbonovoy kisloty [Tekst] / I.V. Akhmetov, I.M. Gubaydullin, A.V. Balaev // Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva. – 2010. – T. 12. – № 3. – S. 50–54.

3. Akhmetov I.V. Razrabotka kineticheskikh modeley s ispol'zovani-em parallel'nykh vychisleniy na mnogoyadernykh sistemakh [Tekst] / I.V. Akhmetov, I.M. Gubaydullin // Vestnik Omskogo universiteta. – 2012. – № 2 (64). – S. 172–174.

4. Gubaydullin I.M. Sovremennye tekhnologii vysokoproizvoditel'nykh vychisleniy pri modelirovanii detal'nogo mekhanizma reaktsii kataliticheskogo gidroalyuminirovaniya olefinov [Tekst] / I.M. Gubaydullin, K.F. Koledina, Yu.B. Lind // Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie. – 2011. – № 6. – S. 10.

5. Gubaydullin I.M. Posledovatel'noe parallel'noe opredelenie kineticheskikh parametrov [Tekst] / I.M. Gubaydullin, K.F. Koledina, S.I. Spivak // Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva. – 2009. – T. 11. – № 2. – S. 14–24.

6. Gubaydullin I.M. Avtomatizirovannaya sistema strukturnoy i parametricheskoy identifikatsii kineticheskikh modeley khimicheskikh reaktsiy s uchastiem metalloorganicheskikh soedineniy na osnove bazy dannykh kineticheskikh issledovaniy [Tekst] / I.M. Gubaydullin, K.F. Koledina, R.R. Safin // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. – 2014. – № 4 (58). – S. 10–16.

7. Akhmetov I.V. Postroenie kineticheskikh modeley khimicheskikh reaktsiy na osnove mnogoyadernykh sistem [Tekst] / I.V. Akhmetov, I.M. Gubaydullin // Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva. – 2012. – T. 14. – № 3. – S. 38–42.

# МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES



**Серенков П.С.**

**Serenkov P.S.**

*доктор технических наук,  
заведующий кафедрой «Стандартизация,  
метрология и информационные системы»,  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

УДК 389.1

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРИЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматривается вопрос обеспечения эффективности внутрилабораторного исследования методики выполнения измерений (МВИ) для целей оценивания и анализа неопределенности результатов измерений (испытаний).

Сформулирована оптимизационная задача – формирование программы исследований МВИ в рамках валидации или верификации с учетом затрат по критерию минимизации рисков.

Предложена двухэтапная программа исследований неопределенности результатов измерений, которая позволяет с наименьшими затратами на основе системного подхода идентифицировать с заданной степенью достоверности весь комплекс влияющих факторов.

На первом этапе рекомендуется использовать базовую статистическую модель по оценке точности результатов измерений, описанную в серии стандартов СТБ ИСО 5725. Причем в базовой модели прослеживаются две части, отличающиеся по объектам, подходам, методам: источники неопределенности результатов измерений, связанные с методом измерений, и источники, связанные с лабораторным смещением.

Обоснован комбинированный подход к планированию и реализации процесса измерения как более рациональный. Причем для исследования и анализа вклада смещения метода измерений в неопределенность результатов измерений рекомендован модельный подход в соответствии с GUM. Для исследования и анализа вклада лабораторного смещения в неопределенность результатов измерений рекомендован эмпирический подход в соответствии с ISO 5725.

На конкретном примере продемонстрирован алгоритм реализации программы. Предложен критерий достаточности «глубины» исследований метода в части оценивания неопределенности результата измерений. Таким критерием выступает соотношение вкладов лабораторного смещения в неопределенность результатов измерений и остаточной ошибки (стандартного отклонения в условиях повторяемости). Определен порог срабатывания критерия, при котором возникает необходимость второго этапа исследований.

На втором этапе исследований рекомендовано базовую статистическую модель по оценке точно-

сти результатов измерений расширить, применив модель в соответствии с ISO 21748:2010. Определены методы управления характеристиками точности МВИ, обеспечивающие в комплексе минимизацию затрат на проведении исследований.

*Ключевые слова:* эффективность, внутрилабораторные исследования, неопределенность результатов измерений, двухэтапная программа исследований, критерий достаточности исследований.

## THE EFFECTIVENESS ENSURING OF SINGLE LABORATORY RESEARCH OF MEASUREMENT RESULTS UNCERTAINTY

The problem of effectiveness ensuring of inter-laboratory study of measurement methods for the purposes of evaluation and analysis of the measurements results uncertainty is investigated.

The optimization task – the formation of a research program within the method validation or verification based on the criterion of minimizing the cost of risk is formulated.

A two-phase research program based on a systematic approach, which allows to identify the complex of influencing factors with a given degree of reliability is offered.

At the first stage it is recommended to use basic statistical model to assess the accuracy of the measurements described in a series of standards ISO 5725. In the base model are traced two parts that differ in the objects, approaches, methods: the sources of measurement uncertainty associated with the method bias and sources, connected with the laboratory bias.

The combined approach to the planning and implementation of the measurement process is substantiated as the most rational. For the study and analysis of the measurement method bias contribution to the uncertainty of measurements is recommended model approach in accordance with the GUM. For the study and analysis of the laboratory bias contribution to the uncertainty of measurements is recommended empirical approach in accordance with ISO 5725.

The particular example of the two-phase research program algorithm is shown. The adequacy criterion of the method uncertainty research «depth» is substantiated. That measure is the ratio of laboratory bias contribution to the uncertainty of measurements and residual error (standard deviation under repeatability conditions). Defined threshold criterion, in which there is need for a second phase of research.

At the second stage of research it is recommended to use expanded model of the method uncertainty according to ISO 21748: 2010. Define the controlling ways of method accuracy characteristics providing minimization of the research costs.

*Key words:* efficiency, inter-laboratory study, the uncertainty of the measurement results, a two-stage program of research, the criterion of the research adequacy.

### 1. Постановка задачи

Широкое признание концепции неопределенности в прикладной метрологии инициировало развитие новых наукоемких подходов, методов и средств по достижению максимальной эффективности измерений (испытаний), например, по критерию «точность/трудоемкость» при заданной степени доверия. Причем объектами инновационных подходов становятся все аспекты измерения как комплексного процесса: основной процесс (собственно процесс измерения), процессы планирования, обеспечения, анализа результатов.

Особенно это актуально в современных условиях в рамках верификации или валидации методик выполнения измерений (МВИ) в области медицины, фармацевтической, пищевой и других видов промышленности, для которых характерно в общем случае использование дорогостоящего как в при-

обретении, так и в обслуживании измерительного оборудования, стандартных образцов, расходных материалов, персонала высокой квалификации, особых условий измерений и т. д.

С другой стороны, высокий риск получения некорректного результата измерений (контроля, испытаний) может повлечь за собой значительные негативные последствия, связанные с жизнью и здоровьем людей, финансовыми и имиджевыми потерями в бизнесе и т. д.

Налицо оптимизационная задача – формирование программы исследований МВИ в рамках валидации или верификации с учетом затрат по критерию минимизации рисков.

Разработана и опробована двухэтапная программа внутрилабораторного исследования МВИ, отвечающая сформулированным критериям.

## 2. Первый этап программы внутрилабораторного исследования

### 2.1. Базовая статистическая модель и комбинированный подход к исследованию МВИ

На первом этапе рекомендуется использовать базовую статистическую модель по оценке точности результатов измерений, описанную в серии стандартов СТБ ИСО 5725. Базовая модель является фиксированной в части источников факторов, определяющих результат измерения, и предполагает, что результат измерений  $y$  является результатом комплексирования следующих компонентов модели:

$$y = t + B + e = \mu + (\delta + B) + e, \quad (1)$$

где  $t = \mu + \delta$  – общее среднее значение результата измерения (математическое ожидание);  $\mu$  – принятое эталонное значение;  $\delta$  – смещение метода измерений;  $(\delta + B) = \Delta$  – лабораторное смещение;  $B$  – лабораторная составляющая смещения;  $e$  – составляющая смещения, имеющая место при каждом измерении согласно условиям повторяемости;  $[(\delta + B) + e]$  – полное смещение результата измерения  $y$  от  $\mu$ .

Лабораторная составляющая смещения « $B$ » представляет в базовой модели отклонение результата измерений в лаборатории от « $t$ » безотносительно к составляющей смещения « $e$ », имеющей место в каждом результате измерений по фиксированному количеству возможных эффектов, вызванных сменой оператора ( $B_1$ ), сменой измерительного оборудования ( $B_2$ ), повторной калибровкой измерительного оборудования ( $B_3$ ), временем между измерениями ( $B_4$ ).

В свою очередь, вариация результата измерений в соответствии со следствием центральной предельной теоремы теории вероятности [2] опре-

деляется комплексированием соответствующих компонентов модели (1):

$$Var(y) = Var(\mu) + Var(\delta) + Var(B_1, B_2, B_3, B_4) + Var(e). \quad (2)$$

Основным и наиболее ресурсоемким предметом исследования МВИ в рамках валидации или верификации являются точностные характеристики метода. Можно сказать, что остальные характеристики (предел обнаружения, предел количественного определения, линейность, робастность и т. д.) основываются на точностных и во многом являются производными от них. В данной статье мы остановимся на особенностях исследования только точностных характеристик МВИ и, в частности, оценивания неопределенности результатов измерений.

**Первый аспект**, который следует принять к сведению, – базовую статистическую модель метода измерений (1) нельзя в общем случае рассматривать как однородное математическое выражение. На самом деле в ней четко прослеживаются две части, отличающиеся по объектам, подходам, методам: « $t$ » и « $(B+e)$ ». Первая характеризует вклад в результат измерения собственно метода, вторая – вклад лаборатории, реализующей метод.

*Примечание.* СТБ ИСО 5725-4 (раздел 5) рекомендует, что для отдельной лаборатории рационально исследовать лабораторную составляющую смещения « $B$ » в комплексе со смещением метода измерений « $\delta$ », т. е. лабораторное смещение « $\Delta = \delta + B$ ».

С учетом этого исследование МВИ в рамках валидации или верификации предполагает исследование двух объектов: собственно метода и лаборатории. В свою очередь, для каждого объекта следует оценить смещение и соответствующую неопределенность смещения (таблица 1).

Таблица 1

Структура комбинированного подхода к оценке неопределенности результата измерений при верификации

Объекты исследования МВИ	Вклад объекта исследования в результат измерений	Характеристики верификации МВИ		Рекомендуемый подход к исследованию и оценке
		Смещение	Неопределенность	
Собственно метод (безотносительно к конкретной лаборатории)	« $\mu$ »	-	« $u(\mu)$ »	модельный в соответствии с [3]
Лаборатория, реализующая метод	« $\Delta = (\delta + B)$ »	« $\Delta = (\delta + B)$ »	« $u(\Delta)$ »	эмпирический в соответствии с [4]
	« $e$ »	« $e$ »	« $u(e)$ »	
Результат измерений	$y = \mu + (\delta + B) + e$	« $(\delta + B + e)$ »	$u(y) = u(\mu) + u(\Delta) + u(e)$	комбинированный в соответствии с [5]

Наибольшее число методических вопросов возникает у лабораторий в отношении исследования и оценки неопределенности результата измерений  $u(y) = F[u(\mu), u(\Delta), u(e)]$  и ее отдельных составляющих в различных условиях: повторяемости, воспроизводимости, промежуточной прецизионности (таблица 1). Особенности исследования и оценки неопределенности результатов реализации МВИ в рамках отдельной лаборатории будут рассмотрены ниже. В данной статье не предполагается анализ подходов, методов и средств исследования и оценки смещения результата измерения и его составляющих.

**Второй аспект**, на котором следует сконцентрировать внимание, – выбор подхода исследования и оценки неопределенности. Сегодня известны три основных подхода: модельный [3], эмпирический [4] и комбинированный [5].

Наиболее рациональным признан хорошо зарекомендовавший себя в мировой практике **комбинированный** подход к планированию и реализации процесса измерения. Он предполагает, что различные компоненты сводной статистической модели измерений (1) определяются с помощью как модельного, так и эмпирического подхода [5].

Особенно комбинированный подход эффективен для исследования и оценки неопределенности результатов реализации МВИ в области химии, микробиологии, физики (таблица 1). Для этих видов измерений вклады « $\mu$ » и « $u(\mu)$ » в статистической модели результата измерений, как правило, представлены не в виде элементарного (в смысле единичного) значения, а разворачиваются в виде самостоятельных многопараметрических моделей. Поэтому для исследования и анализа вклада собственно метода должен быть применен модельный подход в соответствии с GUM [3].

*Пример 1.* В методиках измерения геометрических параметров деталей эталонное значение  $\mu \pm u(\mu)$  реализуется образцовой деталью или мерой (концевой мерой длины, угловой мерой, образцом шероховатости и т. п.) с заданными метрологическими характеристиками и представляется в статистических моделях результата измерений (1) и (2) единичными значениями « $\mu$ » и « $u(\mu)$ » соответственно.

*Пример 2.* В химических методах измерения количества вещества в растворе образцовый раствор заданной концентрации формируется путем многоступенчатого разбавления стандартного образца (например, порошка) в растворителе с использованием комплекса вспомогательного оборудования. Очевидно, что « $\mu$ » и « $u(\mu)$ » в статистических моделях результата измерений (1) и (2) должны быть представлены самостоятельными частными моделями, предполагающими наличие «факторов действия», «факторов субъективного оценивания». Аналогичная ситуация имеет место в физических, микробиологических и им подобных измерениях.

С другой стороны, вклады лаборатории « $(\delta + B + e)$ » и « $u(\delta + B + e)$ » в статистических моделях результата измерений (таблица 1) могут быть исследованы и оценены исключительно эмпирически, т. е. с помощью планирования и организации измерительного эксперимента, обработки и анализа его результатов в соответствии [4].

Таким образом, для исследования и оценивания неопределенностей в процессе внутрилабораторного исследования МВИ рационально применять комбинированный подход, включающий:

- модельный подход в отношении вкладов « $\mu$ » и « $u(\mu)$ »;
- эмпирический подход в отношении вкладов « $(\delta + B + e)$ » и « $u(\delta + B + e)$ ».

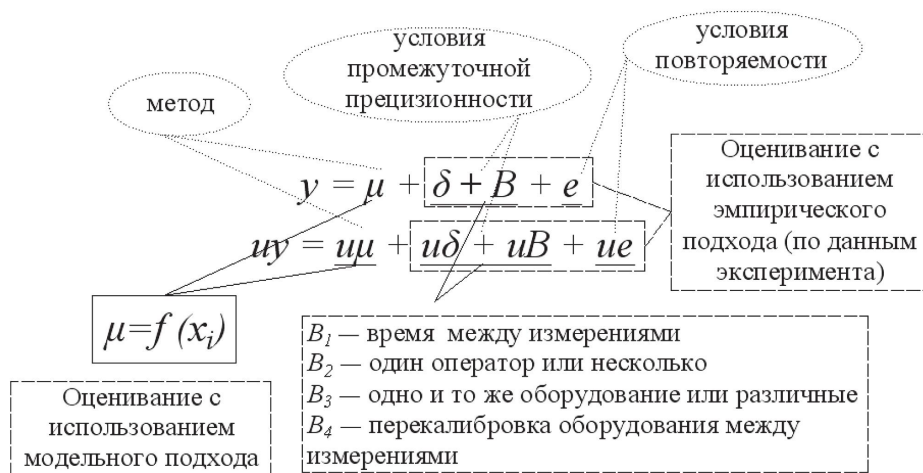


Рис. 1. Комбинированный подход к оцениванию неопределенности результата измерений в соответствии с базовой статистической моделью [4]

На конкретном примере продемонстрируем технологию исследования и оценки неопределенности результатов реализации МВИ в рамках отдельной лаборатории, которая отвечает критериям корректности, с одной стороны, и рациональности (минимизацией затрат) – с другой стороны.

*Задача.* Испытательная лаборатория предполагает аккредитоваться на право проведения испытаний строительных материалов на теплопроводность. Метод измерения теплопроводности стандартизирован. В качестве средства измерений был использован прибор НФМ 436. Прибор НФМ 436 имеет встроенный микропроцессор и работающий под управлением внутреннего программного пакета Q-Test.

Руководство лаборатории приняло решение провести внутрилабораторное исследование с целью оценки основных характеристик точности метода, в частности, оценки неопределенности результата измерения.

В соответствии с методом, реализуемым прибором НФМ 436, физическая модель теплопроводности представлена выражением:

$$\Delta\lambda = \lambda \cdot \left( \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta h}{h} - \frac{\Delta T}{T} \right) = \frac{\lambda}{N} \cdot \Delta N + \frac{\lambda}{V} \cdot \Delta V + \frac{\lambda}{h} \cdot \Delta h - \frac{\lambda}{T} \cdot \Delta T, \quad (4)$$

где  $\Delta\lambda$  – приращение значения теплопроводности образца  $\lambda$ ;  $\Delta N$ ,  $\Delta V$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta T$  – приращения (смещения) факторов, входящих в исходную физическую модель метода (3).

**Третий аспект** связан с корректной реализацией модельного подхода при исследовании метода в отношении оценки  $u(\mu)$ , которую в случае приведенного примера обозначим  $u(\mu\lambda)$ .

Типичной ошибкой при оценке  $u(\mu\lambda)$  является тот факт, что количество параметров исходной физической модели результата измерений  $\mu\lambda = f(x_j, x_p, i = 1, \dots, N$  отождествляют с количеством факторов –

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{N} \cdot \Delta N + \frac{\lambda}{V} \cdot \Delta V + \frac{\lambda}{h} \cdot \Delta h_{изм} + \frac{\lambda}{h} \cdot \Delta h_{h_1, h_2} - \frac{\lambda}{T} \cdot \Delta T_{изм} - \frac{\lambda}{T} \cdot \Delta T_{T_1, T_2}, \quad (5)$$

где дополнительными поправками выступают:

$\Delta h_{h_1, h_2}$  – поправка, обусловленная влиянием фактора «толщина образца», м;

$\Delta T_{T_1, T_2}$  – поправка, обусловленная влиянием фактора «средняя температура поверхностей образца», К.

Проверка значимости входных измеряемых параметров  $x_i$  модели результата измерений (5) (в

$$\lambda = N \cdot \frac{V \cdot h}{\Delta T}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $N$  – коэффициент калибровки, показывающий отношение сигнала датчика теплового потока к тепловому потоку через образец;  $\Delta T$  – разность температур в образце (разность температур верхней ( $T_g$ ) и нижней ( $T_n$ ) плит, формирующих тепловой поток), К;  $V$  – сигнал датчиков теплового потока, измеряющих напряжение, пропорциональное тепловому потоку, проходящему через образец, В;  $h$  – толщина образца, м.

*2.2. Исследование вклада составляющей « $\mu$ » в результат измерений с применением модельного подхода.*

Исходной для исследования состава и структуры стандартной неопределенности  $u(\mu)$  выступает физическая модель результата измерений  $\mu = f(x_j)$ .

Как следует из физической модели метода, теплопроводность  $\lambda$  (аналог « $\mu$ ») по сути – результат косвенного измерения параметров  $x_i$  ( $N, V, h, \Delta T$ ). Предполагая для оценки неопределенности  $u(\mu\lambda)$  использование метода относительных неопределенностей, рационально исходные модели типа (3) представлять в относительном виде:

источников неопределенностей в модели  $u(\mu\lambda) = F(u(x_j)), j = 1, \dots, M$ . Как правило, количество влияющих неопределенностей  $M$  больше, чем  $N$ . При этом носителями дополнительных неопределенностей являются параметры исходной модели, задаваемые как условия измерительного эксперимента (измеряемые или используемые как константы). С учетом вышеуказанной структура выражения исходной модели (4) может быть скорректирована.

В нашем случае скорректированная исходная модель (4) теперь, предположительно, будет иметь вид:

нашем случае  $\Delta T_{T_1, T_2}, \Delta h_{h_1, h_2}$ ) может быть произведена с помощью дисперсионного анализа (ANOVA), выполненного по результатам реализации специального плана эксперимента. Результаты ANOVA показали значимость дополнительных параметров (поправок) модели (5), что предполагает, что они так же, как и другие факторы, являются полноценными источниками частных неопределенностей.



На основании скорректированной модели (5) получили в соответствии с модельным подходом GUM корректную для первого этапа исследований

модель стандартной неопределенности результата измерения теплопроводности [3]:

$$u_{\mu_{\lambda}} = \frac{\lambda}{N} \cdot u(\Delta N) \vee \frac{\lambda}{V} \cdot u(\Delta V) \vee \frac{\lambda}{h} \cdot u(\Delta h_{изм}) \vee \frac{\lambda}{h} \cdot u(\Delta h_{h_1, h_2}) \vee \frac{\lambda}{T} \cdot u(\Delta T_{изм}) \vee \frac{\lambda}{T} \cdot u(\Delta T_{T_1, T_2}). \quad (6)$$

*Примечание.* Символ « $\vee$ » обозначает комбинирование стандартных неопределенностей, например, в соответствии с законом распространения неопределенностей GUM [3].

Результаты оценивания вкладов неопределенностей модели (6) представлены в виде бюджета неопределенности (таблица 2).

Таблица 2

**Бюджет неопределенности составляющей « $\mu$ » в результате измерений теплопроводности материала образца из минеральной ваты**

Входная величина	Единица измерения	Значение оценки	Интервал	Тип неопределенности	Распределение вероятностей	Стандартная неопределенность	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность, Вт/(м·К)
$\Delta V$	мкВ	0	$\pm 3$	<i>B</i>	прямоугольное	1,7	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
$\Delta h_{изм}$	м	0	$\pm 0,0005$	<i>B</i>	прямоугольное	0,0003	0,12	$3,6 \cdot 10^{-5}$
$\Delta h_{h_1, h_2}$	м	0	-	<i>A</i>	нормальное	0,0001	0,12	$1,2 \cdot 10^{-5}$
$\Delta T_{изм}$	°	0	$\pm 0,5$	<i>B</i>	прямоугольное	0,3	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
$\Delta T_{T_1, T_2}$	°	0	-	<i>A</i>	нормальное	0,0063	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
$u_{\mu_{\lambda}}$ , Вт/(м·К)						1,1·10 <sup>-3</sup>		

По результатам анализа бюджета неопределенностей можно сделать вывод, что наибольший вклад в неопределенность  $u$  ( $\mu_{\lambda}$ ) вносит составляющая  $\Delta T_{изм}$ .

**2.3. Исследование вклада составляющей « $(\delta + B + e)$ » в результат измерений с применением эмпирического подхода**

**Четвертый аспект** связан с рациональной организацией эмпирического подхода – планированием измерительного эксперимента в отношении исследования неопределенности, вносимой составляющей « $(\delta + B + e)$ », включающей лабораторное смещение « $(\Delta = \delta + B)$ » и остаточную ошибку « $e$ ». Именно данный аспект определяет основную долю затрат на проведение как верификации, так и валидации.

Планирование измерительного эксперимента

предполагает, в первую очередь, выбор плана эксперимента. Для данного вида исследований интерес представляют два вида планов: факторные и иерархические.

Иерархические планы эксперимента позволяют провести по результатам их реализации только дисперсионный анализ. Достоинство – значительно меньший объем исследований. Учитывая, что для подобного рода измерительных задач востребован, как правило, только дисперсионный анализ, выбор иерархических планов наиболее рационален.

Как правило, неопределенности, вносимые составляющими « $\delta$ ,  $B$ ,  $e$ » оцениваются одновременно в рамках реализации одного иерархического плана эксперимента по СТБ ИСО 5725-3 так, как представлено на рисунке 2.

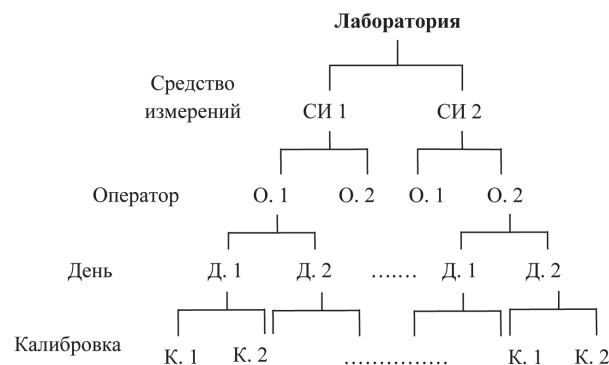


Рис. 2. Иерархический план измерительного эксперимента с полной группировкой

Результаты обработки экспериментальных данных по методикам СТБ ИСО 5725, включая технику ANOVA, отвечают на два вопроса:

- позволяют определить искомое значение  $u(\Delta)$  или  $u(\delta+B)$ ;
- позволяют определить остаточную вариацию результатов измерений  $u(e)$ .

**Пятый аспект** предполагает определение критериев достаточности (глубины) исследования метода в части оценивания неопределенности результата измерений.

Таким критерием может выступать соотношение вкладов « $u(\mu\lambda)$ », « $u(\Delta)$ » и « $u(e)$ » (смотри табл. 1).

В том случае, если « $u(\Delta)$ » значительно превышает « $u(e)$ », глубина исследований признается достаточной, доверие к результатам высоким, исследования останавливают.

Если же, наоборот, « $u(e)$ » превышает « $u(\Delta)$ », возникает необходимость в проведении второго этапа исследований, сопровождаемого, к слову, дополнительными расходами.

В примере измерения теплопроводности по результатам исследования была построена диаграмма, представленная на рисунке 3.

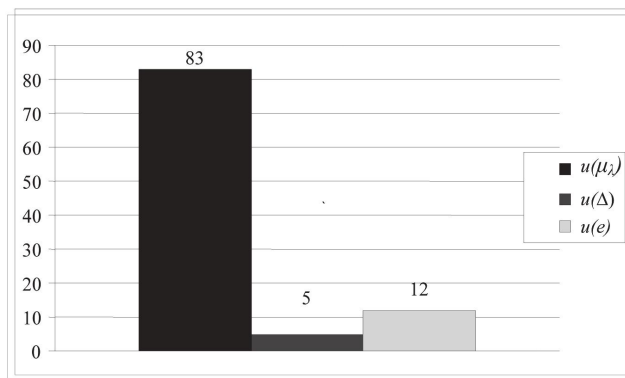


Рис. 3. Диаграмма вкладов составляющих неопределенности в суммарную неопределенность результатов измерений теплопроводности минеральной ваты

Из диаграммы следует, что наибольший вклад в суммарную неопределенность результатов измерений вносит составляющая метода « $u(\mu\lambda)$ », определенная ранее. В то же время вклад составляющей « $u(e)$ » больше вклада неопределенности лабораторного смещения « $u(\Delta)$ ». Это означает, что в ходе исследования **были выявлены не все значимые факторы, влияющие на результат измерений теплопроводности**, то есть в данном случае предложенная в [4] статистическая модель результатов измерений является неадекватной.

### 3. Второй этап программы внутрилабораторного исследования

Взамен базовой статистической модели на втором этапе следует рассмотреть более сложную модель следующего вида [6]:

$$y = m + B + \sum_{i=1}^M C_i x_i + e, \quad (6)$$

где  $\sum_{i=1}^M C_i x_i$  – факторы, влияющие на результат измерений, не учитываемые моделью, представленной в [4].

**Шестой аспект** – выбор стратегии дальнейших исследований метода, в случае если критерий указывает на недостаточную уверенность в результатах проведенного исследования.

Стратегия дальнейших исследований предполагает идентификацию, исследование и оценку дополнительных неизвестных факторов, представленных в модели (6) слагаемым  $\sum_{i=1}^M C_i x_i$ . Это можно осуществить, к примеру, с помощью рекомендаций, изложенных в руководстве «Анализ измерительных систем» (MSA), применяемом метрологическими службами организаций, внедривших СМК, которая, в свою очередь, соответствует требованиям СТБ ISO/TS 16949 [7]. Руководство MSA выделяет пять основных источников изменчивости (рисунок 4).

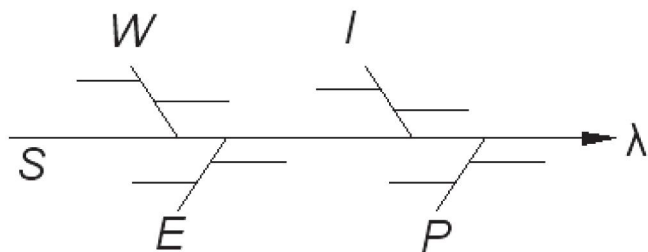


Рис. 4. Диаграмма «причина – следствие» с основными источниками изменчивости: S – эталон; W – деталь; I – измерительный прибор; P – оператор; E – окружающая среда

На основании рекомендаций, изложенных в руководстве MSA, была составлена диаграмма «причина – следствие» с потенциальными источниками изменчивости, влияющими на результаты измерений параметров теплопроводности. По результатам экспертного анализа всех потенциальных источников изменчивости значимыми были признаны источники, вызываемые:

- податливостью материала образцов;
- негомогенностью материала образцов.

Например, для образцов из минеральной ваты было установлено, что в силу повышенной податливости материала имеет место искажение результатов измерений теплопроводности образцов вследствие деформации образца под действием измерительного усилия (параметр «*h*» в формуле (3)).

А для образцов из пенополистирола значительно влияющим был признан источник неопределенности результата измерений, связанный с негомогенностью материала, так как в нем присутствовала механическая примесь графита.

В результате был разработан комплекс

организационно-технических мероприятий, позволивших минимизировать выявленные факторы, влияющие на неопределенность результатов измерений теплопроводности. Например, для минимизации составляющей неопределенности результата измерений, связанной с деформацией образца из податливого материала под действием измерительного усилия, была определена процедура, предполагающая предварительное измерение размера образца с помощью микрометра и введение значения размера в память прибора.

На рисунке 5 представлена диаграмма, характеризующая структуру (соотношение вкладов неопределенностей) суммарной неопределенности результатов измерений теплопроводности образцов из минеральной ваты после применения комплекса организационно-технических мероприятий, минимизировавших влияние податливости материала.

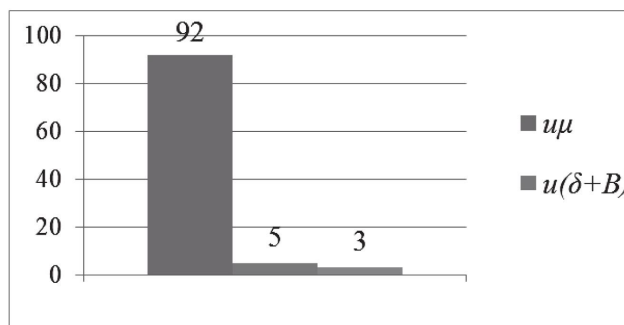


Рис. 5. Диаграмма вкладов составляющих суммарной неопределенности результатов измерений теплопроводности минеральной ваты после применения комплекса организационно-технических мероприятий, минимизировавших влияние податливости материала

Очевидно, что вклад остаточной ошибки « $u(e)$ » меньше вклада неопределенности лабораторного смещения « $u(\Delta)$ ». Можно теперь с уверенностью считать, что в ходе второго этапа исследований выявлены все значимые влияющие факторы.

Таким образом, применение двухэтапной программы внутрिलाбораторного исследования МВИ, основанной на классических общепризнанных методах сбора, обработки и анализа данных, позволяет не только обеспечить заданную степень доверия к результатам валидации (верификации) МВИ за счет выявления всех влияющих факторов на основе системного подхода, но и предложить методы управления характеристиками точности МВИ. Немаловажной является также очевидная возможность минимизации затрат на проведение верификации.

## Список литературы

1. *ISO/IEC Guide 99*. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM) [Текст].
2. *Серенков П.С.* Научно-методические аспекты современной метрологии [Текст]/П.С. Серенков, Н.А. Жагора, Е.Н. Савкова // Метрология и приборостроение. – Минск, 2010. – № 2. – С. 13–21.
3. *Руководство* по выражению неопределенности измерения [Текст]. – СПб.: ГП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», 1999. – 119 с.
4. *СТБ ИСО 5725-2002*. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Части 1–6 [Текст]. – Введ. 09.12.2002. – № 54. – Минск: Госстандарт РБ.
5. *Measurement Uncertainty in Testing*. Technical Report of European Federation of National Associations of Measurement, Testing and Analytical Laboratories (EUROLAB) [Text]. – 2002. – № 1.
6. *ISO 21748:2010* Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation [Text].
7. *Measurement Systems Analysis Reference Manual* [Text]. – Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor company, General Motors Corporation, 2002. – 217 с.

## References

1. *ISO/IEC Guide 99*. Mezhhdunarodnyj slovar' po metrologii. Osnovnye i obshhie ponjatija i sootvetstvujushhie terminy (VIM) [Tekst].
2. *Serenkov P.S.* Nauchno-metodicheskie aspekty sovremennoj metrologii [Tekst]/P.S. Serenkov, N.A. Zhagora, E.N. Savkova // Metrologija i priborostroenie. – Minsk, 2010. – № 2. – S. 13–21.
3. *Rukovodstvo* po vyrazheniju neopredelennosti izmerenija [Tekst]. – SPb.: GP «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut metrologii im. D.I. Mendeleeva», 1999. – 119 s.
4. *STB ISO 5725-2002*. Tochnost' (pravil'nost' i precizionnost') metodov i rezul'tatov izmerenij. Chasti 1–6 [Tekst]. – Vved. 09.12.2002. – № 54. – Minsk: Gosstandart RB.
5. *Measurement Uncertainty in Testing*. Technical Report of European Federation of National Associations of Measurement, Testing and Analytical Laboratories (EUROLAB) [Text]. – 2002. – № 1.
6. *ISO 21748:2010* Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation [Text].
7. *Measurement Systems Analysis Reference Manual* [Text]. – Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor company, General Motors Corporation, 2002. – 217 s.



**Канарейкин В.И.**  
**Kanareykin V.I.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Инфокоммуникационные  
технологии и нанoeлектроника»  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
университет», Россия, г. Уфа*



**Важдаев К.В.**  
**Vazhdaev K.V.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Инфокоммуникационные  
технологии и нанoeлектроника»  
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный  
университет», Россия, г. Уфа*

УДК 621.3.018.1

## УСТРОЙСТВА ФАЗОВОГО СДВИГА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И МАШИН

Цифровая обработка сигналов играет огромную роль в развитии и модернизации промышленности и новых технологий практически во всех областях науки и техники. В промышленности основной упор делается на развитие информационно-измерительных систем (ИИС) как неотъемлемую часть автоматизации и модернизации технологических процессов. ИИС состоят из устройств первичной (датчики) и вторичной (усилители, делители напряжения, фазометры и т. д.) обработки сигналов, АЦП.

Статья посвящена проблеме построения вторичного измерительного преобразователя – преобразователя фазового сдвига (фазовращатели и калибраторы фазы). В статье приводятся описание, принцип действия и результат теоретического и экспериментального исследования преобразователей фазового сдвига. Использование преобразователей фазового сдвига позволяет повысить точность, помехозащищенность информационно-измерительных систем. Предложен способ построения гибридного преобразователя фазового сдвига на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией.

Разработано техническое решение для реализации гибридного функционального ЦАП с кусочно-полиномиальной аппроксимацией  $n$ -го порядка. При увеличении порядка полинома  $n$  точность приближения синусной и косинусной зависимостей увеличивается в 10 раз, при увеличении количества интервалов аппроксимации точность увеличивается не менее чем в 2 раза. Оптимальным является применение сплайна 3-го порядка с количеством интервалов аппроксимации от трех и выше. Получен патент на изобретение № 2408136 МПК Н03М 1/66.

Спроектированный экспериментальный образец имеет технические характеристики: рабочий диапазон напряжений  $-15...+15$  В; диапазон рабочих частот от 100 до 100 кГц, разрешающая способность  $0,1^\circ$ ; диапазон основной погрешности измерения и регулирования угла фазового сдвига не более  $0,2^\circ$ ; время установления выходного сигнала не более 1 мс.

Исследования показали возможность создания высокоточных преобразователей фазового сдвига для вторичной обработки сигнала от датчика. При этом для различных датчиков возможно выпустить целый кластер преобразователей фазового сдвига, перекрывающий широкий диапазон частот (низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные преобразователи фазового сдвига).

**Ключевые слова:** информационные измерительные системы, обработка аналоговых и цифровых сигналов физических величин, первичные и вторичные измерительные преобразователи, преобразователи фазового сдвига.

## DEVICES OF PHASE SHIFT FOR INFORMATION MEASURING SYSTEMS AND MACHINES

Digital signal processing plays an important role in the development and modernization of industry and new technologies in almost all fields of science and technology. In industry, the focus is on the development of information-measuring systems (IMS) as an integral part of the automation and modernization processes. IMS consists of primary devices (sensors) and the secondary signal processing system (amplifiers, voltage dividers and phase meters, etc), the ADC.

Article is devoted a problem of creation of the secondary measuring transducer – the phase shift converter unit (phase transformers and phase calibrators). The article describes the principle of operation and the results of theoretical and experimental study of phase shifting transformers. Usage of transducer units of phase shift allows to raise accuracy, noise immunity of information-measuring systems. The method of creation of the hybrid transducer unit of phase shift on the basis of the functional digital-to-analog coders with spline approximation is offered.

Technical solution is developed for the implementation of the hybrid functional DAC with piecewise polynomial approximation of the  $n$ -th order. With an increase in the order of accuracy of the approximation polynomial  $n$  sine and cosine dependency increases 10 times, increasing the number of slots increases the accuracy of approximation of not less than 2 times. It is optimal to use the spline 3rd-order approximation to the number of intervals between three and above. The patent for invention number was given.

The designed experimental sample has technical characteristics: operating range of voltages  $-15 \dots +15V$ ; a range of operational frequencies from 100 to 100 kHz, resolution capability  $0,1^\circ$ ; a range of the intrinsic error of measurement and regulation of a corner of phase shift no more than  $0,2^\circ$ ; transient time of a signal output no more than 1 msec.

Researches showed the possibility of creation of high-precision transducers of phase shift for secondary handling of a signal from the sensor. Moreover, for various different sensors it is possible to produce a phase shift transducers cluster spanning a broad range of frequencies (LF, RF, microwave phase shift transducers).

*Key words:* information measurement systems, processing of analogue and digital signals of physical quantities, primary and secondary measuring transducers, transducers of phase shift.

Современные технологии автоматизации играют все более возрастающую роль во всех сферах жизнедеятельности людей (наука, техника, образование, медицина, промышленность и др.). С каждым годом ужесточаются требования к техническим характеристикам и уровню автоматизации элементов и устройств, из которых создаются информационно-измерительные системы обработки аналоговых сигналов физических величин. Главная цель обработки физических сигналов заключается в необходимости получения содержащейся в них информации. Эта информация обычно присутствует в амплитуде сигнала (абсолютной или относительной), в частоте или спектральном составе, в фазе или относительных временных зависимостях нескольких сигналов.

Информационно-измерительные системы состоят из устройств первичной (датчики) и вторичной (усилители, делители напряжения, фазометры и т. д.) обработки сигналов, АЦП (рис. 1) [4, 5]. Каждый элемент этой цепочки является отдельной темой для разговора. Нами рассмотрена проблема построения вторичного измерительного преобразователя – преобразователя фазового сдвига (фазовращатели и калибраторы фазы).

Проблема регулирования электрического фазового сдвига является весьма актуальной [4]. В нашей стране промышленностью выпускается только один калибратор фазы – Ф1-4 с дискретностью регулирования  $10^\circ$  (см. табл. 1), что является недостатком при применении его в качестве высокоточного преобразователя фазового сдвига в системах управления с высокой разрешающей способностью по углу фазового сдвига (УФС). Согласно приложению об аккредитации № 065 от 24.12.2008 ФГУП ВНИИМ им. Менделеева рабочие эталоны и калибраторы фазы 0-го разряда имеют погрешность измерения  $0,002-0,02^\circ$ , 1-го разряда  $0,01-0,2^\circ$ , 2-го разряда  $0,03-0,9^\circ$ .

Именно проблема высокоточного регулирования фазового сдвига в широком диапазоне частот сдерживает область применения фазового регулирования. Большинство устройств и приборов применяют частотное регулирование и управление, но возникает проблема помехозащищенности при изменении частоты.

В качестве решения проблемы предлагается использовать синусно-косинусные фазовращатели. Принцип работы синусно-косинусных фазовращателей может быть описан соотношением [1–4]:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = U \cos \varphi + jU \sin \varphi = U e^{j\varphi}.$$

Это уравнение описывается структурной схемой, представленной на рисунке 2.

### ОБРАБОТКА АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ



Рис. 1. Схема обработки сигналов в информационно-измерительных системах

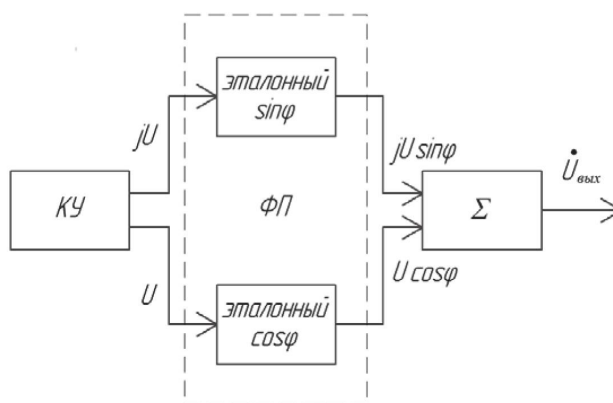


Рис. 2. Структурная схема синусно-косинусного фазовращателя:

КУ – квадратурное устройство, квадратурный фазовый модулятор (QPSK) [3]; эталонный  $\sin\varphi$  и  $\cos\varphi$  – устройства, обеспечивающие высокоточное воспроизведение зависимостей  $\sin\varphi$  и  $\cos\varphi$  (функциональные ЦАП [1, 2, 4]); ФП – синусно-косинусные функциональные преобразователи;  $\Sigma$  – сумматор

Таблица 1

### Фазометры, калибраторы фазы и их основные метрологические характеристики

Тип фазометра	Диапазон частот (Гц)	Диапазон измеряемого УФС (град.)	Основн. погрешн. измерения (град.) при соотн. уровней 1:1	Разреш. способность (град.)
Ф1-4	20 – 10 <sup>7</sup>	0-360	±0,03 °(20 Гц–10 кГц); ±0,05 °(10 кГц–1 МГц); ±0,1°(1–10 МГц и 5–20 Гц)	10° (5 Гц–2 МГц) 30°(2–10 МГц)
Fluke 5500A	0,01 – 2,0·10 <sup>6</sup>	0... + 179,99°	± 0,15	-

Тип фазометра	Диапазон частот (Гц)	Диапазон измеряемого УФС (град.)	Основн. погрешн. измерения (град.) при соотн. уровней 1:1	Разреш. способность (град.)
Fluke 5520A	$10 - 30 \cdot 10^3$	$0 \dots + 179,99^\circ$	$\pm 0,07$	-
КФМ-02	45 – 55	$0 \div 360$	0,1	-
НФ-3М	$10^{-3} - 10^2$	0–360	$\pm 1,8$	-
Ф2-1	$20 - 10^5$	0-160 0-130>20	$\pm 2 + 1\%$ от пред. шкалы	0,5
Ф2-3	$75 \cdot 10^3 -$	0–360	$0,1 + 1\%$ от пред.	0,1
Ф2-4	$20 - 10^7$	$-180 \div +180$	$0,7 \div 1,5$	0,04
Ф2-6	$10 - 10^8$	$0 \div 360$	$\pm 1,0$	0,5
Ф2-7	$75 \cdot 10^3 -$	$-180 \div +180$	2–3	0,5
Ф2-8	$10^8 - 10^9$	$0 \div 360$	$\pm 1,0 + 1\%$ от пред.	0,2
Ф2-9	$10^5 - 10^7$	$0 \div 360$	$\pm 1 (< 1 \text{ МГц})$ $\pm ((2 \div 2,5) (> 1 \text{ МГц}))$	0,3
Ф2-13	$20 - 10^6$	$0 \pm 180$	$\pm 0,5 (20 \text{ Гц} - 200 \text{ кГц})$ $\pm 1,0 (200 \text{ кГц} - 1 \text{ МГц})$	0,2
Ф2-28	$5 - 5 \cdot 10^5$	$0 \div 360$	при $U_{\text{вх}} = 0,1 \div 10 \text{ В}$ : $\pm 0,2^\circ (5 - 200 \text{ Гц})$ , $\pm 0,3^\circ (200 - 10^5 \text{ Гц})$ , $\pm 4 \cdot 10^{-4} \text{ F}^\circ (10^5 - 5 \cdot 10^5 \text{ Гц})$ , где F – частота сигнала в кГц при $U_{\text{вх}} = 10 \div 100 \text{ мВ}$ : $\pm 4^\circ$	0,01
Ф2-34	$0,5 - 5 \cdot 10^6$	$0 \div 360$	$\pm (0,1 - 0,5)^\circ (0,5 - 20 \text{ Гц})$ ; $\pm 0,1^\circ (20 \text{ Гц} - 100 \text{ кГц})$ ; $\pm (0,1 - 0,6)^\circ (100 \text{ кГц} - 5 \text{ МГц})$	0,01

Структурная схема функционального ЦАП со сплайновой аппроксимацией n-го порядка представлена на рисунке 3. Здесь ИОН – источник опорного напряжения, КП – кодопреобразователь.

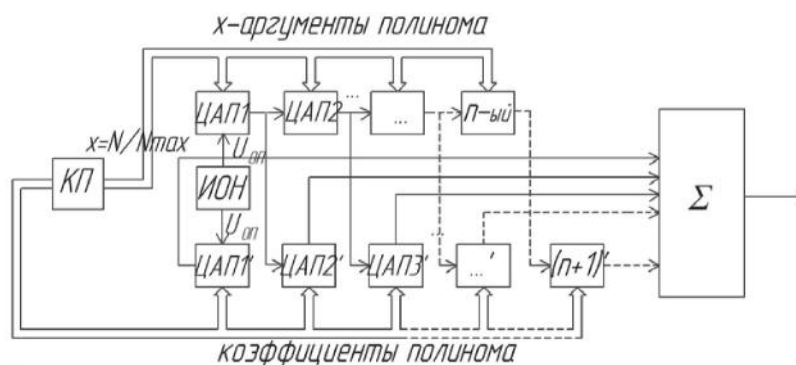


Рис. 3. Структурная схема функционального ЦАП со сплайновой аппроксимацией n-го порядка



Синусная и косинусная зависимости 3-го порядка реализуются следующими соотношениями [1, 2]:

$$k_{1i} = a_{0i} + a_{1i}x + a_{2i}x^2 + a_{3i}x^3 \approx \cos \frac{\pi}{2} x,$$

$$k_{2i} = b_{0i} + b_{1i}x + b_{2i}x^2 + b_{3i}x^3 \approx \sin \frac{\pi}{2} x,$$

где  $i$  – количество отрезков, на которые разбивается интервал сплайновой аппроксимации.

Разработано техническое решение для реализации гибридного функционального ЦАП с кусочно-полиномиальной аппроксимацией  $n$ -го порядка. При увеличении порядка полинома  $n$  точность приближения синусной и косинусной зависимостей увеличивается в 10 раз, при увеличении количества интервалов аппроксимации точность увеличивается не менее чем в 2 раза. Оптимальным является применение сплайна 3-го порядка с количеством интервалов аппроксимации от трех и выше. Получен патент на изобретение № 2408136 МПК Н03М 1/66. Функциональный ЦАП. Исследования функциональных ЦАП по составленной математической модели позволили определить максимальные значения методических погрешностей синусно-косинусного преобразователя фазовых сдвигов, которые составили: при одном интервале аппроксимации – по амплитуде  $\delta U_{\text{вых}} = 1,5\%$ , по УФС  $\Delta\varphi = 0,15^\circ$ ; при двух интервалах аппроксимации – по амплитуде  $\delta U_{\text{вых}} = 0,1\%$ , по УФС  $\Delta\varphi = 0,025^\circ$ ; при трех интервалах аппроксимации – по амплитуде  $\delta U_{\text{вых}} = 0,02\%$ , по УФС  $\Delta\varphi = 0,003^\circ$ ; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде  $\delta U_{\text{вых}} = 0,007\%$ , по УФС  $\Delta\varphi = 0,0007^\circ$ .

Экспериментальные погрешности преобразователя фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП составили: при одном интервале аппроксимации – по амплитуде  $\delta U_{\text{вых}} = 1,5\%$ , по УФС  $\Delta\varphi = 0,2^\circ$ ; при двух интервалах аппроксимации – по амплитуде  $\delta U_{\text{вых}} = 0,15\%$ , по УФС  $\Delta\varphi = 0,06^\circ$ ; при трех интервалах аппроксимации – по амплитуде  $\delta U_{\text{вых}} = 0,06\%$ , по УФС  $\Delta\varphi = 0,05^\circ$ ; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде  $\delta U_{\text{вых}} = 0,04\%$ , по УФС  $\Delta\varphi = 0,04^\circ$  [1]. Экспериментальные и теоретические исследования погрешностей преобразователя фазового сдвига на функциональных ЦАП показали, что качественное распределение погрешностей имеет одинаковый характер и свидетельствует об адекватности разработанных моделей. Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования разработанного метода построения преобразователя фазового сдвига показали возможность создания высокоточных преобразователей фазового сдвига для вторичной обработки сигнала от датчика. При

этом для различных датчиков с различной требуемой точностью возможно выпустить целый кластер преобразователей фазового сдвига, перекрывающий широкий диапазон частот (низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные преобразователи фазового сдвига).

#### Список литературы

1. Газизов А.А. Экспериментальное исследование функционального ЦАП [Текст] / А.А. Газизов, В.И. Канарейкин, А.Д. Максудов, В.М. Сапельников // Датчики и системы. – 2009. – № 5. – С. 58–60.
2. Сапельников В.М. Повышение точности измерения коэффициента мощности [Текст] / В.М. Сапельников, В.И. Канарейкин, С.С. Клименко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 3. – С. 23–25.
3. Сапельников В.М. Широкополосное квадратное устройство для калибраторов фазы [Текст] / В.М. Сапельников, В.И. Канарейкин // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции в 2 т. Т. 2 / Редкол.: В. А. Шабанов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – С. 157–160.
4. Сапельников В.М. Проблемы воспроизведения смещаемых во времени электрических сигналов и их метрологическое обеспечение [Текст] / В.М. Сапельников, С.А. Кравченко, М.К. Чмых. – Уфа: Изд-во Башкирск. гос. ун-та, 2000. – 196 с.
5. Уолт Кестер. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов [Текст] / Кестер Уолт. – М.: Изд-во Техносфера, Analog Devices, Inc., 2010. – 328 с.

#### References

1. Gazizov A.A. Jeksperimental'noe issledovanie funkcional'nogo CAP [Tekst] / A.A. Gazizov, V.I. Kanarejkin, A.D. Maksutov, V.M. Sapel'nikov // Datchiki i sistemy. – 2009. – № 5. – S. 58–60.
2. Sapel'nikov V.M. Povyshenie tochnosti izmerenija koeficienta moshhnosti [Tekst] / V.M. Sapel'nikov, V.I. Kanarejkin, S.C. Klimenko // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2010. – № 3. – S. 23–25.
3. Sapel'nikov V.M. Shirokopolosnoe kvadratnoe ustrojstvo dlja kalibratorov fazy [Tekst] / V.M. Sapel'nikov, V.I. Kanarejkin // Jelektrotehnologii, jelektroprivod i jelektrooborudovanie predpriyatij: sbornik nauchnyh trudov II Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii v 2 t. T. 2 / redkol.: V. A. Shabanov i dr. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2009. – S. 157–160.

4. *Sapel'nikov V.M.* Problemy vosproizvedenija smeshhaemyh vo vremeni jelektricheskikh signalov i ih metrologicheskoe obespechenie [Tekst] / V.M. Sapel'nikov, S.A. Kravchenko, M.K. Chmyh. – Ufa: Izd-vo Bashkirsk. gos. un-ta, 2000. – 196 s.

5. *Uolt Kester.* Proektirovanie sistem cifrovoj i smeshannoj obrabotki signalov [Tekst] / Kester Uolt. – M.: Izd-vo Tehnosfera, Analog Devices, Inc., 2010. – 328 s.



**Федосов А.В.**  
**Fedosov A.V.**

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Промышленная  
безопасность и охрана труда» ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный нефтяной  
технический университет», Россия, г. Уфа*



**Гайнуллина Л.А.**  
**Gaynullina L.A.**

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

УДК 620.179.1:665.6

## МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Оценка состояния опасных производственных объектов занимает особое место в системе промышленной безопасности. На сегодняшний день экспертиза является ключевым элементом этой оценки. Экспертиза промышленной безопасности проводится для оценки состояния объекта, подтверждения соответствия требованиям, установленным законодательством в сфере промышленной безопасности, определения уровня риска возникновения аварии и угрозы для жизни и здоровья людей.

Сегодня ни одна экспертиза не проходит без методов неразрушающего контроля. Неразрушающий контроль – это оценка надежности, рабочей способности и параметров объекта или отдельных его элементов, не требующая выведения объекта из работы либо его демонтажа. Он является важнейшим элементом системы экспертизы промышленной безопасности, обеспечивающей техническую безопасность на опасном производственном объекте. Основной целью неразрушающего контроля является достоверное выявление дефектов путем анализа взаимодействия объекта контроля с полями разной природы (магнитными, электрическими, акустическими и пр.) и веществами. В зависимости от цели и предмета исследования выбирают подходящий метод неразрушающего контроля. Для этого эксперт должен знать о преимуществах и недостатках каждого и определить наилучший вариант, который подойдет выбранной им цели. Ведь каждый метод по-своему хорош и выгоден, но у каждого есть слабые стороны, так, например, с помощью капиллярного контроля выявляют поверхностные дефекты. Преимуществами данного метода перед другими остаются: хорошая выявляемость трещин, высокие чувствительность и разрешающая способность, но с помощью этого метода можно обнаружить только выходящие на поверхность дефекты и невозможно точно определить их глубину.

В данной статье рассмотрены три вида неразрушающего контроля и приборы, с помощью которых можно определить дефекты, представлена диаграмма сравнения статической выявляемости дефектов

с помощью ультразвукового и радиационного методов, определен самый перспективный и экономически выгодный метод.

*Ключевые слова:* экспертиза, оценка, дефекты, неразрушающий контроль, метод, промышленная безопасность, ультразвуковой, магнитопорошковый контроль, акустическая эмиссия, приборы, усилитель.

## METHODS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING

Assessment of hazardous production facilities occupies a special place in the system of industrial safety. Today, expertise is a key element of this assessment. Industrial safety review is conducted to assess the state of the object, confirmation of compliance with the requirements established by the

legislation in the sphere of industrial safety, determine the level of risk of accidents and threats to life and health of people.

Today no examination passes without NDT methods. Non-destructive testing is an assessment of reliability, working capacity and parameters of the object or some of its elements, not requiring the removal of the object from the work or dismantling. It is an essential element of the system of industrial safety expertise, providing technical safety at hazardous production facilities. The main purpose of nondestructive testing is reliable detection of defects by analyzing the interaction of the test object with fields of different nature (magnetic, electric, acoustic, etc.) and substances. Depending on the purpose and subject of research, choose the appropriate NDT method. To do this, the expert needs to know about the advantages and disadvantages of each and determine the best option that fits his goal. Because each method has its own good and profitable, but each has weaknesses, for example, using liquid penetrant inspection reveal surface defects. The advantages of this method over others are: good detectability of cracks, high sensitivity and resolution, but using this method can only be detected leading to surface defects and it is impossible to accurately determine their depth.

This article discusses 3 types of non-destructive control and devices with which help it is possible to detect the defects provided the comparison chart static detection of defects using ultrasonic and radiation method, and identified the most promising and cost-effective method.

*Key words:* examination, evaluation, defects, non-destructive testing method, industrial safety, ultrasonic inspection, magnetic particle, acoustic emission, devices, power.

На сегодняшний день экспертиза промышленной безопасности является одним из главных инструментов, при помощи которого проводят оценку соответствия объекта [1].

Неразрушающий контроль (НК) является важнейшим элементом системы экспертизы промышленной безопасности, обеспечивающей техническую безопасность на опасном производственном объекте [1].

Основными методами неразрушающего контроля принято считать: акустико-эмиссионный (АЭ); радиационный (РК); ультразвуковой (УК); магнитопорошковый (МК); капиллярный (ПВК), вихретоковый (ВК); визуальный и измерительный (ВИК) [2].

Рассмотрим некоторые из них. Визуальный и измерительный контроль является самым простым, а также информативным методом контроля. Он считается единственным методом неразрушающего контроля, для выполнения которого не требуется какое-либо оборудование [3].

Для определения поверхностных дефектов используется капиллярный метод. Его преимуществами служат хорошая выявляемость трещин, высокие

чувствительность и разрешающая способность, также четкость результатов контроля и др. Однако с помощью данного метода невозможно точно определить глубину дефектов, также большим минусом является то, что он может выявить только выходящие на поверхность дефекты [3].

Магнитопорошковый контроль применяют для обнаружения дефектов, которые находятся на поверхности либо залегают на глубину до 10 мм. Он пригоден для оценки конструкций и деталей, изготовленных из ферромагнитных сталей обыкновенного качества либо из сталей качественных углеродистых и низколегированных [3].

С помощью вихретокового контроля можно обнаружить также поверхностные дефекты и дефекты, залегающие на глубину 1–4 мм. Этим методом обследуют основные металлы, сварные соединения конструкций [4].

Метод радиационного контроля используют, чтобы выявить внутренние и недоступные для визуального контроля поверхностные дефекты. Его целью является выявление в сварных соединениях внутренних и поверхностных дефектов [4].

Согласно отчету Института доктора Ферстера [5] самым распространенным физическим методом неразрушающего контроля является ультразвуковой контроль. Можно выделить следующие преимущества данного метода над другими: он очень чувствителен, имеет хорошую производительность, безопасный и дешевый. Отрицательной стороной данного метода является то, что очень сложно расшифровать полученный результат, невозможно применить ко всем металлам.

Самым важным плюсом ультразвукового контроля считается его способность выявлять более опасные плоскостные дефекты. Экспериментально доказано, что уровень производительности данного метода в 3–10 раз выше радиографического. Также при сравнении себестоимости этих двух методов контроля выяснилось, что стоимость ультразвукового контроля в 4–8 раз ниже [6].

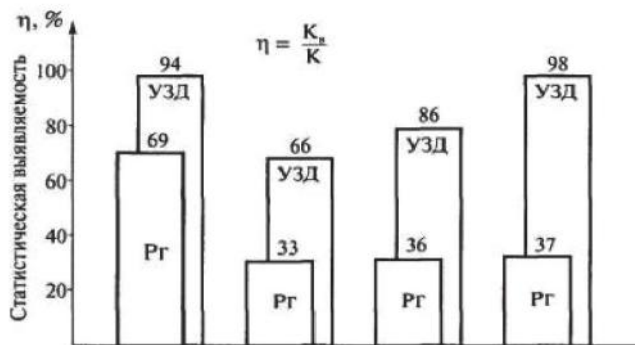


Рис. 1. Сравнение выявляемости между ультразвуковым (УЗД) и радиографическим (Pr) методами [8] ( $K_p$  – общее количество дефектов;  $K_b$  – количество выявленных дефектов)

На сегодняшний день существует очень много приборов для оценки неразрушающего контроля. Рассмотрим самые распространенные из них. При выборе ультразвукового метода контроля следует пользоваться ультразвуковыми дефектоскопами, которые применяются для излучения УЗ-колебаний, служат приемником ЭХО-сигналов [7]. Он состоит из пьезопреобразователя, электронного блока и вспомогательных устройств. Преобразователи разделяются на прямые, наклонные и раздельно-совмещенные.

В прямых и наклонных преобразователях пьезоэлемент является излучателем и приемником. У раздельно-совмещенных есть две пьезопластины, одна из которых подключена к излучающему генератору (Г), другая – к принимающему (П). Вследствие чего это все приводит к образованию акустического экрана между ними [7].

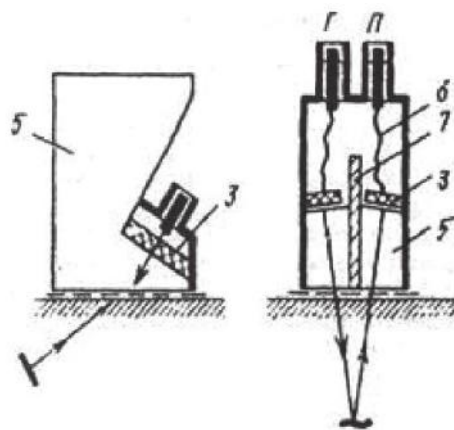


Рис. 2. Ультразвуковые преобразователи

На рисунке 2 под цифрой 1 обозначен корпус, 2 – это демпфер, 3 – пьезопластина, 4 – защитное доньшко, 5 – призма, 6 – токоподвод, а 7 – акустический экран.

Рассмотрим на примере дефектоскоп ДУК-13ИМ, который может выявить внутренние дефекты в изделиях из металлов, определить координаты дефектов в сварных и клепаных соединениях [8].

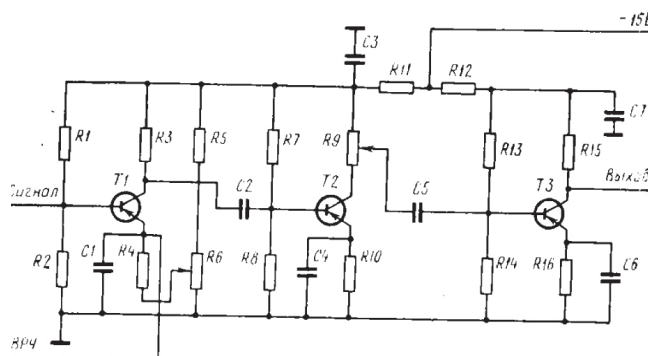


Рис. 3. Усилитель радиопульсов дефектоскопа ДУК-13ИМ

Это переносной прибор, который применяется для измерения в цеховых и полевых условиях. Эксплуатация возможна с прямыми и наклонными искательными головками [8]. Регулировать чувствительность данного прибора можно в широких пределах.

Наименьшей глубиной обнаружения дефектов является глубина около 3 мм.

Максимальной глубиной прозвучивания – 600 мм.

Преимуществом данного прибора также является то, что при помощи него можно контролировать объект в двух режимах: по слоям и от поверхности [8].

Среди всех методов контроля необходимо выделить метод акустической эмиссии (АЭ) как один из наиболее перспективных методов. Этот метод

отличается от остальных возможностью оценить ряд параметров качества обработки в процессе шлифования [9].

Аппарат, регистрирующий сигнал АЭ при шлифовании, состоит из датчика (пьезопреобразователя), который преобразует механические колебания в электрический сигнал; предварительного усилителя; детектирующего звена; самописца [9].

При круглом врезном шлифовании (при вращении детали) регистрация сигнала происходит из-за поджима датчика 3 к поверхности детали 2. Чтобы уменьшить трение между датчиком и деталью используют тефлоновую пробку. Уменьшение диаметра детали не влияет на плотность контакта датчика с обрабатываемой поверхностью благодаря кулисному механизму поджима 4 [9] (рис. 4).

Центральным узлом системы неразрушающего контроля на основе явления акустической эмиссии является модуль акустической эмиссии, который должен выполнять следующие функции [10]:

- регистрацию сигнала акустической эмиссии;
- усиление сигнала акустической эмиссии и подавление шумов;
- обработку сигнала и определение параметров акустической эмиссии;
- отображение параметров акустической эмиссии с помощью устройств вывода информации;

– выработку оповещения в случае выхода параметров акустической эмиссии за границы установленного интервала.

Для реализации представленных функций модуль акустической эмиссии имеет структуру, приведенную на рисунке 6.

Как видно из рисунка 5, модуль акустической эмиссии состоит из четырех основных подсистем:

- подсистемы датчиков;
- подсистемы усиления и фильтрации сигнала;
- подсистемы обработки сигнала;
- подсистемы ввода-вывода.

В состав модуля акустической эмиссии, как правило, входят множество датчиков, что делает необходимым использование системы обработки сигнала, поддерживающей независимую обработку [10].

Очень важную часть в методах неразрушающего контроля занимают магнитные методы, созданные для того, чтобы обнаружить магнитный поток рассеяния, который создается из-за различных дефектов в намагниченных изделиях из ферромагнитных материалов [11].

По способности регистрировать магнитный поток рассеяния магнитные методы неразрушающего контроля можно разделить на магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый.

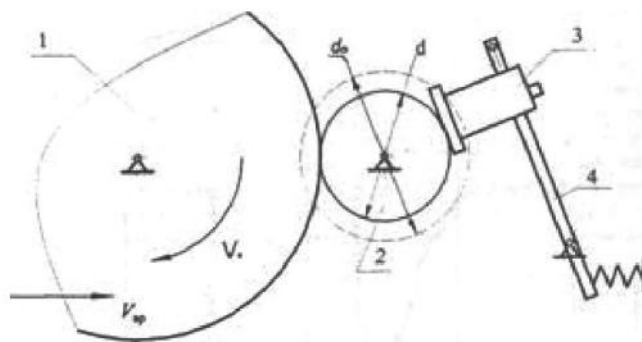


Рис. 4. Крепление пьезопреобразователя в рабочей зоне

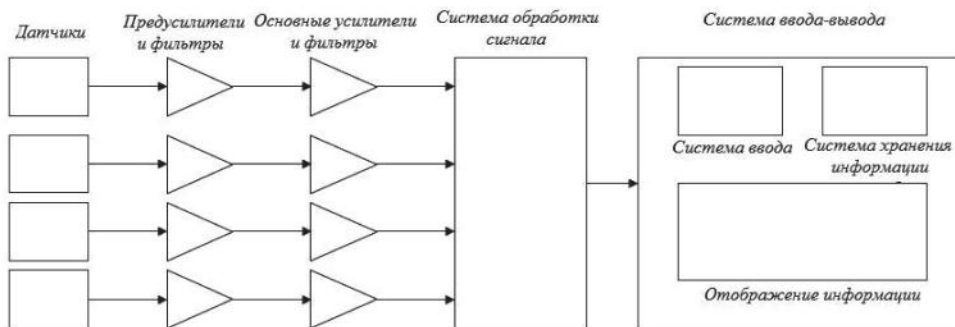


Рис. 5. Структурная схема модуля акустической эмиссии

Действие магнитопорошкового метода возможно в том случае, если суспензия состоит из ферромагнитного порошка и керосина (вместо керосина можно использовать масло или мыльный раствор) нанесена на поверхность намагниченной детали. Вместо суспензии можно использовать аэрозоль, что является сухим методом. Его используют на этапе предварительного контроля для выявления грубых дефектов, так как он менее чувствителен. Частицы порошка в силу действия втягивающей силы магнитных полей рассеяния будут перемещаться на поверхности деталей и скапливаться валиками около дефектов. Формы этих самых скоплений аналогичны очертаниям выявляемых дефектов [11] (рис. 7).

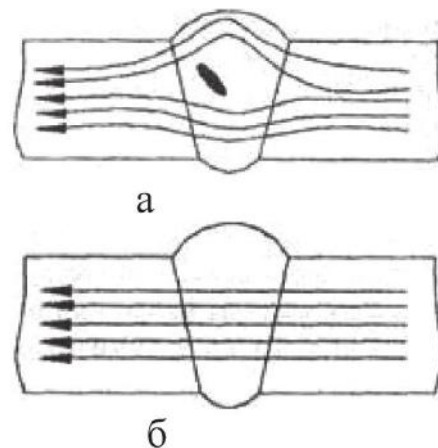


Рис. 6. Распределенный магнитный поток (качественный сварной шов (б) и дефектный (а))

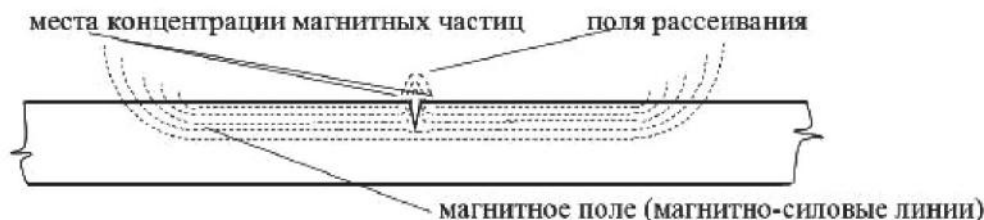


Рис. 7. Схема метода

Рассмотрев три вида неразрушающего контроля, можно сделать вывод, что самым перспективным и экономически выгодным остается ультразвуковой метод неразрушающего контроля. Как и в других методах, у него есть свои минусы и плюсы, но лучшим и более востребованным вариантом остается именно он.

#### Список литературы

1. Приказ Ростехнадзора от 14.11.2013 № 538 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» (Зарегистрировано в Минюсте России 26.12.2013 № 30855) [Текст].
2. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
3. РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю [Текст]. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004.
4. EN 970:1970. Неразрушающий контроль сварных швов, выполненных плавлением. Визуальный контроль // Измерения. Контроль. Качество. Неразрушающий контроль: Сб. [Текст]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 668–674.
5. Report on the actual situation of INSTITUTE DR. FOSTER. Information for customer and friends of INSTITUTE DR. FOSTER [Text]. – 1993. – № 12.
6. Волченко В.Н. Сравнение выявляемости дефектов при ультразвуковом и радиографическом контроле сварных соединений толщиной 30–40 мм [Текст] / В.Н. Волченко, В.Г. Лупачев // Комплексная дефектоскопия сварных и паяных соединений: Сб. статей. – М.: МДНТП, 1975. – С. 73–77.
7. Волченко В.Н. Производственная методика статистического регулирования качества сварных соединений [Текст] / В.Н. Волченко, Б.Ф. Демидов // Сварочное производство. – 1989. – № 11. – С. 27–29.
8. Капустьян М.Ф. Контроль качества изделий методами неразрушающего контроля [Текст] / М.Ф. Капустьян, В.А. Рыбник. – ОмГУПС, Омск 2002. – 27 с.
9. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник [Текст] / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – 357 с.
10. Шахнов В.А. Аппаратно-программный ком-

плекс обработки сигналов для мониторинга и анализа состояния технических систем [Текст] / В.А. Шахнов, А.И. Власов, В.С. Князев // 3-я Международная конференция «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике», Москва, 18–21 марта 2002 г.

11. *СТО 70238424.27.100.005-2008*. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования [Текст]. – Москва, 2008.

#### References

1. *Prikaz Rostehnadzora ot 14.11.2013 № 538* «Ob utverzhdenii federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila provedenija jekspertizy promyshlennoj bezopasnosti» (Zaregistrirvano v Minjuste Rossii 26.12.2013 № 30855) [Текст].

2. *GOST 16504-81*. Sistema gosudarstvennyh ispytanij produkcii. Ispytanija i kontrol' kachestva produkcii. Osnovnye terminy i opredelenija [Текст]. – М.: ИПК Издатel'stvo standartov, 2004.

3. *RD 03-606-03*. Instrukcija po vizual'nomu i izmeritel'nomu kontrolju [Текст]. – М.: Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoje predprijatje «Nauchno-tehnicheskij centr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortehnadzora Rossii», 2004.

4. *EN 970:1970*. Nerazrushajushhij kontrol' svarnyh shvov, vypolnennyh plavljeniem. Vizual'nyj kontrol'// Izmerenija. Kontrol'. Kachestvo. Nerazrushajushhij kontrol': Sb. [Текст]. – М.: ИПК Издатel'stvo standartov, 2002. – S. 668–674.

5. *Report on the actual situation of INSTITUTE DR. FOSTER*. Information for customer and friends of INSTITUTE DR. FOSTER [Text]. – 1993. – № 12.

6. *Volchenko V.N.* Sravnenie vyjavljaemosti defektov pri ul'trazvukovom i radiograficheskom kontrole svarnyh soedinenij tolshhinoj 30–40 mm [Текст]/V.N. Volchenko, V.G. Lupachev// Kompleksnaja defektoskopija svarnyh i pajanyh soedinenij: Sb. statej. – М.: MDNTP, 1975. – S. 73–77.

7. *Volchenko V.N.* Proizvodstvennaja metodika statisticheskogo regulirovanija kachestva svarnyh soedinenij [Текст] / V.N. Volchenko, B.F. Demidov // Svarochnoe proizvodstvo. – 1989. – № 11. – S. 27–29.

8. *Kapust'jan M.F.* Kontrol' kachestva izdelij metodami nerazrushajushhego kontrolja [Текст] / M.F. Kapust'jan, V.A. Rybnik. – OmGUPS, Omsk 2002. – 27 с.

9. *Pribory dlja nerazrushajushhego kontrolja materialov i izdelij*. Spravochnik [Текст] / Pod red. V.V. Kljueva. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 357 s.

10. *Shahnov V.A.* Apparatno-programmnyj kompleks obrabotki signalov dlja monitoringa i analiza sostojanija tehniceskix sistem [Текст]/ V.A. Shahnov, A.I. Vlasov, V.S. Knjazev // 3-ja Mezhdunarodnaja konferencija «Komp'juternye metody i obratnye zadachi v nerazrushajushhem kontrole i diagnostike», Moskva, 18–21 marta 2002.

11. *СТО 70238424.27.100.005-2008* Osnovnye jelementy kotlov, turbin i truboprovodov TJeS. Kontrol' sostojanija metalla. Normy i trebovanija [Текст]. – Москва, 2008.

**Морозов И.С.****Morozov I.S.**

аспирант кафедры информационных и управляющих систем,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
университет технологии и дизайна»,  
Россия, г. Санкт-Петербург

УДК 004.421.2

## СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПАРКОВКИ АВТОМОБИЛЯ В ЗАДАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В современном обществе увеличивается интерес к проблеме компьютерного зрения. Обширный круг прикладных задач, которые могут быть решены посредством компьютерного зрения, лежит в области медицины, различных прикладных задач, военных решений и многих других областях.

Однако особого внимания требуют задачи, которые возникают при деятельности человека. В частности, парковка автомобиля. Для решения этой проблемы обычно используются различные сенсоры, в частности лазерный дальномер. По этому принципу работают системы парктроник и системы автоматической парковки автомобиля. Данные решения не способны заблаговременно принять решение о возможности парковки, например, требуется ли заезжать во двор, есть ли там место и т. п. Это особенно важно в условиях затрудненного подъезда к месту назначения, отсутствия возможности развернуться. Примером такого места может служить узкий двор или особенности автомобильного паркинга в торговых центрах.

Решение проблемы может быть найдено в применении камер, которые смогут распознать с помощью специальных алгоритмов наличие свободного пространства и уведомить водителя о целесообразности въезда. Для распознавания предлагается использовать самостоятельно написанное программное обеспечение на основе библиотеки Open CV. Данная библиотека с помощью каскада Хаара позволяет искать объекты по принципу скользящего окна. К достоинствам данного метода стоит отнести низкую вероятность ложного срабатывания, а к недостаткам – длительное время обучения каскада. Обучающая выборка может быть составлена на основе фотографий окружающей местности. Обучение каскада будет происходить с помощью утилит, поставляемых в комплекте с Open CV.

После подготовительного этапа следует подключение каскада к программному обеспечению и USB-камере. Данный модуль был написан на языке программирования C#. Посредством использования Emgu CV была достигнута точность срабатывания порядка 70%. Найденное для парковки пространство обозначается черным прямоугольником, рисуемым поверх кадра, что сообщает водителю о возможности парковки легкового автомобиля.

*Ключевые слова:* компьютерное зрение, Open CV, каскад Хаара, метод Виолы – Джонса, программирование, компьютерное обучение, математические методы, вейвлет-преобразования, парковка.

## SYSTEM OF DEFINITION OF POSSIBILITY OF THE PARKING OF THE CAR IN THE SET SPACE

In modern society interest in a problem of computer sight increases. The extensive circle of applied tasks which can be solved by means of computer sight, lies in the field of medicine, various applied tasks, military decisions and many other areas.

However the special attention is demanded by task which arise at activity of the person. In particular, car parking. For the solution of this problem various sensors, in particular a laser range finder are usually used. By this principle systems the parctronic and systems of an automatic parking of the car work. Whether these decisions aren't capable to make beforehand the decision on possibility of a parking, for example, it is required to stop by in the yard, whether there is a place, etc. there. It is especially important in the conditions of the complicated entrance to the destination, lack of opportunity to be developed. The narrow yard or features of an automobile parking in shopping centers can be an example of such place.



The solution can be found in use of cameras which will be able to distinguish existence of free space by means of special algorithms and to notify the driver on expediency of entrance. For recognition it is offered to use independently written software on the basis of Open CV library. This library by means of Haar's cascade allows to look for objects by the principle of the sliding window. To advantages of this method costs refer low probability of false operation, and to shortcomings – a long time of training of the cascade. The training selection can be made on the basis of photos of the surrounding district. Training of the cascade will happen to the help of the utilities delivered complete with Open CV.

After a preparatory stage connection of the cascade to the software and the USB camera follows. This module was written in the C# programming language. By means of use of Emgu CV operation accuracy about 70 % was reached. The space found for a parking is designated by the black rectangle drawn over a shot that reports to the driver about possibility of a parking of the car.

*Key words:* computer sight, Open CV, Haar's cascade, Viola-Jones's method, programming, computer training, mathematical methods, veyvlet-transformations, parking.

### *Введение*

В настоящее время проблеме компьютерного зрения уделяется большое внимание [1]. Эта проблема важна в приложении для охранных систем, автомобильной промышленности и других областях. В этих задачах одна из основных трудностей состоит в том, что используя различные технические решения, такие как лазеры, камеры, различные датчики объема, мы получаем неоднозначные, иногда взаимно не интерпретируемые данные. Это говорит о том, что при использовании одного из видов датчиков возможен ошибочный результат.

Наиболее перспективным подходом является использование компьютерного зрения посредством цифровой видеокамеры. Используя математические алгоритмы, в частности, нейронные сети, мы можем приблизить «компьютерный глаз» к настоящему человеческому. Один из успешных методов в этой области – это метод Виолы – Джонса [2]. С помощью метода Виолы – Джонса успешно решается задача по распознаванию объектов с использованием критериев, которым обучен входной каскад метода. Это позволяет создать программное обеспечение для конкретной прикладной задачи. Цель настоящей работы – описание возможностей программного обеспечения по методу Виолы – Джонса для задачи анализа возможности парковки автомобиля в заданном месте.

Мы используем так называемый каскад Хаара [3]. Для обучения каскада Хаара по методу Виолы – Джонса необходимо подготовить обучающую выборку из негативных и позитивных примеров. В случае решения других задач, например, подсчета количества автомобилей или распознавания лиц, или поиска конкретного отличающегося от фона объекта, мы можем применить тот же метод, но использовать другие обучающие примеры. В данной же задаче необходимо выделить фоновую составляющую, игнорируя другие объекты на подающемся на вход изображении. Далее необходимо отделить проезжую часть

от реального места для парковки. Эти и многие другие проблемы, возникающие по ходу решения задачи, рассмотрены в статье. Для решения задачи применена библиотека Open CV последней доступной версии на момент написания статьи (Open CV 3.0 beta). Разработана программа, дающая до 70 % положительного (безошибочного) результата.

### *1. Признак Хаара и метод Виолы – Джонса в библиотеке Open CV*

Основные принципы, с помощью которых реализован метод, состоят в следующем:

- изображение представляется в интегральном виде. Данный принцип позволяет достаточно быстро выделять требуемые области и объекты;
- использование признаков Хаара для выделения необходимого объекта на изображении;
- применяется бустинг [4] – с помощью данного принципа выделяются самые важные признаки для определяемого объекта;
- каскад всех признаков поступает на вход классификатора, который однозначно выделяет результат true или false.

Существенным недостатком метода является длительное обучение классификатора – при достаточно большом объеме обучающей выборки обучение может доходить до трех суток при использовании компьютера со средней конфигурацией. Однако после обучения скорость поиска объекта очень высока, поэтому метод Виолы – Джонса был выбран для решения заявленной прикладной задачи. Данный метод является одним из лучших по соотношению скорости поиска объекта и скорости работы. Дополнительным плюсом выступает низкая вероятность ошибочного обнаружения и ложного срабатывания. Далее даны общие описания принципов работы алгоритма Виолы – Джонса. В основе функционирования данного метода лежит принцип сканирующего окна.

*Основной принцип сканирующего окна*

Изображение представлено матрицей пикселей  $w \times h$  (ширина и высота), каждый пиксель может принимать значения от 0 до 255 в случае черно-белого изображения и от 0 до  $255^3$  в случае цветного изображения.

Задача обнаружения искомого объекта в составе цифрового изображения сводится к тому, что в процессе работы алгоритм отмечает отличительные признаки объекта в рабочей области изображения прямоугольными признаками, которыми описывается найденный объект.

$$rectangle_i = \{x, y, w, h, a\},$$

где  $x, y$  – координаты, описывающие центр  $i$ -го прямоугольника,  $w$  – ширина,  $h$  – высота,  $a$  – угол наклона между прямоугольником и вертикальной осью изображения,  $rectangle_i$  – структура, которая содержит набор из четырех целых чисел, определяющих расположение и размер прямоугольника.

К изображениям применяется метод сканирующего окна: для каждого положения сканирующего окна требуется применение классификатора. С помощью заранее подготовленных мини-программ в составе библиотек Open CV система обучения полностью автоматизирована и не требует дополнительного контроля в процессе своей работы.

*Представление изображения в интегральном виде*

Для проведения преобразований с данными в методе Виолы – Джонса используется интегральное представление. Данный тип преобразования используется также в вейвлет-преобразованиях и других алгоритмах [5]. Метод, заложенный в основу, позволяет рассчитывать для каждого произвольного прямоугольника суммарную яркость. Особенность состоит в том, что время расчета остается неизменным для каждого такого прямоугольника.

Матрица, совпадающая по размерам с исходным изображением, является интегральным представлением изображения. Каждый элемент матрицы содержит суммарное значение интенсивности всех пикселей. Каждый элемент матрицы может быть рассчитан следующим образом:

$$L(x,y) = \sum_{i=0, j=0}^{i \leq x, j \leq y} I(i,j),$$

где  $I(i,j)$  – яркость пикселя исходного изображения.

Таким образом, для матрицы  $L[x,y]$  каждый элемент содержит суммарное значение пикселей в искомом прямоугольнике от  $(0,0)$  до  $(x,y)$ , при этом значение пикселя  $(x,y)$  состоит из суммы всех соседних пикселей, кроме стоящих справа и слева от данного  $(x,y)$ . Время, необходимое для расчета матрицы,

линейно и пропорционально количеству пикселей в изображении, исходя из этого, изображение, представленное интегрально, становится возможным просчитать за один цикл прохода.

Матрица может быть рассчитана по данной формуле:

$$L(x,y) = I(x,y) - L(x-1,y-1) + L(x,y-1) + L(x-1,y).$$

С помощью данной интегральной матрицы становится возможным рассчитать требуемые значения сумм пикселей искомого прямоугольника произвольной площади.

*Признаки Хаара*

Признаком Хаара называется объект  $X$  отображение  $f: X \Rightarrow D_f$  где  $X$  – множество объектов,  $D_f$  – множество допустимых значений признака. Если заданы признаки  $f_1, \dots, f_n$ , то вектор признаков  $f = (f_1(x), \dots, f_n(x))$  называется признаковым описанием объекта  $x \in X$ . Описания признаков условно приравнены к искомым объектам. При этом множество  $X = D_{f_1} * \dots * D_{f_n}$  называют признаковым пространством [6].

В зависимости от множества  $D_f$  различают такие виды признаков, как:

- бинарный признак,  $D_f = \{0,1\}$ ;
- номинальный признак:  $D_f$  – конечное множество;
- порядковый признак:  $D_f$  – конечное упорядоченное множество;
- количественный признак:  $D_f$  – множество действительных чисел.

При работе метода Виолы – Джонса в классической форме применяются прямоугольные признаки. Общий вид данных примитивов Хаара представлен на рис. 1.

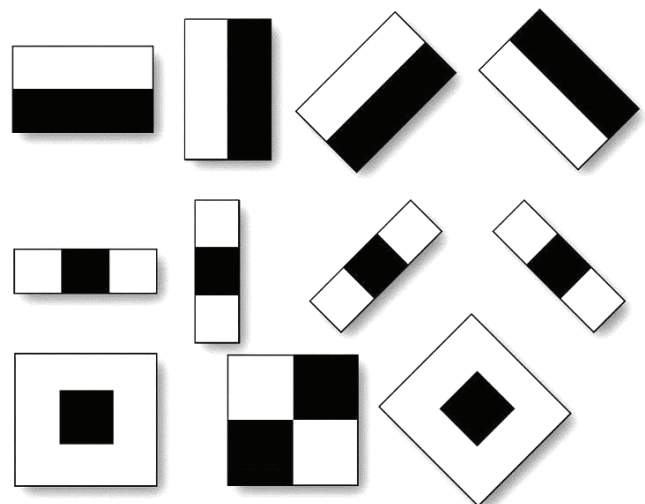


Рис. 1. Примитивы Хаара

В основе библиотеки Open CV помимо основных используется расширенный набор примитивов для модифицированного метода Виолы – Джонса. Общий вид примитивов представлен на рис. 2.

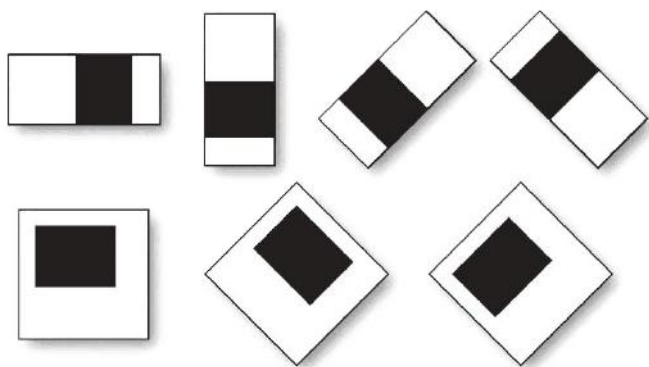


Рис. 2. Расширенный набор примитивов для метода Виолы – Джонса

Для такого признака вычисленное значение будет  $F=X-Y$ , где  $X$  – суммарное значение яркостей точек, закрываемых светлой частью признака, а  $Y$  – суммарное значение яркостей точек, закрываемых темной частью признака. При вычислении данных значений применяется интегральное представление изображения. Признаки Хаара дают точечное значение перепада яркости по оси  $X$  и  $Y$  соответственно.

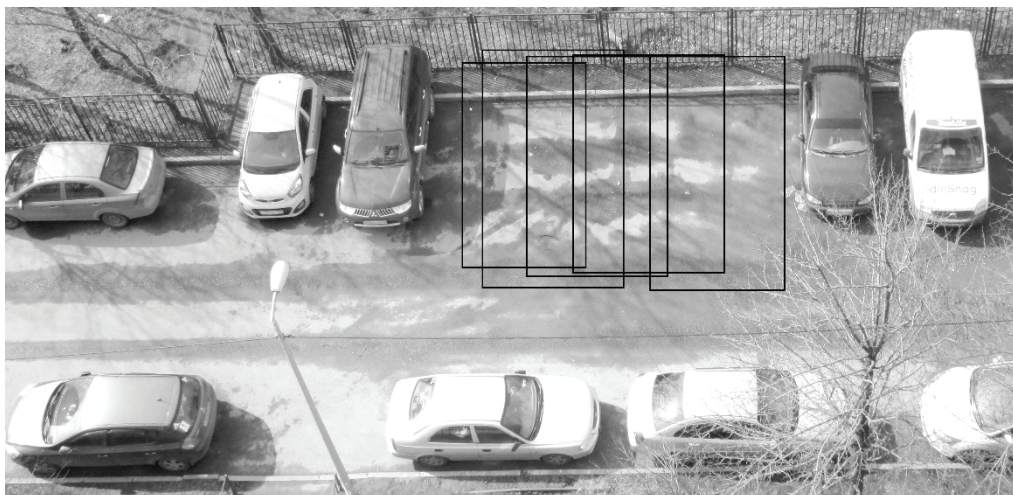


Рис. 3. Размещение автомобиля в заданном пространстве

Вариантов размещения автомобиля в указанных областях существует намного больше, чем представлено на рис. 3. Для обучающей выборки мы должны подготовить кадр для скользящего окна с шагом до 10 пикселей. Это позволит обучить каскад Хаара более эффективно.

### 3. Обучение каскада Хаара

В алгоритме используется модель машинного обучения. Обучение некой машины – это особый процесс получения модулем новых знаний. В методе Виолы – Джонса обучение решает задачу классификации.

### 2. Подготовка выборки для обучения

Для обучения каскада необходимо подготовить положительные и отрицательные примеры. Требуются фотографии в различных погодных условиях и различных условиях освещения. Для решения поставленной задачи требуется отснять не менее 30 фотографий, которые впоследствии будут разрезаны на 230 положительных примеров и 300 отрицательных. Точность работы алгоритма зависит от количества изображений в обучающей выборке. Экспериментально нами выяснено, что для решения задачи поиска парковочного места для автомобиля данные значения являются минимально допустимыми. Негативные примеры выборки должны быть сформированы в той же среде, где будет производиться распознавание, и на них должен отсутствовать объект распознавания.

На рис. 3 приведен пример участка изображения, используемого для положительной выборки. Прямоугольником выделены места, которые по размеру обучающего образца удовлетворяют размерам среднего легкового автомобиля.

Для начала обучения следует создать две папки с примерами. Для каждой такой папки требуется создать специальный текстовый файл, в котором будут описаны подготовленные изображения. Для файла с негативными примерами следует просто пронумеровать изображения от 0 до 300 с указанием расширения.

Для позитивных примеров для обучения требуется указать не только расширение и порядковый номер примера, но и область, в которой содержится объект. Например, для файла с именем «1.bmp» в файл описания записывается строка «1.bmp 0 0 60 100». Числовые значения являются координата-

ми границ изображения, поскольку положительные примеры подготовлены только с содержанием искомого объекта. В файле описания возможно указать сразу несколько объектов, если изображение их содержит. В таком случае следует указать строку «1.bmp 0 0 60 100 60 0 120 200», где вторая четверка чисел – это координаты второго объекта. Наиболее удобным вариантом является использование одного изображения в качестве примера.

Обучение происходит в два этапа. На первом этапе все положительные изображения приводятся к общему формату. В папке, соответствующей разрядности процессора в папке Open CV, находится утилита `opencv_createsamples.exe`. Работа с данной утилитой происходит в консольном режиме и для создания вектора изображений следует ввести следующую команду:

`-info C:\haar\Good.dat -vec samples.vec -w 40 -h 60`, где `-info C:\haar\Good.dat` – путь к файлу с описанием списка положительных изображений выборки с описанием координат объекта;

`-vec samples.vec` – имя файла, в который будет сохранен вектор, содержащий набор положительных изображений для выборки. Файл будет создан в каталоге, где находится `opencv_createsamples.exe`;

`-w 40 -h 60` – приблизительный размер шаблона для скользящего окна, которое сможет вместить объект. Шаблон должен соответствовать пропорциям выделяемого объекта. Размер шаблона не должен быть большим. Размер шаблона прямо влияет на скорость обучения.

В результате работы программы создается файл `samples.vec`, в котором находятся все положительные изображения.

Для создания каскада используется «`opencv_traincascade.exe`». Время работы на компьютере следующей конфигурации занимает порядка шести часов:

CPU AMD Phenom II X6 2.6 GHz/6core  
DDR3 8Gb  
HDD 1Tb

Для работы программы следует ввести в консольном режиме следующую команду:

`-data haarcascade -vec samples.vec -bg E C:\haar\Bad.dat -numStages 16 -minhitrate 0.999 -maxFalseAlarmRate 0.4 -numPos 200 -numNeg 500 -w 40 -h 60 -mode ALL -precalcValBufSize 2048 -precalcIdxBufSize 2048`,

где `-data haarcascade` – адрес папки для создания обученного каскада;

`-vec samples.vec` – адрес файла с положительными примерами;

`-bg C:\haar\Bad.dat` – адрес файла-описания отрицательных примеров;

`-numStages 16` – обучаемое программой количество уровней каскада;

`-minhitrate 0.999` – коэффициент качества обучения;

`-maxFalseAlarmRate 0.5` – уровень ложных срабатываний;

`-numPos 200` – количество позитивных примеров. Указывается 80% от имеющихся положительных файлов;

`-numNeg 300` – количество негативных примеров;

`-w 40 -h 60` – размер примитива;

`-mode ALL` – позволяет включить использование всего набора Хаар-признаков;

`-precalcValBufSize 2048 -precalcIdxBufSize 2048` – выделяемая под процесс память.

В данной задаче необходимо включить полный набор признаков Хаара, поскольку автомобили могут стоять под углом и затруднять поиск парковочного места.

По результатам сформированы файлы с описанием стадий обучения и выходной обученный файл каскада.

#### 4. Работа с обученным каскадом

Для работы с каскадом посредством видеокмеры следует написать программу, которая сможет обеспечить подключение USB-веб-камеры, создать форму для работы и подключить алгоритмы обработки каскада. Для реализации выбран язык C#.

Создается новый пустой проект C#, затем в модуль `Uses` подключаются библиотеки `Emgu`. `Emgu` является интерпретацией `Open CV` для работы с языком программирования C#.

Требуется подключить в проект также файлы библиотек обычной библиотеки `Open CV`.

После этого в главной функции программы происходит определение переменных.

Затем по таймеру происходит захват кадра с входного потока с камеры, который затем преобразуется в черно-белое изображение. Это обусловлено тем, что для экономии памяти следует сжимать входной поток (каждый кадр). Кадр сравнивается с каскадом и в случае положительного ответа запускается функция рисовки черного прямоугольника поверх входного потока. В случае если визуализация результата не требуется, то данная функция позволит принимать решение оповещения водителя о возможности парковки.

#### 5. Тестирование программы

Итоговая программа позволяет определить свободно или занято парковочное место с точностью

порядка 70%. Это означает, что из входного потока стационарной камеры при изменении внешних условий и при переопределении сигнала с камеры при частоте порядка 1 секунды происходит отсутствие признаков выделяемой области в 30 из 100 кадров. Это не влечет за собой опасных последствий, поскольку выдается не положительный, а отрицательный результат. Учитывая постоянно меняющиеся условия – открытое уличное пространство, мы полагаем, что данный результат удовлетворяет поставленной задаче.

Одно из перспективных применений программы состоит в реализации дополнительных модулей с использованием sms-информирования по запросу с предоставлением информации о наличии свободного парковочного места. Этот подход оправдывает себя в случае трудного заезда и невозможности разворота в условиях узких проездов.

#### Заключение

Использование каскада Хаара позволяет определять объекты с достаточной точностью. Программа, созданная в работе, удовлетворяет поставленным задачам поиска парковочного места для легкового автомобиля.

Для увеличения точности работы алгоритма можно использовать параллельные вычисления для увеличения скорости обучения каскада и совершенствование технологии бустинга другими алгоритмами. Повышение точности распознавания можно увеличить комбинацией различных методов.

Перспективы для улучшения программы могут состоять в том, что можно создать модуль, который позволит дистанционно оповещать водителя о возможности парковки, не выполняя заезд в трудные для маневрирования дворы или паркинги.

#### Список литературы

1. *Форсайт Д.* Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Д. Форсайт, Д. Понс. – М.: Изд-во «Вильнос», 2004. – 928 с.

2. *Viola P.* Rapid. Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features [Text] / P. Viola., M. Jones // Computer vision and pattern. – 2001. – С. 4.

3. *Messom C.* Fast and Efficient Rotated Haar-like Features Using Rotated Integral Images [Text] / C. Messom, A. Barczak // Australian Conference on Robotics and Automation (ACRA2006). – 2006. – С. 4.

4. *Schapire R.* The Boosting Approach to Machine Learning: An Overview [Text] / R. Schapire. – USA: MSRI. – 2003. – 23 с.

5. *Lee D.* Wavelet Analysis: Theory and Applications [Text] / D. Lee, A. Yamamoto // Hewlett-Packard Journal. – 1994. – С. 5.

6. *Журавлев Ю.* «Распознавание». Математические методы. Программная система. Практические применения [Текст] / Ю. Журавлев, В. Рязанов, О. Сенько. – М.: Изд-во «Фазис», 2006. – 16 с.

#### References

1. *Forsajt D.* Komp'juternoje zrenie. Sovremennyj podhod [Tekst] / D. Forsajt, D. Pons. – M.: Izd-vo «Vil'nos», 2004. – 928 s.

2. *Viola P.* Rapid. Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features [Text] / P. Viola., M. Jones // Computer vision and pattern. – 2001. – S. 4.

3. *Messom C.* Fast and Efficient Rotated Haar-like Features Using Rotated Integral Images [Text] / C. Messom, A. Barczak // Australian Conference on Robotics and Automation (ACRA2006). – 2006. – S. 4.

4. *Schapire R.* The Boosting Approach to Machine Learning: An Overview [Text] / R. Schapire. – USA: MSRI. – 2003. – 23 s.

5. *Lee D.* Wavelet Analysis: Theory and Applications [Text] / D. Lee, A. Yamamoto // Hewlett-Packard Journal. – 1994. – S. 5.

6. *Zhuravlev Ju.* «Raspoznavanie». Matematicheskie metody. Programmaja sistema. Prakticheskie primenija [Tekst] / Ju. Zhuravlev, V. Rjazanov, O. Sen'ko. – M.: Izd-vo «Fazis», 2006. – 16 s.



**Мухамадиев А.А.**

**Mukhamadiev A.A.**

кандидат технических наук, доцент,

докторант кафедры «Информационно-измерительная техника»

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный

технический университет»,

Россия, г. Уфа

УДК 621.38:669

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В данной работе рассматривается методология SADT, использование которой при разработке интегрированной системы управления акустооптическим преобразователем температуры позволяет определить основные функции системы, разработать системный проект, выявить взаимосвязи между отдельными частями всей системы, что, в свою очередь, обеспечит возможность определения оптимальных характеристик устройства на этапе проектирования.

Разработка модели начинается с построения главного блока «Система измерения температуры на основе акустооптического преобразователя», изображающего интерфейсы с функциями системы. Для детализации главного блока выявляются основные подфункции системы, позволяющие выявить взаимосвязи между элементами и функциями, их выполняющими, такими как: направление излучение; фильтрация узкой области излучения; анализ интенсивности излучения полученного участка спектра; взаимодействие фоточувствительного устройства системы; обработка результатов и управление системой.

На следующем этапе разработки выявляется и производится дальнейшая детализация третьего уровня системы, в которой блоки основных подфункций детализируются каждый отдельно. И на заключительном этапе производится декомпозиция последнего функционального блока, состоящего из шести подфункций, которые в наглядной форме описывают работу микропроцессорной части системы, результатами работы которой является индикация результатов измерения системой, а также генерация управляющего сигнала, направленного на настройку фильтрующего блока.

*Ключевые слова:* моделирование, акустооптический преобразователь температуры, метод SADT, функциональная модель, блок системы.

## FUNCTIONAL MODEL OF THE ACOUSTO-OPTICAL TRANSDUCER OF TEMPERATURE

In this work the methodology of SADT which use when developing of the integrated control system of the acousto-optical transducer of temperature allows to define the main functions of system is considered, to develop the system project, to reveal interrelations between separate parts of all system that in turn will provide possibility of definition of optimum characteristics of the device at a design stage.

Development of model begins with creation of the main block «System of measurement of temperature on the basis of the acousto-optical transducer», representing interfaces with functions of system. For specification of the main block the main subfunctions of system allowing to reveal interrelations between elements, and functions carrying out them, such as the direction radiation come to light; filtration of narrow area of radiation; the analysis of intensity of radiation of the received range site; interactions of the photosensitive structure of system; processing of results and management of system.

At the following development stage further specification of the third level of system in which blocks of the main subfunctions are detailed everyone separately comes to light and made. And at the final stage decomposition of the last functional block consisting of six subfunctions which in an evident form describe work of microprocessor part of system which results of work is indication of results of measurement by system, and also generation of the operating signal directed on setup of the filtering block is made.

*Key words:* modeling, acousto-optical transducer of temperature, SADT method, functional model, block of system.

В работах [5–8, 11] автором были представлены результаты разработки и исследования акустооптического преобразователя температуры. Однако с учетом конструктивных особенностей и сложности физических процессов, лежащих в его основе, возникает необходимость проведения функционального моделирования с целью дальнейших исследований акустооптического преобразователя температуры.

Среди современных инструментов моделирования наибольшее распространение получила методология SADT. Использование данного метода при раз-

работке интегрированной системы управления акустооптическим преобразователем температуры позволяет определить основные функции системы, разработать системный проект, выявить взаимосвязи между отдельными частями всей системы [1–4, 9, 10].

В первую очередь построение SADT-модели начинается с представления всей системы в виде простейшей компоненты – одного блока и дуг, изображающих интерфейсы с функциями вне системы. Общему блоку было дано название «Система измерения температуры на основе акустооптического преобразователя» (рис. 1).

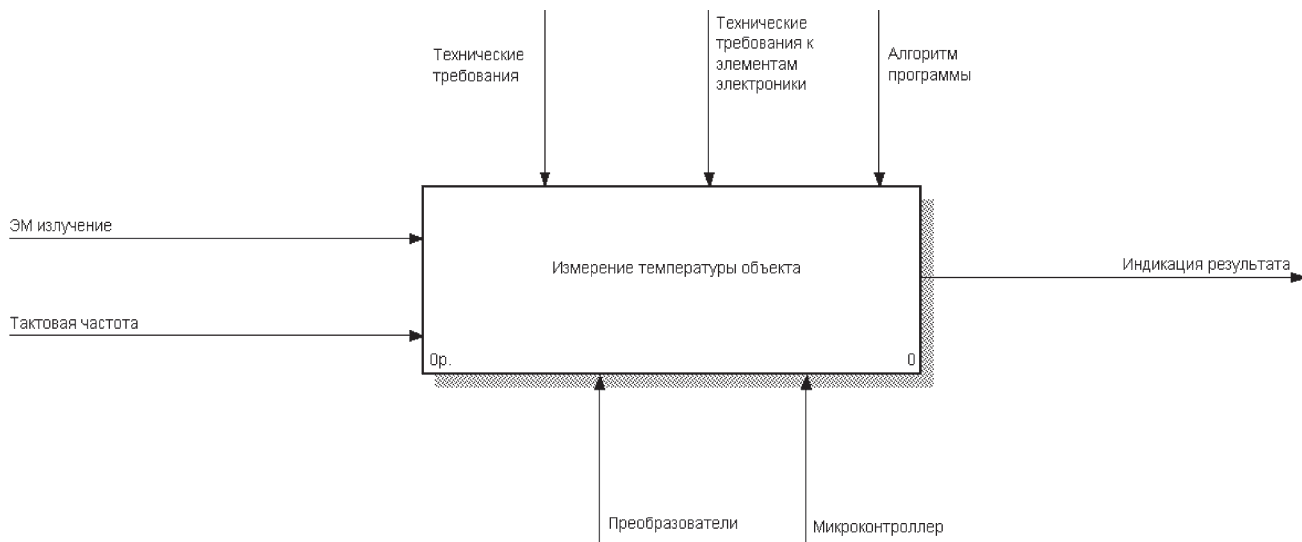


Рис. 1. Главный блок системы

Затем этот блок детализируется с помощью 4 блоков (рис. 2), соединенных интерфейсными

дугами. Эти блоки представляют основные под-функции системы.

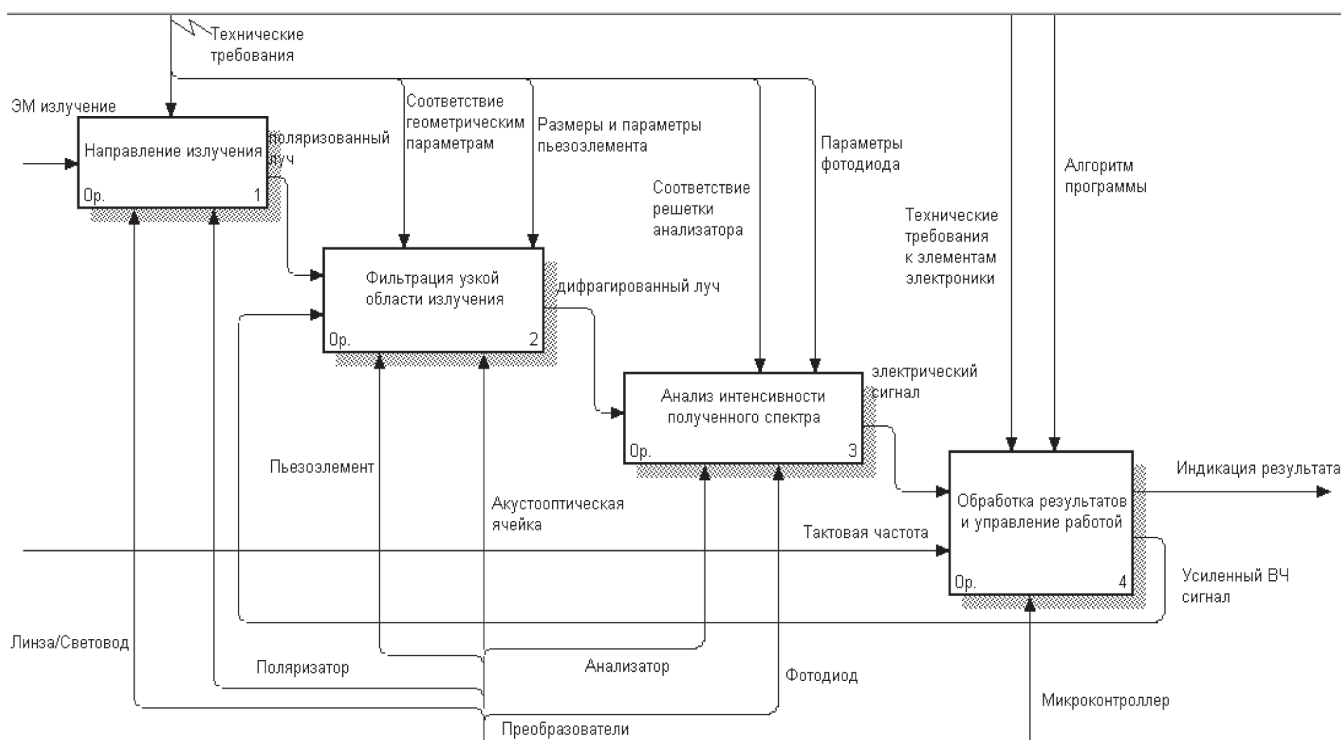


Рис. 2. Детализация главного блока

Первая подфункция, с которой начинается работа системы, – это направление излучения. Под направлением излучения понимаются оптические преломления и преобразования входной электромагнитной волны. Следующая подфункция – фильтрация узкой области излучения. Данная функция реализуется в системе акустооптическим фильтром, соответственно она описывает взаимодействия данного блока. Далее происходит анализ интенсивности излучения полученного участка спектра. Данный функциональный блок характеризует взаимодействия фоточувствительного устройства системы. Послед-

ним функциональным блоком выступает обработка результатов и управление системой. Данные функции выполняет микропроцессорная и электронная часть системы. Далее приведем детализацию третьего уровня системы, в которой блоки основных подфункций детализируются каждый отдельно.

Детализация первой подфункции (рис. 3) системы представляет из себя два блока – направление луча, который характеризует фокусировку и перенаправление излучения объективом, и поляризация, которая описывает подготовку с помощью поляризатора сфокусированного луча к дальнейшей обработке.

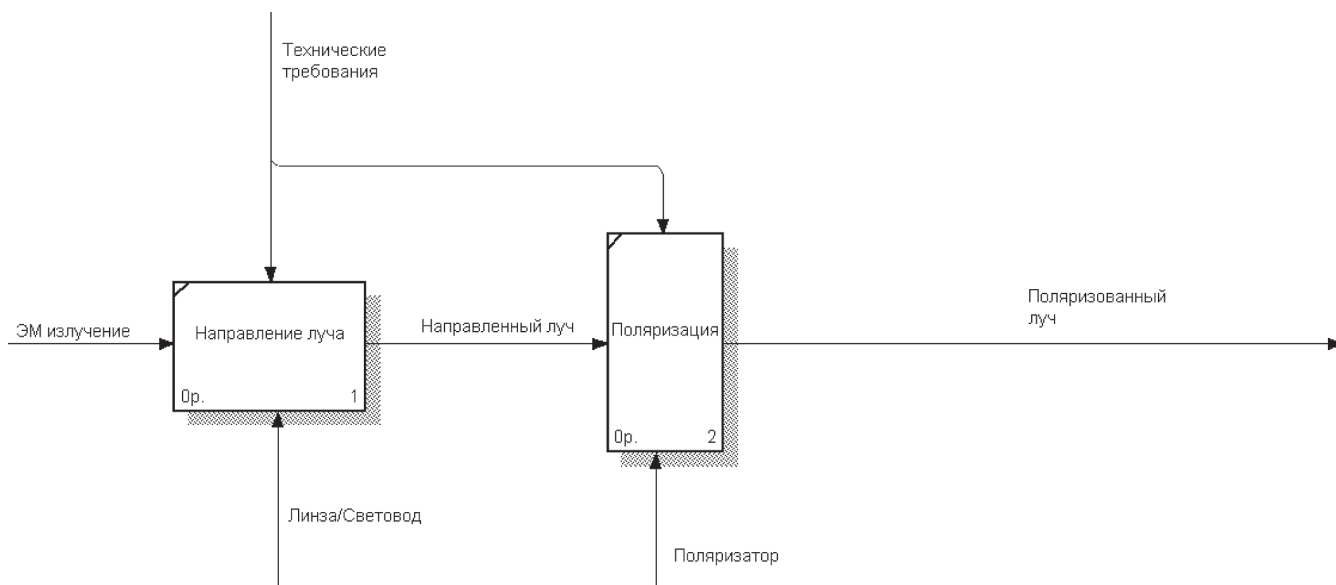


Рис. 3. Детализация блока «Направление излучения»

Детализация второй подфункции (рис. 4) системы основана на двух функциональных взаимодействиях – дифрагировании, которое реализуется аку-

стооптической ячейкой, и необходимого для реализации данной цели второго функционального блока – формирования пьезоэлектрического воздействия.

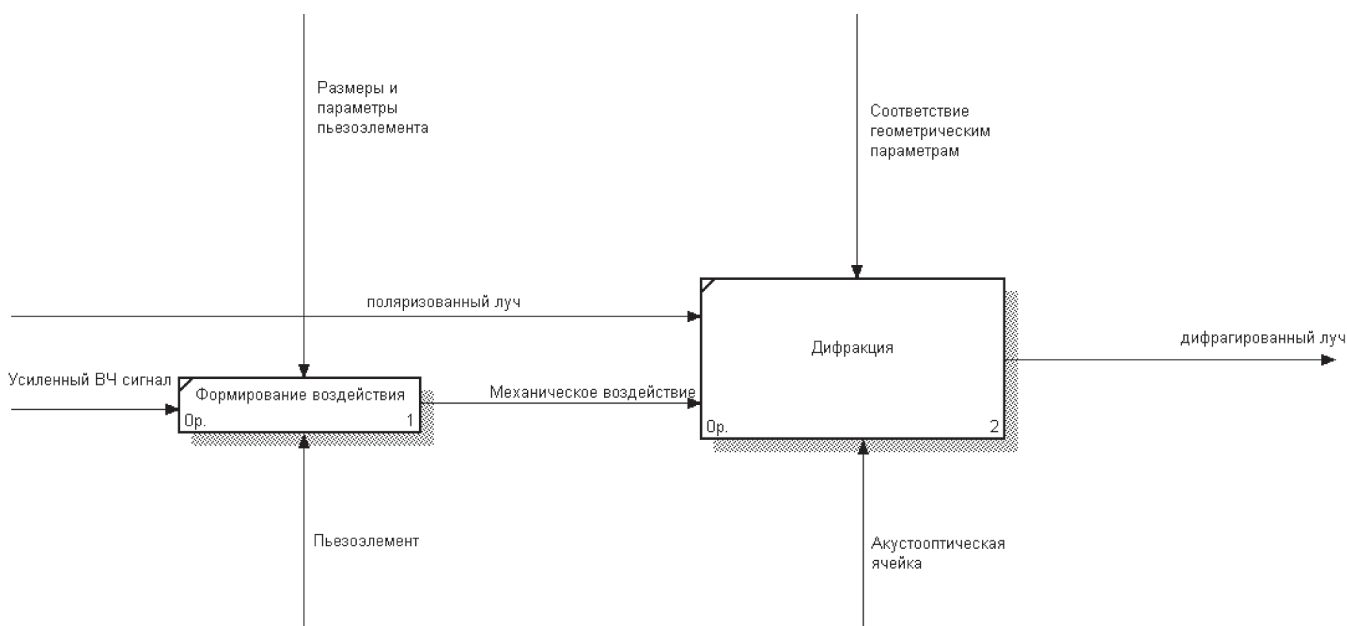


Рис. 4. Детализация блока «Фильтрация»



Функциональный блок «Анализ» (рис. 5) характеризует работу фотоприемного устройства, преобразующего обработанное электромагнитное излучение в электрическую величину, и состоит из двух подфунк-

ций – входной поляризации, которая обуславливает окончательную подготовку обработанного излучения, и фотоэлектрического преобразования, реализующегося фотодиодом или другим подобным датчиком.

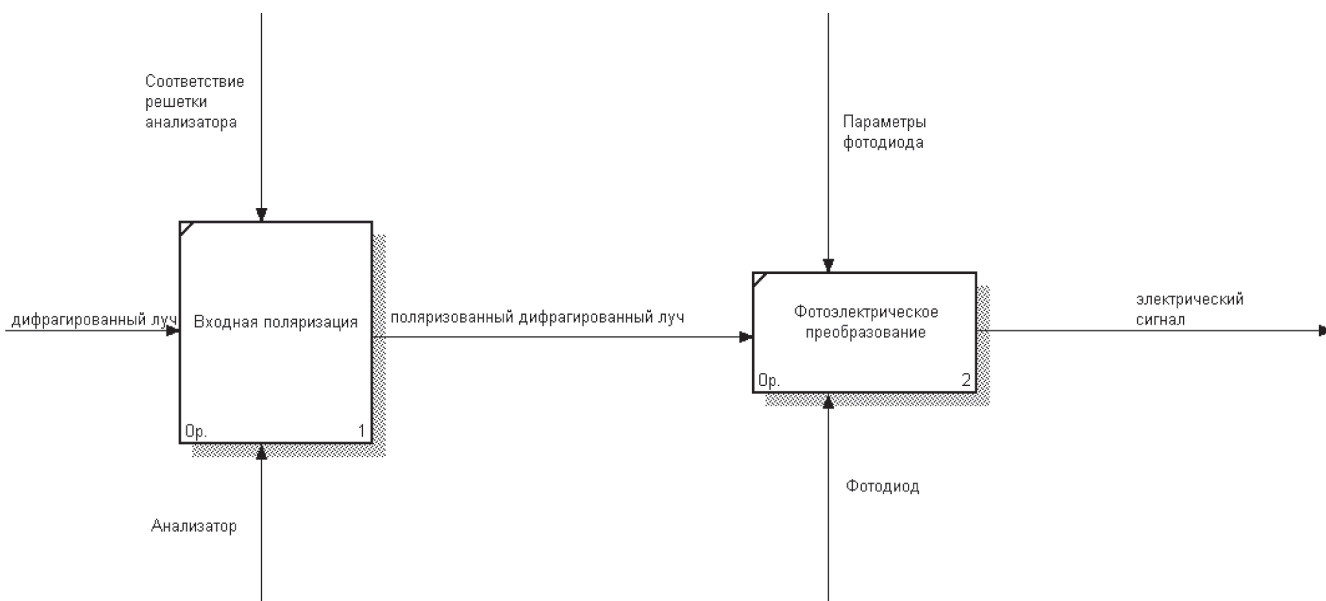


Рис. 5. Детализация блока «Анализ»

Декомпозиция последнего функционального блока (рис. 6) состоит из шести подфункций, которые в наглядной форме описывают работу микропроцессорной части системы. Подфункция «контроль», реализуемая микроконтроллером, включает средства для организации подфункции усиления фототока, аналого-

цифрового преобразования, записи данных и дешифрации, занимающихся обработкой электрического сигнала. Результатами работы данного функционального блока являются индикация результатов измерения системой, а также генерация управляющего сигнала, направленного на настройку фильтрующего блока.

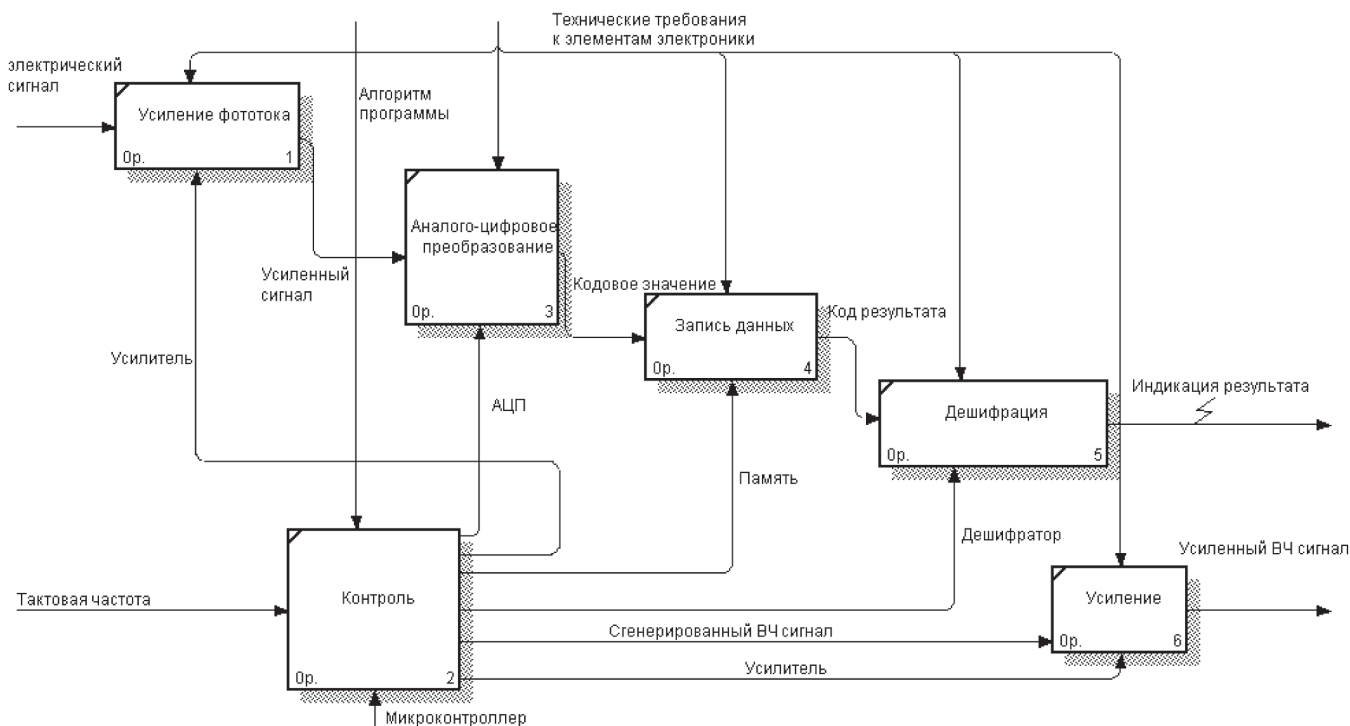


Рис. 6. Детализация блока «Управление»

Таким образом, разработанная функциональная модель акустооптического преобразователя температуры позволяет выявить взаимосвязи между отдельными частями всей системы, что, в свою очередь, обеспечивает возможность определения оптимальных характеристик устройства на этапе проектирования.

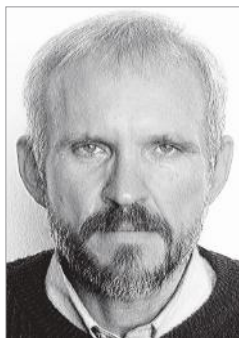
#### Список литературы

1. Антонов А.В. Системный анализ: учебник для вузов [Текст] / А.В. Антонов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
2. Ефанов В.Н. Проектирование базы данных результатов диагностики погружного оборудования на основе информационной модели по стандарту IDEF1X [Текст] / В.Н. Ефанов, А.Н. Китабов, Р.Р. Нугаев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – № 4. – Т. 10. – С. 73–82.
3. Ефанов В.Н. Синтез структуры системы диагностики технического состояния погружного электрооборудования на основе IDEF-технологии [Текст] / В.Н. Ефанов, А.Н. Китабов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 69–75.
4. Куликов Г.Г. Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Системное моделирование предметной области: учебное пособие [Текст] / Г.Г. Куликов, А.Н. Набатов, А.В. Речкалов; УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 104 с.
5. Мухамадиев А.А. Акустооптический преобразователь температуры / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов [Текст] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 1. – С. 26–28.
6. Мухамадиев А.А. Классификация оптических преобразователей температуры для систем экологического и техносферного мониторинга [Текст] / А.А. Мухамадиев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – № 4. – Т. 10. – С. 113–117.
7. Мухамадиев А.А. Математическая модель акустооптического пирометра [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С. 28–30.
8. Мухамадиев А.А. Статическая характеристика, чувствительность и разрешающая способность акустооптического пирометра [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов // Датчики и системы. – 2011. – № 11. – С. 41–43.
9. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие [Текст] / Ю.П. Сурмин. – К.: МАУП, 2003. – 368 с.
10. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ: [учебное пособие по специальности «Государственное и муниципальное управление»] [Текст] / Ф.П. Тарасенко. – М.: КноРус, 2010. – 219 с.
11. Фаррахов Р.Г. Универсальный пирометр для измерения высоких температур [Текст] / Р.Г. Фаррахов, А.А. Мухамадиев // Датчики и системы. – 2010. – № 11. – С. 23–25.

#### References

1. Antonov A.V. Sistemnyj analiz: uchebnik dlja vuzov [Tekst] / A.V. Antonov. – M.: Vysshaja shkola, 2004. – 454 s.
2. Efanov V.N. Proektirovanie bazy dannyh rezul'tatov diagnostiki pogruzhnogo oborudovanija na osnove informacionnoj modeli po standartu IDEF1X [Tekst] / V.N. Efanov, A.N. Kitabov, R.R. Nugaev // Jelektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. – 2014. – № 4. – t . 10. – S. 73–82.
3. Efanov V.N. Sintez struktury sistemy diagnostiki tehničeskogo sostojanija pogruzhnogo jelektrooborudovanija na osnove IDEF-tehnologii [Tekst] / V.N. Efanov, A.N. Kitabov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. – 2013. – T. 9. – № 4. – S. 69–75.
4. Kulikov G.G. Avtomatizirovannoe proektirovanie informacionno-upravljajushhih sistem. Sistemnoe modelirovanie predmetnoj oblasti: uchebnoe posobie [Tekst] / G.G. Kulikov, A.N. Nabatov, A.V. Rechkalov; UGATU. – Ufa: UGATU, 1998. – 104 s.
5. Muhamadiev A.A. Akustooptičeskij preobrazovatel' temperatury / A.A. Muhamadiev, R.G. Farrahov [Tekst] // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2011. – № 1. – S. 26–28.
6. Muhamadiev A.A. Klassifikacija optičeskikh preobrazovatelej temperatury dlja sistem jekeologičeskogo i tehnosfernogo monitoringa [Tekst] / A.A. Muhamadiev // Jelektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. – 2014. – № 4. – t . 10. – S. 113–117.
7. Muhamadiev A.A. Matematičeskaja model' akustooptičeskogo pirometra [Tekst] / A.A. Muhamadiev, R.G. Farrahov // Datchiki i sistemy. – 2012. – № 2. – S. 28–30.
8. Muhamadiev A.A. Statičeskaja harakteristika, čuvstvitel'nost' i razreshajushhaja sposobnost' akustooptičeskogo pirometra [Tekst] / A.A. Muhamadiev, R.G. Farrahov // Datchiki i sistemy. – 2011. – № 11. – S. 41–43.
9. Surmin Ju.P. Teorija sistem i sistemnyj analiz: ucheb. posobie [Tekst] / Ju.P. Surmin. – K.: MAUP, 2003. – 368 s.
10. Tarasenko F.P. Prikladnoj sistemnyj analiz: [učebnoe posobie po special'nosti «Gosudarstvennoe i municipal'noe upravlenie»] [Tekst] / F.P. Tarasenko. – M.: KnoRus, 2010. – 219 s.
11. Farrahov R.G. Universal'nyj pirometr dlja izmerenija vysokih temperatur [Tekst] / R.G. Farrahov, A.A. Muhamadiev // Datchiki i sistemy. – 2010. – № 11. – S. 23–25.

# НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS



**Леонов В.В.**  
**Leonov V.V.**

*кандидат биологических наук,  
заведующий сектором электрохимических  
исследований лаборатории «Физико-химическая  
механика» ФГБУН «Институт механики» УНЦ РАН,  
Россия, г. Уфа*



**Денисова О.А.**  
**Denisova O.A.**

*доктор физико-математических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Физика»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
университет экономики и сервиса»,  
Россия, г. Уфа*

УДК 530.1:536.7:539.3:538.9

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СДВИГОВОГО ДЕЙСТВИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Представлено теоретическое обоснование электродинамического подхода к оценке периодического сдвигового действия в конденсированных средах в связи с феноменом стохастической модуляции. Для структуры жидких кристаллов экспериментально показана реализация режимов гидродинамических макроскопических флуктуаций. Полученные результаты определяют возможность совершенствования прямой и косвенной электрометрии свойств молекулярных систем.

В работе экспериментально исследовался нематический жидкий кристалл 4-октил-4'-цианобифенил (ОЦБ), который имеет нематическую фазу при температуре 39 °С. Молекулы жидкого кристалла были ориентированы гомеотропно, толщина образцов  $h = 20 - 125$  мкм. ЖК-ячейка представляла собой сборку из трех пластин. Две массивные пластины разделены между собой тонкими стеклянными прокладками. Третья тонкая пластина из покровного стекла могла совершать горизонтальные колебания в плоскости ячейки. Частоты сдвигового воздействия были до 500 Гц, амплитуды сдвига достигали 900 мкм. Оптический спектр сигнала рассчитывался с помощью Фурье-преобразования.

В результате механического действия на ЖК-образец визуально наблюдались структурные изменения в нем. При амплитуде  $A \approx 95$  мкм фиксировались поперечные домены – роллы, при амплитуде сдвига  $A \approx 110$  мкм – продольные домены, а при  $A \approx 140$  мкм эти домены разрушались, ЖК-слой разбивается на быстродвижущиеся и осциллирующие кластеры.

В оптическом спектре обнаружены два локальных максимума при частотах  $\omega_1 \approx 2$  Гц и  $\omega_2 \approx 4$  Гц, что говорит о наличии периодических движений, связанных, например, с периодической конвекцией в слое жидкого кристалла.

*Ключевые слова:* нематические жидкие кристаллы, электродинамика конденсированных сред, напряжение сдвига, турбулентное гидродинамическое течение, жидкокристаллические молекулярные системы, электрометрия.

## ELECTRODYNAMICS SHEARING ACTION MODE OF TURBULENCE AND SALES IN CONDENSED MATTER

The theoretical justification for the electrodynamic approach to the assessment of periodic shear action in condensed matter due to the phenomenon of stochastic modulation. For the structure of the liquid crystal experiment shows the implementation of the macroscopic hydrodynamic regimes fluctuations. The results determine the possibility of improving the direct and indirect electrometry properties of molecular systems.

The experimentally investigated nematic liquid crystal 4-octyl-4'-cyanobiphenyl (CBS), which has a nematic phase at a temperature of 39 °C. The liquid crystal molecules are oriented homeotropically, sample thickness  $h = 20\text{--}125$  microns. LCD – the cell is an assembly of three plates. The two massive plates separated by a thin glass seals. The third thin plate of the cover glass can make horizontal vibrations in the plane of the cell. Frequencies shear were 500 Hz, amplitude shift reaches 900 microns. The optical spectrum of the signal is calculated using – Fourier transform.

As a result of mechanical action on the LCD – the sample is visually observed structural changes in it. When the amplitude of the recorded  $A \approx 95$  micron cross domains – rolls, with an amplitude shift  $A \approx 110$  mm – longitudinal domains, and in these domains  $A \approx 140$  microns destroyed LCD – layer is divided into fast-moving and oscillating clusters.

The optical spectrum exhibits two local maxima at frequencies  $\omega_1 \approx 2$  Hz  $\omega_2 \approx 4$  Hz, indicating the presence of periodic motions, such as those associated with periodic convection in the liquid crystal layer.

*Key words:* nematic liquid crystals, electrodynamics of condensed matter, shear stress, turbulent hydrodynamic flow, liquid crystal molecular systems electrometry.

### *Введение*

Заданное внешнее механическое воздействие на конденсированные среды определяет практические цели технологических процессов изменения макроскопических свойств молекулярных систем [1]. Макроскопические эффекты сопутствуют и технологиям приложения сдвиговых сил [2, 3].

Сдвиговое действие рассматривают в рамках механико-математического подхода, основы которого заложены еще И. Ньютоном [2]. Показателем вязкоупругих свойств жидкостей служит напряжение сдвига с размерностью давления [4]

$$\tau = -\eta \frac{dv}{dn}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, напряжение трения по Ньютону,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости,  $\frac{dv}{dn}$  – производная скорости  $v$  по нормали  $\vec{n}$ , градиент вдоль оси.

Анализ размерностей [4, 5] свидетельствует о неслучайном равенстве их для сдвигового воздействия (аналогична размерность и модуля Юнга). Жидкости обладают лишь специфической упругостью объема [5, 6], объемное распределение свободной энергии имеет вид [6]

$$p = -\frac{\partial G}{\partial V}. \quad (2)$$

Физический смысл свободной энергии не определен [4–7].

Феноменологический формализм механики затрудняет создание новых направлений физикохимии молекулярных систем, исследование которых опре-

делено анализом получаемых электронных спектров поглощения.

Актуальное научно-практическое направление надмолекулярных кластерных технологий представлено комплексом исследований жидкокристаллических ансамблей, реализуемых в гидродинамическом эксперименте, в процессе которого осуществляют различные режимы макроскопического перемещения конденсированной среды [8, 9].

Особенности экспериментального подхода при изучении поведения жидкокристаллических систем в пределах тонкого слоя состоят в сочетании периодического низкочастотного сдвига с оптическим контролем результата действия при использовании полученного спектра с последующим определением его эффективной ширины после проведенного Фурье-преобразования [8].

Цель настоящего сообщения задана электродинамическими аспектами теории связи спектров поглощения с механикой жидкости.

### *Теоретическое обоснование*

1) *Действие сдвиговых сил в плоских слоях конденсированных сред.*

Показателем вязких свойств жидкого состояния выступают соотношения приложенного давления и скорости перемещения. Возможность движения жидкостей при заданном давлении (энергия активации вязкого течения) определена «напряжением сдвига» (трения) [5, 10].

Описание наблюдаемой картины гидродинамических течений стохастического типа (реализа-

ция режима турбулентности) может быть дополнено фундаментальной зависимостью модуля амплитуды нестационарного движения от некоторого конечного предела, препятствующего его неограниченному росту (критерий Ландау – Хопфа) [5]

$$\frac{d|A|^2}{dt} = 2\gamma_1|A|^2. \quad (3)$$

Эта зависимость определена производной по времени  $t$  квадрата модуля амплитуды сдвига  $A$ , то есть первой компонентой разложения в ряд амплитуды сдвига по комплексной частоте возмущений  $\omega = \omega_1 + i\gamma_1$ , ( $\gamma_1$  – коэффициент мнимой части комплексной частоты возмущения, при  $\gamma_1 < 0$  мнимая часть отрицательна, движение устойчиво). С точностью до четвертого порядка среднее значение производной по времени квадрата модуля амплитуды сдвига ( $\alpha$  – постоянная Ландау) –

$$\frac{d|A|^2}{dt} = 2\gamma_1|A|^2 - \alpha|A|^4. \quad (4)$$

Решение для амплитуды сдвига имеет вид

$$|A|^{-2} = \frac{\alpha}{2\gamma_1} + const \cdot \exp(-2\gamma_1 t). \quad (5)$$

Выражение для квадрата модуля, асимптотически стремящегося к конечному пределу:

$$|A|_{\max}^2 = \frac{2\gamma_1}{\alpha}. \quad (6)$$

Совершенно очевидна и гидродинамическая постановка задачи о турбулентном течении жидкости. Так, получение для плоско-параллельного турбулентного потока логарифмического распределения скоростей формально во всем пространстве связано с бесконечной площадью стенки [3, 5].

Аналогична ситуация и в ротационном вискозиметре – сдвиговое действие приводит к реально турбулентному течению жидкости и среднему измеряемому коэффициенту динамической вязкости [10].

Реальной причиной возникновения колебаний служат флуктуации плотности объемного заряда в среде [6, 7].

2) *Электродинамические соотношения для сдвигового воздействия. Постановка совместных задач электростатики и теории упругости.*

Краевые задачи с решением переходного типа [2, 11] существенно влияют на постановку задачи Коши в рамках гидродинамического континуума в качестве объектов силовых полей макроскопической электродинамики и теории упругости [7]. Определение поля в макроскопическом теле совместно с соотношениями тензора напряжений означает совместное решение уравнений типа

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0, \quad (7)$$

$$\nabla [\vec{E}] = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0, \quad (9)$$

где  $\nabla \cdot \vec{D}$  – дивергенция электрической индукции  $\vec{D}$ ,  $\nabla [\vec{E}]$  – ротор напряженности  $\vec{E}$  электрического поля,  $\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0$  условие равновесия для объемной силы через тензор напряжений  $\sigma_{ik}$ .

Основу подхода составляет реальность взаимодействия компонентов жидкостей через самосоглазованное макроскопическое стационарное электрическое поле  $\vec{E}$ , локализованное в объеме  $V$  конденсированной среды заряда  $q$  с плотностью  $\rho$  [12]:

$$q = \int \rho dV. \quad (10)$$

С зарядом связан поток электрического поля через поверхность  $f$  данного объема и, следовательно, динамические свойства среды:

$$\oint \vec{E} df = 4\pi \int \rho dV. \quad (11)$$

Правая часть – объемный интеграл заряда, математикой которого определена динамика среды согласно теореме Стокса о роторе вектора [13]. Из выражения для ротора следует «силовое поле» сплошной среды.

С механикой поля связаны эффекты передачи давления в среде, регистрируемые и «спектральным интегралом», и вискозиметром. Вискозиметр измеряет касательную тензора давления, определяющую механический момент системы [5]. Давлением света объяснена и сущность «спектрального интеграла».

Теория такого вискозиметра [10] основана на уравнениях гидродинамики и макроскопической электродинамики, совместное решение которых выражено скалярной связью моментов:

$$4\pi\eta \frac{u}{d} = E^2 \sin \theta, \quad (12)$$

где  $\eta$  – вязкость,  $u$  – линейная скорость,  $d$  – расстояние (зазор) между цилиндрами с аксиальным поворотом на угол  $\theta$ .

Равенство (12) следует из выражений скалярного и векторного потенциалов электромагнитного поля ( $r$  – расстояния до точки наблюдения,  $\rho$  – плотность заряда,  $v$  – его скорость,  $\vec{j}$  – плотность тока):

$$\varphi = \int \frac{\rho dV}{r} + \frac{1}{2c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int r \rho dV, \quad (13)$$

$$A = \frac{1}{c} \int \frac{\rho \vec{v}}{r} dV, \quad \vec{j} = \rho \vec{v}. \quad (14)$$

В (13) при равномерном движении второй интеграл равен нулю (ускорение отсутствует), а (14) мало' (скорость  $v$  мала по сравнению с  $c$  – электродинамической постоянной).

Обе части (12) имеют размерность давления (физический смысл – закон сохранения энергии). Квадрат напряженности электрического поля объемного заряда среды равен энергии интегральной

силы осциллятора при накоплении ее в среде без диссипации. За вычетом тепловых потерь вся кинетическая энергия спектрального интеграла переходит в потенциальную энергию макроскопического поля. Имеет место идентичность спектрального интеграла интегралу поля объемного заряда.

При определении динамической вязкости механическое воздействие (давление) со стороны «пробного тела» на систему зарядов среды аналогично воздействию внешнего поля напряженностью  $\vec{E}$ . Его появление приводит к изменению поля в образце  $\vec{E}_0$ .

Согласно статистической физике [6], гамильтониан системы частиц от свободной энергии определен из выражений

$$\frac{\partial \hat{H}}{\partial \lambda} = \left( \frac{\partial G}{\partial \lambda} \right)_T. \quad (15)$$

Производная от оператора Гамильтона  $\hat{H}$  по внешнему действующему параметру  $\lambda$  эквивалентна производной от свободной энергии по тому же параметру при постоянной температуре (изотермические условия для свободной энергии при изменении действующего параметра).

Полный электрический момент тела [7]

$$\vec{P} = \left( \frac{\partial G}{\partial \vec{E}} \right). \quad (16)$$

Из условия однородности поля и линейной связи  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  ( $\vec{D}$  – электрическая индукция,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость) свободная энергия вычисляется не как вариация «механической работы» и энергии поля, а выражена в явном виде [2, 6, 7]:

$$\Delta G = G - G_0(V, T) = \int \frac{\vec{E}\vec{D} - E^2}{8\pi} dV, \quad (17)$$

$$\Delta G = G - G_0(V, T) = -\frac{1}{2} \int \vec{E}\vec{P} dV, \quad (18)$$

в однородном электрическом поле в объеме среды

$$\Delta G = -\frac{1}{2} \vec{E}\vec{P}. \quad (19)$$

Энергия активации вязкого течения (сдвиговой деформации) жидкости равна изменению свободной энергии объема поляризованной среды.

Связь этой энергии с «интегральной силой осцилляторов» вещества тела при поглощении им электромагнитного излучения можно определить следующим образом. Со стороны падающей электромагнитной волны на объем образца действует сила

$$\vec{F} = \int (\vec{P}\nabla)\vec{E} dV, \quad (20)$$

в однородном поле волны

$$\vec{F} = \left( \int \vec{P} dV \right) \vec{E} = (\vec{P}\nabla)\vec{E}, \quad (21)$$

и, с учетом  $\vec{P} = \sum q\vec{r}$ , на «полный дипольный заряд» действует переменная сила  $\vec{F} = q\vec{E} = q\vec{E}_0 e^{-i\omega t}$  ( $\omega$  – частота падающей волны). Момент  $\vec{P} = -\frac{q^2}{m\omega^2} N\vec{E}$  [7].

Подстановка в векторное выражение для  $\Delta G$  дает

$$\Delta G = -\frac{1}{2} \vec{E}\vec{P} = -\frac{\epsilon - 1}{8\pi} E^2 = \frac{q^2}{2m\omega^2} NE^2. \quad (22)$$

Согласно «правилу сумм» [6], число носителей заряда соответствует интегральной силе осцилляторов  $\int_0^\infty f(\omega) d\omega = N$ , где  $f(\omega) d\omega$  – сила осциллятора.

Как определено «не квантовой» теорией, дисперсия имеет вид

$$\epsilon(\omega) = 1 - 4\pi N \frac{q^2}{m\omega^2}. \quad (23)$$

3) *Электродинамический смысл уравнений гидродинамики.*

Силы, действующие на конечный объем тела, сведены к силам, приложенным к поверхности объема, как следствие закона сохранения импульса.

Сила, приложенная к веществу объема, равна изменению импульса за единицу времени, изменение равно количеству импульса, втекающего в объем через поверхность

$$\int f_i dV = \oint \sigma_{ik} df_k. \quad (24)$$

Из тензорных представлений потока импульса следует тензор напряжений

$$\sigma_{ik} df_k = \sigma_{ik} n_k df. \quad (25)$$

Полный момент сил, действующих на данный объем, равен поверхностному интегралу

$$\int f_i dV = \int \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} dV. \quad (26)$$

Сохранение интеграла движения (момента импульса) и симметричность тензора напряжений определяет свойства полного момента.

Сведение объемных сил к тензору напряжений аналогично (9)

$$f_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}. \quad (27)$$

Использование электродинамики позволяет исключить постановку трудоемких совместных краевых задач электродинамики и теории упругости. Анализ размерностей устанавливает идентичность сдвигового давления и напряжения сдвига, равного квадрату напряженности электрического поля в выделенном объеме вещества. Соотношения для сохраняющегося интеграла движения (потенциальной энергии), определяют обход математических затруднений совместных краевых задач гидродинамики и макроскопической электродинамики.

4) *Особенности электродинамики жидкокристаллических систем и гидродинамические эффекты поля.*

Внутренние напряжения, появляющиеся в изотропном теле в электрическом поле, представляют собой эффект, квадратичный по полю [6, 7]:

$$D_i = D_{0i} + \epsilon_{ik} E_k, \quad (28)$$

$$D_i = D_{0i} + \epsilon_{ik} E_k + 4\pi\gamma_{i,kl} \sigma_{kl}, \quad (29)$$

где  $\epsilon_{ik}$  – диэлектрический тензор (скалярная диэлектрическая проницаемость заменена им),  $4\pi\gamma_{i,kl}\sigma_{kl}$  – запись линейных компонент разложения вектора  $\vec{D}$  по степеням компонент тензора второго ранга в наиболее общем виде,  $\gamma_{i,kl}$  – симметричный тензор третьего ранга (пьезоэлектрический тензор). Им полностью определены пьезоэлектрические свойства кристалла.

Задача упрощается для изотропных тел, а также жидкокристаллических структур с некоторым выделенным направлением преимущественной ориентации молекул. Направление задано в каждой точке среды единичным вектором  $\vec{d}$  – директором кристалла.

Недеформированный жидкий кристалл имеет постоянное направление директора вдоль всего объема, при деформации кристалла направление директора – функция координат.

$$D_i = \epsilon_{ik} E_k + 4\pi e_1 d_i \nabla \cdot \vec{d} + 4\pi e_2 (\nabla [\vec{d}] \vec{d})_i, \quad (30)$$

$$\epsilon_{ik} = \epsilon_0 \delta_{ik} + \epsilon_a d_i d_k, \quad (31)$$

где  $\epsilon_{iki}$  – тензор диэлектрической проницаемости нематического кристалла,  $\delta_{ik}$  – компоненты единичного 4-тензора.

То есть наиболее общий полярный вектор, составленный из директора и его первых производных по координатам, ответственен за рассматриваемый эффект. Эффект выражен в наличии двух локальных экстремумов на кривой эффективной ширины оптической плотности периодического низкочастотного сдвига в плоскопараллельном слое среды конечных размеров. Первый экстремум задан значением дивергенции вектора поля директора и кратен его модулю. Второй экстремум определен скалярным произведением ротора вектора поля директора на вектор директора.

Запись разложения (28) в виде (30) непосредственно определяет возможные появления максимумов, за которые и ответственны два последних слагаемых. Автоматическая инвариантность выражения для индукции относительно изменения знака директора определяет однозначность гидродинамических эффектов, регистрируемых зависимостью интенсивности оптического сигнала от амплитуды сдвига (13).

5) *Эффективная ширина оптического спектра как интегральный электродинамический показатель реализации гидродинамических режимов перемещения среды.*

Разложив потенциал (32) и напряженность (33) поля зарядов выделенного объема вещества в пространственный интеграл Фурье [12], можно получить соотношения для формального представления поля плоскими волнами ( $\vec{k}, k^2$ )

$$\varphi_k = 4\pi \frac{q}{k^2}, \quad (32)$$

$$\vec{E}_k = -4\pi i q \frac{\vec{k}}{k^2}. \quad (33)$$

Смысл  $q$  отражен соотношением (10).

Поле зарядов не удовлетворяет однородному волновому уравнению, поэтому каждый компонент разложения поля не удовлетворяет этому уравнению. Для плоских волн разложения не выполнено условие  $k^2 = \omega^2/c^2$  плоских монохроматических электромагнитных волн.

Проведенное разложение показывает направленность поля волн электростатического поля по волновому вектору. Поскольку волны продольные, а частота их равна нулю (поле стационарно), отличие от нуля волновых векторов непосредственно определяет эффективную ширину оптического спектра. Собственные колебания поля зависят только от абсолютной величины волнового вектора. Они могут быть стоячими или бегущими плоскими волнами. Вычисление полной энергии и полного импульса поля приводит к возможности представления уравнений поля в виде уравнений с функцией Гамильтона [2, 12]. Тождественность уравнений поля и уравнений движения ответственна за характер макроскопического распределения вещества среды. Таким образом, результат действия сдвига аналогичен разложению поля на осцилляторы. Выражения (28)–(31) определяют экспериментально наблюдаемые далее эффекты.

#### *Экспериментальные результаты и их обсуждение*

Вопрос о типе реализации состояния неравновесной среды или поля директора при конечном превышении порога устойчивости равновесия весьма существенен для понимания характера сдвиговой неустойчивости и хаотизации молекулярной системы при значительных величинах воздействия. До недавнего времени преобладало мнение об установлении наиболее типичного режима полностью неупорядоченных (турбулентных) состояний поля. Происходит формирование регулярного пространственно-временного нетривиального образования – структуры как результата самосогласованного нелинейного взаимодействия различных элементарных возбуждений. Установление же пространственно-временного беспорядка определяет режим турбулентности, поскольку реализуемые комбинации элементарных возбуждений проявляют неустойчивость. Несмотря на постоянную привлекательность проблемы соотношения хаоса и порядка для физиков, теория нелинейных структур (самоорганизация) и теория перехода к турбулентному состоянию сосуществовали независимо. Однако успехи нелинейной динамики [8, 9, 14–18] и принципиально новые подходы к изучению турбулентного состояния позволили рассмотреть проблемы взаимосвязи турбулентности и структур [14]. Жидкие кристаллы (ЖК)

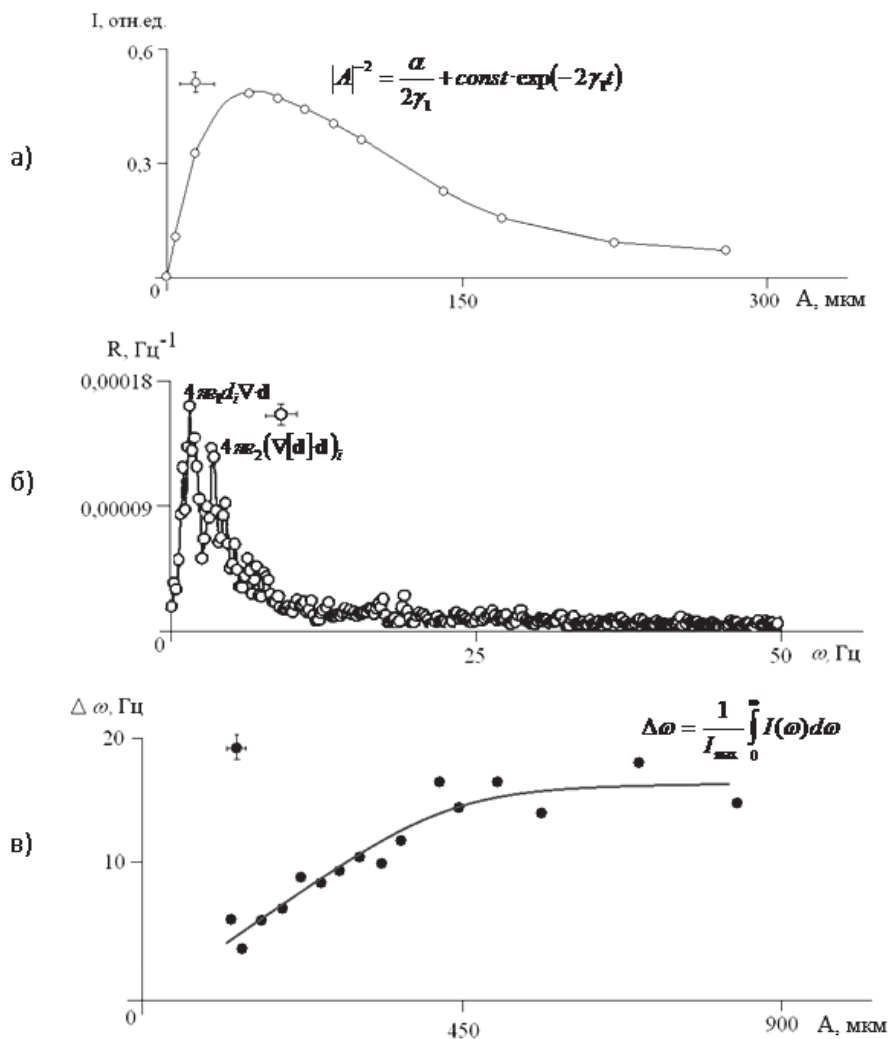
как анизотропные жидкости показывают разнообразие структурных превращений и неустойчивостей из-за наличия дополнительной степени свободы – кристаллического порядка. Представленные соображения свидетельствуют об актуальности вопроса о переходе к турбулентному состоянию и динамическому хаосу при периодическом низкочастотном сдвиге ( $\omega < 500$  Гц) в однородно ориентированных гомеотропных тонких слоях нематических ЖК.

В работе изучены нематические слои толщиной  $h = 20 - 125$  мкм с гомеотропной ориентацией молекул жидкого кристалла. Исследуемый диапазон амплитуд  $A < 900$  мкм. Прямую запись сигнала производили с использованием прибора для исследования вероятностных характеристик случайных процессов, с последующим расчетом с помощью Фурье-преобразования спектра оптического сигнала. Эффективную ширину оптического спектра определяли по формуле

$$\Delta\omega = \frac{1}{I_{\max}} \int_0^{\infty} I(\omega) d\omega, \quad (34)$$

где  $I_{\max}$  – максимальное значение интенсивности оптического сигнала в спектре.

В результатах экспериментов рассмотрено воздействие сдвиговой волны низкой частоты  $\omega = 190$  Гц на слой 4-октил-4'-цианобифенила (ОЦБ) толщиной  $h = 35$  мкм, находящийся при температуре  $39^\circ\text{C}$ . На рис. а представлена огибающая оптического сигнала от амплитуды воздействия  $A$ . По мере увеличения амплитуды слой ЖК просветляется (никили скрещены), величина интенсивности прошедшего света при некотором значении  $A$  достигает максимума, затем плавно спадает. Спад связан как с неоднородным распределением директора по толщине образца, появлением конвективных низкочастотных течений типа роллов, так и с разрывом непрерывности ориентации поля директора, генерацией доменных стенок, сильно рассеивающих и уменьшающих прозрачность слоя при возрастании амплитуды. Так, амплитуду  $A \approx 95$  мкм характеризуют поперечные домены типа роллов, амплитуде сдвига  $A \approx 110$  мкм соответствуют продольные домены, при  $A \approx 140$  мкм отмечено их разрушение.



а) Зависимость интенсивности оптического сигнала от амплитуды сдвига, б) спектр оптического сигнала при  $A = 125$  мкм, в) зависимость ширины спектра от амплитуды сдвига



Основные затруднения исследовательских подходов к рассмотрению режимов турбулентности в жидких кристаллах определены нелинейностью связи их оптических и электрических свойств (характером поведения углов ориентации директора). В отличие от жидкостей, в которых рассеяние обусловлено флуктуациями плотности вещества среды (критическая опалесценция) [18], рассеяние в ЖК анизотропное и связано одновременно с различными механизмами. Некоторые выводы в аспекте установления закономерностей поведения системы можно сделать по результатам анализа частотных спектров прошедшего оптического сигнала.

На рис. 6 изображена типичная частотная зависимость оптического сигнала при  $A = 125$  мкм. Возбуждение в ЖК-системе низкочастотных стохастических мод частотного диапазона  $\omega < 25$  Гц связано как с девиациями директора, так и с режимом течения самого ЖК. Характер течения определен в оптическом спектре флуктуациями оптической анизотропии  $\delta(\Delta n)$ . С учетом относительной малости спектрального представления переменной части оптического сигнала (рис. 6) по отношению к постоянной компоненте (рис. а), допустимо пренебрежение нелинейностью ЖК-системы. Такая возможность задана малостью наблюдаемых спектральных плотностей, максимальная относительная величина которых соответствует  $R \approx 10^{-4}$ . Оценки флуктуации фазы  $\delta$  дают порядок  $10^{-2}$  рад, максимальные же характерные флуктуации директора порядка  $10^{-3}$  рад позволяют считать связь между оптическим сигналом и флуктуациями директора линейной. Вывод о воздействии осциллирующего сдвига относительной амплитуды  $A/h \approx 3,5$  ( $A \approx 125$  мкм и  $\omega > 100$  Гц) в НЖК с начальной гомеотропной ориентацией молекул состоит в констатации возбуждения спектра низкочастотных флуктуаций (мод), отражающего характер ориентационного движения директора и конвективного течения НЖК. Так, наличие в оптическом спектре двух локальных максимумов свидетельствует о присутствии периодических движений, связанных, например, с периодической конвекцией в слое ЖК [8, 9]. Характерные частоты этого процесса составляют  $\omega_1 \approx 2$  Гц и  $\omega_2 \approx 4$  Гц. Хотя наличие второй частоты, скорее всего, обусловлено нелинейностью типа  $I \sim \Delta < \sin^2 \theta >$ , если  $\theta \sim \theta_0 \exp(j\omega t)$ . Эффект отражает периодичность в поведении директора во времени при конвекции. Дальнейшее увеличение амплитуды сдвига приводит к разрушению однородной ориентации поля директора, образованию разрывов в ориентации. Система приобретает мелкодисперсную структуру, то есть разбивается на быстро-

движущиеся и осциллирующие кластеры значительно меньших линейных размеров толщины ЖК-слоя. Характер перехода к полному разупорядочению связан с хаотизацией слоя исследуемого образца. Известные сценарии развития турбулентности [18] определяют сопровождение процесса перехода непрерывным уширением спектра (рис. в) [8, 9].

#### Заключение

Проведенный с использованием электродинамических подходов теоретический анализ известных критериев устойчивости уравнений движения вязкой жидкости дает возможность корректной постановки совместной краевой задачи гидродинамики и теории упругости для конденсированной среды при сдвиговом воздействии.

В рамках рассмотренных теоретических представлений результаты проведенных экспериментов выглядят однозначно. Полученные зависимости стохастических гидродинамических режимов, реализуемых в жидкокристаллических системах под действием периодического низкочастотного сдвига, могут быть интерпретированы переходными решениями совместных краевых задач теории векторного силового поля, свойства которого определены электрическим вектором плотности структуры объемного заряда, распределенного в единице объема конденсированной среды.

#### Список литературы

1. Рид Р. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие [Текст] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. Пер. с англ. под ред. Б.И. Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
2. Ландау Л.Д. Механика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 2002. – 512 с.
3. Рабинович М.И. Введение в теорию колебаний и волн [Текст] / М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков. – М.: Наука, 1992. – 456 с.
4. Яворский Б.М. Справочник по физике [Текст] / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
5. Ландау Л.Д. Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 2003. – 632 с.
6. Ландау Л.Д. Статистическая физика. Ч. 1 [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 2008. – 584 с.
7. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 2005. – 632 с.
8. Денисова О.А. Турбулентный режим течения жидких кристаллов при действии гармонического сдвига [Текст] / О.А. Денисова // Научное обозрение. – 2013. – № 1. – С. 34–36.

9. 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.

10. Доломатов М.Ю. Взаимосвязь энергии активации вязкого течения ньютоновских углеводородных сред и интегральных характеристик их электронных спектров поглощения в видимой и УФ-области [Текст] / М.Ю. Доломатов, В.В. Леонов // Известия вузов. Поволжский регион. Серия Физико-математическая. – 2010. – № 4. – С. 141–149.

11. Леонов В.В. Электродинамика диффузии в конденсированных физико-химических системах [Текст] / В.В. Леонов // Инженерно-физический журнал. – Т. 87. – 2014. – № 2. – С. 265–271.

12. Ландау Л.Д. Теория поля [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 2004. – 512 с.

13. Тамм И.Е. Основы теории электричества [Текст] / И.Е. Тамм. – М.: Наука, 1966. – 624 с.

14. Рабинович М.И. Регулярная и хаотическая динамика структур в течениях жидкости [Текст] / М.И. Рабинович, М.М. Сущик // Успехи физических наук. – 1984. – Т. 160. – Вып. 1. – С. 3–60.

15. Монин А.С. Гидродинамическая неустойчивость [Текст] / А.С. Монин // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 150. – Вып. 1. – С. 62–103.

16. Ландау Л.Д. К проблеме турбулентности [Текст] / Л.Д. Ландау // ДАН СССР. – 1944. – Т. 44. – С. 339–345.

17. Кац Е.И. О термомоноконвекционной неустойчивости в нематическом ЖК [Текст] / Е.И. Кац // Физика твердого тела. – 1981. – Т. 23. – Вып. 7. – С. 2100–2104.

18. Manneville P. The transition to turbulence in NLC [Text] / P. Manneville // Molecule Crystals, Liquid Crystals. – 1981. – V. 70. – № 1–4. – P. 1501–1528.

#### References

1. Rid R. Svoystva gazov i zhidkostej: Spravochnoe posobie [Tekst] / R. Rid, Dzh. Prausnic, T. Shervud. Per. s angl. pod red. B.I. Sokolova. – 3-e izd., pererab. i dop. – L.: Himija, 1982. – 592 s.

2. Landau L.D. Mehanika [Tekst] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Nauka, 2002. – 512 s.

3. Rabinovich M.I. Vvedenie v teoriju kolebanij i voln [Tekst] / M.I. Rabinovich, D.I. Trubeckov. – M.: Nauka, 1992. – 456 s.

4. Javorskij B.M. Spravochnik po fizike [Tekst] / B.M. Javorskij, A.A. Detlaf. – M.: Nauka, 1980. – 512 s.

5. Landau L.D. Gidrodinamika [Tekst] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Nauka, 2003. – 632 s.

6. Landau L.D. Statisticheskaja fizika. Ch. 1 [Tekst] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Nauka, 2008. – 584 s.

7. Landau L.D. Jelektrodinamika sploshnyh sred [Tekst] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Nauka, 2005. – 632 s.

8. Denisova O.A. Turbulentnyj rezhim techenija zhidkih kristallov pri dejstvii garmonicheskogo sdviga [Tekst] / O.A. Denisova // Nauchnoe obozrenie. – 2013. – № 1. – S. 34–36.

9. Denisova O.A. Neravnesnye strukturnye prevrashhenija zhidkih kristallov v jelektricheskikh poljah i akusticheskikh potokah: Nauchnoe izdanie / O.A. Denisova. – Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2012. – 188 s.

10. Dolomatov M.Ju. Vzaimosvjaz' jenerгии aktivacii vjazkogo techenija n'jutonovskih uglevodородnyh sred i integral'nyh harakteristik ih jelektronnyh spektrov pogloshhenija v vidimoi i UF-oblasti [Tekst] / M.Ju. Dolomatov, V.V. Leonov // Izvestija vuzov. Povolzhskij region. Serija Fiziko-matematicheskaja. – 2010. – № 4. – S. 141–149.

11. Leonov V.V. Jelektrodinamika diffuzii v kondensirovannyh fiziko-himicheskikh sistemah [Tekst] / V.V. Leonov // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – Т. 87. – 2014. – № 2. – S. 265–271.

12. Landau L.D. Teorija polja [Tekst] / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Nauka, 2004. – 512 s.

13. Tamm I.E. Osnovy teorii jelektrichestva [Tekst] / I.E. Tamm. – M.: Nauka, 1966. – 624 s.

14. Rabinovich M.I. Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika struktur v techenijah zhidkosti [Tekst] / M.I. Rabinovich, M.M. Sushhik // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1984. – Т. 160. – Vyp. 1. – S. 3–60.

15. Monin A.S. Gidrodinamicheskaja neustojchivost' [Tekst] / A.S. Monin // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1986. – Т. 150. – Vyp. 1. – S. 62–103.

16. Landau L.D. K probleme turbulentnosti [Tekst] / L.D. Landau // DAN SSSR. – 1944. – Т. 44. – S. 339–345.

17. Kac E.I. O termokonvekcionnoj neustojchivosti v nematicheskom ZhK [Tekst] / E.I. Kac // Fizika tverdogo tela. – 1981. – Т. 23. – Vyp. 7. – S. 2100–2104.

18. Manneville P. The transition to turbulence in NLC [Text] / P. Manneville // Molecule Crystals, Liquid Crystals. – 1981. – V. 70. – № 1–4. – S. 1501–1528.



**Доломатов М.Ю.**  
**Dolomatorov M.Yu.**

*кандидат технических наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Физика», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», Россия, г. Уфа*



**Ковалева Э.А.**  
**Kovaleva E.A.**

*кандидат химических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, г. Уфа*

УДК 535.333, 539.19

## **НОВЫЙ МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ДЕСКРИПТОР ДЛЯ ПРОГНОЗА ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ**

Основная идея работы состоит в предположении, что спектр собственных значений энергий квантовой системы из  $m$  молекул описывается специальным функционалом (суперфункционалом). Этот суперфункционал зависит от функционалов энергии и функционалов топологических характеристик молекул. Функционал энергии характеризует весь энергетический спектр молекулы, наблюдаемый в эксперименте (интегральная сила осциллятора). Другой функционал характеризует топологическое пространство молекул. Считая суперфункционал непрерывным и зависящим от двух переменных, раскладываем его в ряд Тейлора, коэффициенты которого характеризуют возмущения суперфункционала под влиянием структурных топологических факторов и факторов электронного взаимодействия. На этой основе предложен новый двухпараметрический молекулярный дескриптор в модели QSPR (Quantitative Structure-Property Relationships), устанавливающий связь энергий ионизации и сродства к электрону молекулярных органических полупроводников от топологических индексов Балабана, Рандича и интегральных сил осциллятора. Интегральные силы осцилляторов получены по данным электронной спектроскопии в УФ- и видимой областях спектра в диапазоне 200–900 нм. Потенциалы ионизации и сродство к электрону рассчитаны ограниченным методом Хартри – Фока (HF) с базисным набором 6-31G (d, p). Полученные закономерности подтверждаются статистической обработкой данных методами множественного регрессионного анализа в рядах производных 1,4-нафтохинона, 1-оксиантрахинона и 1-(4-трет-бутилфеноксид)-9,10-антрахинона. Можно предположить, что, являясь математическим выражением особенностей топологического пространства молекулы, ТИ несут в себе информацию о типе и характере взаимодействия атомов в рассматриваемых соединениях.

*Ключевые слова:* суперфункционал от энергии и молекулярный дескриптор, производные хинонов, потенциалы ионизации, сродство к электрону, интегральная сила осциллятора, топологические индексы, QSPR.

## **NEW MOLECULAR DESCRIPTORS FOR PREDICTION OF THE ENERGIES STATES MOLECULAR SYSTEMS**

The basic idea is to assume that the spectrum of the energy eigenvalues of the quantum system of  $m$  molecules describes a special functional (super-functional). This super-functional depends on the functional of energy and the functional of topology characteristics for molecules. The functional energy characterizes whole energy spectrum a molecule observed in experiment (integral strengths an oscillator). Other функционал characterizes the topological space of molecules. We considering the super functional, as continuous system, decompose it into a Taylor series

whose coefficients characterize the perturbations of under the influence of structural factors and factors of topological electron interaction. On this foundation supposed we a new two-parameter model of molecular descriptor in QSPR (Quantitative Structure-Property Relationships), which establishes the connection of the ionization energies and electron affinities of molecular organic semiconductors on the topological Balaban index, Randic index and integrated strengths of the oscillator. Integrated oscillator strengths obtained by electron spectroscopy in UV-visible spectra (200–900 nm). Ionization potentials and electron affinities calculated restrict by the Hartree-Fock methods (HF) with the basis set 6-31G (d, p). The resulting patterns are confirmed by statistical data processing methods of multiple regression analysis among 1,4-naphthoquinone, 1-oxyanthraquinone, 1-(4-tert-butylphenoxy)-9,10-anthraquinone derivative. It can be assumed that as a mathematical expression of the features of a topological space of the molecule, Topological indices carry information about the type and nature of the interaction of atoms in the compound.

*Key words:* super-functional depends on of energy and of topology, molecular descriptor, derivatives quinines, ionization potentials, electron affinity, integrated strength of the oscillator, topological index, QSPR.

### Введение

Известно, что топологические индексы (ТИ) молекулярных графов (МГ) органических соединений в моделях QSPR (Quantitative Structure-Property Relationships – количественные соотношения «структура – свойство») хорошо коррелируют с физико-химическими свойствами молекул (с молекулярным объемом, молекулярной рефракцией, площадью поверхности молекулы, потенциалами ионизации, сродством к электрону, поляризуемостью, химическими сдвигами в спектрах ЯМР, спиновыми плотностями и др.) [1]. Структурные дескрипторы превратились в инструменты для прогнозирования биологической активности молекул, оценки реакционной способности молекул и т. д. Они используются в инженерных расчетах, при проектировании химических реакторов и направленном синтезе химических соединений, в том числе лекарств.

В данной работе предлагается обобщенная модель, аналогичная известным моделям QSPR [2], связывающая топологические характеристики с потенциалами ионизации (ПИ) и сродством к электрону (СЭ). Отличительной особенностью предлагаемой нами работы является замена спектра МГ реальным спектром, который характеризуется интегральной силой осциллятора (ИСО) в видимой и УФ-областях, отвечающих энергиями  $\pi-\pi^*$ ,  $\pi-\sigma$  и  $\pi-p$  переходов. Следует отметить, что существующие молекулярные дескрипторы используют хюккелевские МГ, которые не учитывают все взаимодействия в молекулах и ограничиваются только  $\pi$ -электронами.

Оценка энергий высшей занятой и низшей свободной молекулярных орбиталей в молекулярных полупроводниках имеет важнейшее значение для разработки молекулярных транзисторов, молекулярной памяти с временем отклика  $10^{-8}$ – $10^{-10}$  с. Информация об этих характеристиках необходима для оценки ширины зоны проводимости:

$$\Delta E = E_{\text{ВЗМО}} - E_{\text{НСМО}} \approx \text{PI} - \text{СЭ}. \quad (1)$$

Очевидно, что время отклика находится из принципа неопределенности:

$$\tau \approx \frac{h}{\Delta E} \approx \frac{h}{(I-E)}, \quad (2)$$

где  $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка;  $I$  – потенциал ионизации, эВ;  $E$  – сродство к электрону, эВ.

Как было показано ранее, СЭ и ПИ являются функциями ИСО [4–7]. Зависимости потенциалов ионизации от интегральных сил осциллятора для узкого класса соединений определялись по формуле

$$\text{ПИ} = \alpha + \beta\theta, \quad (3)$$

где  $\alpha$ , эВ и  $\beta$ , эВ/нм – константы; ПИ – потенциал ионизации (квантово-химический дескриптор), эВ;  $\theta$  – логарифмическая интегральная сила осциллятора, нм;

$$\theta = \int_{\lambda_0}^{\lambda_k} \lg(\varepsilon_\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где  $\lambda_0$ ,  $\lambda_k$  – границы спектра, нм;  $\lg(\varepsilon_\lambda)$  – логарифм молярного показателя поглощения при определенных длинах волн.

Кроме того, известны зависимости, связывающие спектр МГ и его топологические характеристики с СЭ и ПИ [1, 3].

В качестве молекулярного дескриптора, описывающего все виды взаимодействия электронов в молекулярной системе, мы предлагаем эмпирический индекс, характеризующий суммарную энергию электронных переходов, так называемую интегральную силу осциллятора (ИСО). Логарифмическая ИСО ( $\theta$ ) характеризует всю совокупность физических и химических свойств системы. Физический смысл зависимостей (4) объясняется эффектом корреляции электронов и заключается в том, что на состояние каждого из электронов квантовой системы влияют все остальные электроны, в том числе глубинные электроны нижележащих уровней [8].

*Цель работы:* изучение связи характеристик электронных состояний молекул (потенциалов ионизации и сродства к электрону) от энергетических характеристик спектра и топологических характеристик

структуры, выраженных логарифмической силой осцилляторов и топологическими индексами.

Основная идея работы состоит в предположении, что спектр собственных значений энергий квантовой системы из  $m$  молекул описывается специальным функционалом (суперфункционалом). Этот суперфункционал зависит от функционалов энергии и функционалов топологических характеристик молекул. Функционал энергии характеризует весь энергетический спектр молекулы, наблюдаемый в эксперименте (интегральная сила осциллятора). Другой функционал характеризует топологическое пространство молекул. Кроме того, важно отметить, что с квантово-механических позиций спектр собственных значений энергий квантовой системы из  $m$  молекул  $E$ , описываемый этим суперфункционалом, связан с множеством гамильтонианов, каждый из которых определяет свойства молекул и выражается через подмножества функционалов  $\theta$  и топологических характеристик молекул  $\Gamma$ :

$$E = F(\theta, \Gamma), \tag{5}$$

где  $\Gamma$  – топологический функционал, а функционал  $\theta(\epsilon, \lambda)$  представляет собой так называемую интегральную силу осциллятора, которая является суммой всех сил осцилляторов и зависит от оптической плотности  $\epsilon$  и длины волны  $\lambda$ , нм.

В данном случае предполагается, что функционал  $\theta(\epsilon, \lambda)$  и является суммой большого числа непе-

риодических, бесконечно близких по энергии спектральных функций электронных переходов и колебательных состояний ангармонических квантовых осцилляторов. Поэтому в частном случае  $\theta(\epsilon, \lambda)$  может быть представлен множеством более гладких логарифмических функций, для которых не рассматриваются особые точки, так как они не попадают в область определения. Из этого предположения следует, что любое электронное и колебательное состояние молекулы должно задаваться суперфункционалом от структуры и квантовой характеристики, характеризующей энергию взаимодействия электронов в молекуле. Из формального определения спектра следует, что спектр является некоторой функцией одних лишь статистик второго порядка, относительно которых, в свою очередь, предполагается, что они остаются неизменными, или стационарными, во времени.

Предположим, что в рядах молекул, близких по химической природе, содержащих атомы одного вида, потенциалы межчастичного взаимодействия близки между собой. Тогда отклонение функционала от некоторого исходного значения  $\Delta F$  будет характеризовать электронное состояние молекулы с данной структурой.

Считая суперфункционал  $E$  зависящим от непрерывных функционалов двух переменных, разложим его в ряд Тейлора по степеням  $(\theta - \theta_0)$  и  $(\Gamma - \Gamma_0)$  некоторого остаточного члена:

$$E = F(\theta, \Gamma) = f(\theta_0, \Gamma_0) + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial(\theta_0, \Gamma_0)}{\partial \theta} + \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2(\theta_0, \Gamma_0)}{\partial \theta^2} + \frac{(\theta - \theta_0)^3}{3!} \cdot \frac{\partial^3(\xi_1, \Gamma_0)}{\partial \theta^3} +$$

$$+ \frac{\Gamma - \Gamma_0}{1!} \left[ \frac{\partial(\theta_0, \Gamma_0)}{\partial \Gamma} + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial^2(\theta_0, \Gamma_0)}{\partial(\Gamma \theta)} + \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^3(\xi_2, \Gamma_0)}{\partial(\Gamma \theta^2)} \right] +$$

$$+ \frac{(\Gamma - \Gamma_0)^2}{2!} \left[ \frac{\partial^2(\theta_0, \Gamma_0)}{\partial(\Gamma)^2} + \frac{\theta - \theta_0}{1!} \cdot \frac{\partial^3(\xi_3, \Gamma_0)}{\partial(\Gamma^2 \theta)} \right] + \frac{(\Gamma - \Gamma_0)^3}{3!} \cdot \frac{\partial^3(\theta, \eta_1)}{\partial(\Gamma)^3}, \tag{6}$$

где

$$\eta_1 = \Gamma_0 + \mu_1(\Gamma - \Gamma_0), \quad 0 < \mu_1 < 1 \quad \xi_1 = \theta + \mu_2(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_2 < 1$$

$$\xi_2 = \theta + \mu_3(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_3 < 1 \quad \xi_3 = \theta + \mu_4(\theta - \theta_0), \quad 0 < \mu_4 < 1.$$

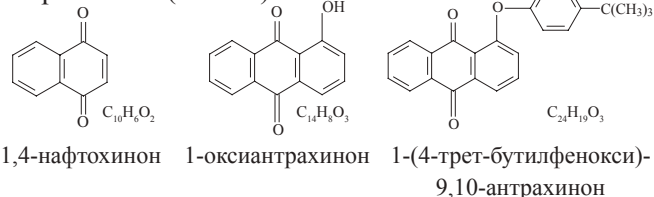
При  $n=2$  формула (6) примет вид

$$F(\theta, \Gamma) = A_0 + D(\theta - \theta_0) + E(\Gamma - \Gamma_0) + \left[ A(\theta - \theta_0)^2 + 2B(\theta - \theta_0)(\Gamma - \Gamma_0) + C(\Gamma - \Gamma_0)^2 \right] + R_2 \tag{7}$$

где коэффициенты  $A_0, D, E, A, B, C$  не зависят от  $\theta$  и  $\Gamma$ , а  $R_2$  – остаточный член, структура которого аналогична структуре остаточного члена в формуле Тейлора для функции одной переменной. Физический смысл коэффициентов заключается в характеристике возмущения суперфункционала под влиянием структурных топологических факторов и факторов электронного и колебательного взаимодействия. Разложение (7) представляет собой квадратичную функцию двух переменных.

*Объекты и методы исследования*

В качестве объектов исследования в данной работе выбраны производные 1,4-нафтохинона, 1-оксиантрахинона и 1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинона (табл. 1).



Квантовые и структурные параметры производных 1,4-нафтохинона, 1-оксиантрахинона и 1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинона

№	Название	Брутто-формула	ЛФ ИСО, нм	6-31G**		Топологические индексы		ПИ, рассчитанные по формуле (7) с ПИ	
				ПИ, эВ	СЭ, эВ	Балабана	Рандича	Балабана	Рандича
1	2-анилино-1-оксиантрахинон	C <sub>20</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>3</sub>	786	9,11	1,13	1,36	11,66	9,26	9,07
2	2-(4-трет-бутилфенил)амино-1-оксиантрахинон	C <sub>24</sub> H <sub>21</sub> NO <sub>3</sub>	811	9,07	1,12	1,34	13,27	9,23	9,04
3	2-(N-метил-N-фениламино)-1-оксиантрахинон	C <sub>21</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub>	771	9,29	1,13	1,35	12,09	9,27	9,08
4	2-N-метил-N-(3-метилфенил)амино-1-оксиантрахинон	C <sub>22</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>3</sub>	771	9,24	1,13	1,29	12,49	9,27	9,08
5	2-N-метил-N-(4-трет-бутилфенил)амино-1-оксиантрахинон	C <sub>25</sub> H <sub>23</sub> NO <sub>4</sub>	762	9,41	1,18	1,34	13,7	9,28	9,08
6	2-N-этил-N-(4-трет-бутилфенил)амино-1-оксиантрахинон	C <sub>26</sub> H <sub>25</sub> NO <sub>3</sub>	820	9,00	1,05	1,33	14,24	9,23	9,02
7	2-N-бензил-N-(4-трет-бутилфенил)амино-1-оксиантрахинон	C <sub>31</sub> H <sub>27</sub> NO <sub>3</sub>	806	8,96	1,03	1,24	16,75	9,24	9,02
8	2-дифениламино-1-оксиантрахинон	C <sub>26</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>3</sub>	825	8,94	2,41	1,23	14,66	9,22	9,01
9	2-N-фенил-N-(4-трет-бутилфенил)амино-1-оксиантрахинон	C <sub>30</sub> H <sub>25</sub> NO <sub>3</sub>	830	8,88	2,36	1,29	16,27	9,22	9,00
10	2-этиламино-1,4-нафтохинон	C <sub>12</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	1188,50	8,63	0,87	1,71	8,77	8,84	8,73
11	2-морфолино-1,4-нафтохинон	C <sub>14</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>3</sub>	1287,35	8,90	0,47	1,91	7,24	8,91	8,81
12	2-пиперидино-1,4-нафтохинон	C <sub>15</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>2</sub>	1252,47	8,62	0,84	1,71	8,77	8,86	8,75
13	2-(2-циклогексен-1-ил)-1,4-нафтохинон	C <sub>16</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	653,56	9,39	0,66	1,71	8,77	9,37	9,25
14	2-аллил-1,4-нафтохинон	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	618,91	9,40	0,50	1,91	7,24	9,40	9,31
15	2-бензил-1,4-нафтохинон	C <sub>17</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	668,45	9,02	0,58	1,54	9,25	9,35	9,23
16	2-дифенилметил-1,4-нафтохинон	C <sub>23</sub> H <sub>16</sub> NO <sub>2</sub>	683,33	8,89	0,66	1,39	12,25	9,15	9,17
17	2-метиламино-3-амино-1,4-нафтохинон	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1765,74	8,50	0,83	2,03	7,16	8,42	8,52
18	2-ацетиламино-3-метиламино-1,4-нафтохинон	C <sub>13</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1272,7	8,89	0,52	2,06	8,56	8,84	8,74
19	2-ацетиламино-3-диметиламино-1,4-нафтохинон	C <sub>14</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1575,97	8,83	0,57	2,01	8,93	8,58	8,58
20	2-диметиламино-3-амино-1,4-нафтохинон	C <sub>12</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1406,89	8,53	0,84	1,94	7,54	8,73	8,67

№	Название	Брутто-формула	ЛФ ИСО, нм	6-3IG**		Топологические индексы		ПИ, рассчитанные по формуле (7) с ПИ	
				СИ, эВ	СЭ, эВ	Балабана	Рандича	Балабана	Рандича
21	2-морфолино-3-амино-1,4-нафтохинон	$C_{14}H_{14}N_2O_3$	1333,39	8,66	0,47	1,7	9,2	8,79	8,69
22	2-пиперидино-3-амино-1,4-нафтохинон	$C_{14}H_{14}N_2O_2$	1491,32	8,54	0,80	1,7	9,2	8,65	8,61
23	3-пропиониламино-2-пиперидино-1,4-нафтохинон	$C_{18}H_{20}N_2O_3$	1540,40	8,48	0,58	1,76	11,13	8,61	8,58
24	1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{24}H_{20}O_3$	375	9,45	1,08	1,41	12,86	9,60	9,49
25	2-нитро-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{24}H_{19}NO_5$	669	9,16	0,96	1,38	14,18	9,35	9,16
26	1-(4-трет-бутилфенокси)-2-окси-9,10-антрахинон	$C_{24}H_{20}O_4$	540	9,32	1,23	1,41	13,27	9,46	9,30
27	3-бром-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{24}H_{19}BrO_3$	425	9,38	1,11	1,4	13,25	9,56	9,42
28	2-ацетиламино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{26}H_{23}NO_4$	444	9,36	1,11	1,34	14,66	9,55	9,38
29	2-трифторацетиламино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{26}H_{20}F_3NO$	469	9,39	1,17	1,46	15,88	9,52	9,34
30	2-изобутириламино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{28}H_{27}NO_4$	435	9,35	1,21	1,49	15,57	9,55	9,38
31	2-бензоиламино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{31}H_{25}NO_4$	463	9,3	1,14	1,2	17,24	9,53	9,34
32	2-(4-нитробензоил)амино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{31}H_{24}N_2O_6$	479	9,36	1,21	1,28	18,54	9,52	9,32
33	2-(1,3,4,5,6-пентафторбензил)-амино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{31}H_{20}F_5NO$	455	9,37	1,38	1,29	18,88	9,536969	9,34
34	2-метиламино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{25}H_{23}NO_3$	630	9,11	1,19	1,39	13,81	9,387950	9,20
35	4-(N-ацетил-N-метиламино)-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{27}H_{25}NO_4$	386	9,47	1,38	1,52	15,09	9,595240	9,44
36	2-дибензиламино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{38}H_{33}NO_3$	581	9,27	1,39	1,13	20,29	9,430094	9,21
37	3-пиперидино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{29}H_{29}NO_3$	654	9,12	0,96	1,3	15,83	9,367700	9,16
38	2-диэтиламино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{28}H_{29}NO_3$	690	9,04	1,78	1,55	15,26	9,336631	9,13
39	4-метиламино-1-(4-трет-бутилфенокси)-9,10-антрахинон	$C_{25}H_{23}NO_3$	675	9,18	0,94	1,38	13,81	9,349695	9,16

Значения ПИ (табл. 1) и сродство к электрону (СЭ) рассчитывались методом RHF 6-31G\*\* по теореме Купманса, согласно которой [9] энергии высших занятых и низших свободных молекулярных орбиталей соответственно по абсолютной величине совпадают с потенциалами ионизации молекулы. В качестве структурных топологических функционалов рассматривались ТИ Балабана и Рандича [3, 10, 11]. Выбор данных топологических индексов обусловлен простотой их расчета и хорошей описательной способностью.

Индекс Балабана [9] (1982 г.) основан на матрице расстояний и вычисляется по формуле

$$J(G) = \frac{2}{\mu + 1} \cdot \sum_{\text{adj}, i, j} (v_{D,i} v_{D,j})^{-1/2} \quad \mu = q - N + 1, \quad (8)$$

где  $\mu$  – число циклов в молекуле;  $N$  – число атомов в молекуле, за исключением водородных;  $q$  – число смежностей в молекуле;  $v_{D,i}$  и  $v_{D,j}$  – суммы расстояний по всем смежным вершинам.

Индекс Рандича [12] (индекс молекулярной связности) (1975 г.) вычисляется по формуле

$$\chi(G) = \sum_{\text{по всем ребрам}} \frac{1}{\sqrt{v_i \cdot v_j}} \quad (9)$$

где  $v_i$  – число ребер графа, отходящих от  $i$ -й вершины;  $v_j$  – число ребер графа, отходящих от  $j$ -й вершины.

Коэффициенты зависимости (7) были получены методом многофакторного регрессионного анализа в соответствии с моделями QSPR. Их точность оценивалась с помощью статистических характеристик – коэффициента корреляции, коэффициента множественной корреляции и стандартной ошибки.

#### Результаты и их обсуждение

В табл. 2, 3 представлены данные коэффициентов квадратичной функции (4) для ПИ и СЭ соответственно.

Таблица 2

Топологический индекс	Коэффициенты квадратичной функции двух переменных для расчета ПИ					
	A	C	2B	D	E	A <sub>0</sub>
Инд. Балабана	$3,55 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$4,67 \cdot 10^{-4}$	$7,46 \cdot 10^{-4}$	-1,82	10,99
Инд. Рандича	$3,38 \cdot 10^{-7}$	$8,52 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$	-0,04	10,38

Используя индексы Балабана (Рандича), получили коэффициент корреляции  $R \approx 0,92$  ( $R \approx 0,91$ ) соответственно. Для статистической достоверности посчитали корреляционную поправку  $S_r = \frac{1-R^2}{\sqrt{n-1}}$  для  $n > 30$ .

В нашем случае  $S_r = 0,03$  и  $\left| \frac{R}{S_r} \right| = \left| \frac{0,84}{0,03} \right| = 28 \geq 3$ , следовательно, связь нельзя считать случайной. Регрессионное уравнение проходит через центр облака

исходных точек. Но как показывает  $t$ -статистика, если в уравнении использовать индекс Балабана, то коэффициент 2B незначим, а при использовании индекса Рандича незначимыми являются коэффициенты 2B, C и E. Для характеристики качества регрессионного уравнения был вычислен коэффициент множественной корреляции  $R \approx 0,97$ , указывающий на весьма сильную связь всего набора факторов с результатом.

Таблица 3

Топологический индекс	Коэффициенты квадратичной функции двух переменных для расчета СЭ					
	A	C	2B	D	E	A <sub>0</sub>
Инд. Балабана	$4,9 \cdot 10^{-7}$	1,83	$-1,17 \cdot 10^{-3}$	$-9,9 \cdot 10^{-4}$	-5,88	5,95
Инд. Рандича	$-4,8 \cdot 10^{-7}$	$-4,28 \cdot 10^{-3}$	$-1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	0,21	-1,36

Коэффициент корреляции  $R \approx 0,62$  (0,66) с учетом индекса Балабана (Рандича). Корреляционная поправка  $S_r = \frac{1-R^2}{\sqrt{n-1}}$  для  $n > 30$ . В нашем случае  $S_r \approx 0,1$  и  $\left| \frac{R}{S_r} \right| = \left| \frac{0,62}{0,1} \right| = 6,2 \geq 3$ , следовательно, связь нельзя считать случайной. Однако, как показывает  $t$ -статистика, в уравнении, учитывающем индекс Балабана, коэффициенты A, C и D незначимы, а при учете индекса Рандича значимым оказывается только коэффициент E. Можно предположить, что, являясь математическим выражением особенностей топологического про-

странства молекулы, ТИ и интегральные спектральные характеристики несут в себе информацию о электронных состояниях в рассматриваемом соединении.

#### Выводы

Предложен молекулярный двухпараметрический дескриптор, который можно использовать для предсказания ПИ и СЭ, минуя квантовые расчеты по спектроскопическим данным и топологическим характеристикам. Для сродства к электрону зависимость выполняется с меньшей точностью, что, по-видимому, связано с недостатками квантовых расчетов по методу



Хартри – Фока. Полученная закономерность подтверждается статистической обработкой данных в рядах производных 1,4-нафтохинона, 1-оксиантрахинона и 1-(4-трет-бутилфеноксид)-9,10-антрахинона.

#### Список литературы

1. Станкевич М.И. Топологические индексы в органической химии [Текст] / М.И. Станкевич, И.В. Станкевич, Н.С. Зефиоров // Успехи химии. – 1988. – Т. 57. – № 3. – С. 337–366.
2. Харитонов А.Г. Связь топологических характеристик с физико-химическими параметрами производных бензойной кислоты [Текст] / А.Г. Харитонов, А.В. Буланова, К.Х. Ро // Вестник СамГУ: Естественно-научная серия. – 2005. – № 2. – С. 207–221.
3. Химические приложения топологии и теории графов [Текст] / Под ред. Р. Кинга. – М.: Мир, 1987. – 560 с.
4. Долوماتов М.Ю. Применение электронной спектроскопии в физикохимии многокомпонентных стохастических смесей и сложных молекулярных систем [Текст] / М.Ю. Долوماتов. – Уфа: ЦНТИ, 1989. – С. 34–41.
5. Долوماتов М.Ю. Способ определения потенциала ионизации и сродства к электрону атомов и молекул методом электронной спектроскопии [Текст] / М.Ю. Долوماتов, Г.Р. Мукаева // Журн. прикладной спектроскопии. – 1992. – Т. 56. – № 4. – С. 570–574.
6. Dolomatov M.Yu. Electron Phenomenological Spectroscopy and Its Application in Investigating Complex Substances in Chemistry, Nanotechnology and Medicine [Text] / M.Yu. Dolomatov, G.R. Mukaeva, D.O. Shulyakovskaya // Journal of Materials Science and Engineering. – 2013. – V. 3. – № 3. – P. 183–199.
7. Ковалева Э.А. Оценка энергии ионизации органических полупроводников на основе производных антрахинона [Текст] / Э.А. Ковалева, М.Ю. Долوماتов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 1. – С. 101–106.
8. Dolomatov M.Yu. Specific quantum effects in atomic and molecular systems [Text] / M.Yu. Dolomatov, N.H. Paymurzina, K.F. Latypov, E.A. Kovaleva // Journal of Materials Science and Engineering A & B. – 2014. – V. 3. – № 11. – P. 770–774.
9. Степанов Н.Ф. Квантовая механика и квантовая химия [Текст] / Н.Ф. Степанов. – М.: Мир, 2001. – 519 с.
10. Федина Ю.А. Количественные модели в корреляциях «структура – свойство» органических соединений [Текст] / Ю.А. Федина, Ю.Г. Папулов, М.Г. Виноградова // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». – 2012. – Выпуск 14. – С. 160–172.
11. Набивач В.М. Сорбционно-структурные корреляции в ряду гетероциклических азотистых соединений [Текст] / В.М. Набивач // Журн. физической химии. – 1993. – Т. 67. – № 4. – С. 821–826.

12. Randic M. The connectivity index 25 years after [Text] / M. Randic // Journal of Molecular Graphics and Modelling. – 2001. – № 20. – P. 19–35.

#### References

1. Stankevich M.I. Topologicheskie indeksy v organicheskoy himii [Tekst] / M.I. Stankevich, I.V. Stankevich, N.S. Zefirov // Uspehi himii. – 1988. – T. 57. – № 3. – S. 337–366.
2. Haritonova A.G. Svjaz' topologicheskikh harakteristik s fiziko-himicheskimi parametrami proizvodnykh benzojnoj kisloty [Tekst] / A.G. Haritonova, A.V. Bulanova, K.H. Ro // Vestnik SamGU: Estestvenno-nauchnaja serija. – 2005. – № 2. – S. 207–221.
3. Himicheskie prilozhenija topologii i teorii grafov [Tekst] / Pod red. R. Kinga. – M.: Mir, 1987. – 560 s.
4. Dolomatov M.Ju. Primenenie jelektronnoj spektroskopii v fizikohimii mnogokomponentnykh stohasticheskikh smesej i slozhnyh molekulyarnykh sistem [Tekst] / M.Ju. Dolomatov. – Ufa: CNTI, 1989. – S. 34–41.
5. Dolomatov M.Ju. Sposob opredelenija potenciala ionizacii i srodstva k jelektronu atomov i molekul metodom jelektronnoj spektroskopii [Tekst] / M.Ju. Dolomatov, G.R. Mukaeva // Zhurn. prikladnoj spektroskopii. – 1992. – T. 56. – № 4. – S. 570–574.
6. Dolomatov M.Yu. Electron Phenomenological Spectroscopy and Its Application in Investigating Complex Substances in Chemistry, Nanotechnology and Medicine [Text] / M.Yu. Dolomatov, G.R. Mukaeva, D.O. Shulyakovskaya // Journal of Materials Science and Engineering. – 2013. – V. 3. – № 3. – P. 183–199.
7. Kovaleva Je.A. Ocenka jenergii ionizacii organicheskikh poluprovodnikov na osnove proizvodnykh antrahinona [Tekst] / Je.A. Kovaleva, M.Ju. Dolomatov // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. – 2013. – T. 9. – № 1. – S. 101–106.
8. Dolomatov M.Yu. Specific quantum effects in atomic and molecular systems [Text] / M.Yu. Dolomatov, N.H. Paymurzina, K.F. Latypov, E.A. Kovaleva // Journal of Materials Science and Engineering A & B. – 2014. – V. 3. – № 11. – P. 770–774.
9. Stepanov N.F. Kvantovaja mehanika i kvantovaja himija [Tekst] / N.F. Stepanov. – M.: Mir, 2001. – 519 s.
10. Fedina Ju.A. Kolichestvennyye modeli v korrelyacijah «struktura – svojstvo» organicheskikh soedinenij [Tekst] / Ju.A. Fedina, Ju.G. Papulov, M.G. Vinogradova // Vestnik TvGU. Serija «Himija». – 2012. – Vypusk 14. – S. 160–172.
11. Nabivach V.M. Sorbcionno-strukturnye korrelycii v rjadу heterociklicheskih azotistykh soedinenij [Tekst] / V.M. Nabivach // Zhurn. fizicheskoy himii. – 1993. – T. 67. – № 4. – S. 821–826.
12. Randic M. The connectivity index 25 years after [Text] / M. Randic // Journal of Molecular Graphics and Modelling. – 2001. – № 20. – P. 19–35.

## ОБ АВТОРАХ

*Ахмеджанов Фарит Маратович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационно-управляющие системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: farakhm@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Ахметов Ильнур Вазирович*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Информатика и ИКТ», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: ilnurakhmetov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Бакалов Валерий Григорьевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, e-mail: bakalow@mail.ru, Украина, г. Чернигов.

*Бакалов Олег Валерьевич*, старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, e-mail: oleglan@mail.ru, Украина, г. Чернигов.

*Белкин Александр Константинович*, ведущий инженер федерального государственного унитарного предприятия «Научное конструкторско-технологическое бюро «Вихрь», e-mail: roginskaya36@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Важдаев Константин Владимирович*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: vazhdaevk@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Гайнуллина Лэйсэн Айбулатовна*, магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: lisichka-93@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Губайдуллин Ирек Марсович*, д-р физ.-мат. наук, доцент, старш. научн. сотрудник лаборатории математической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтехимии и катализа» Российской академии наук, e-mail: irekmars@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Денисова Ольга Аркадьевна*, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Доломатов Михаил Юрьевич*, канд. техн. наук, доктор химических наук, профессор кафедры «Физика», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика электронных процессов и наноматериалов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: dolomatov@gmail.com, Россия, г. Уфа.

*Зикий Анатолий Николаевич*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, АО «ТНИИС», e-mail: zikiy50@mail.ru, Россия, г. Таганрог.

*Зламан Павел Николаевич*, ведущий инженер-конструктор, «Научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, Россия, г. Таганрог.

*Имильбаев Рамис Ринатович*, аспирант кафедры «Информационно-управляющие системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», инженер ООО «УфаСистемаГаз», e-mail: foraspi@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Канарейкин Владимир Иванович* канд. техн. наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: kanareikina1948@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Карабельская Ирина Владимировна*, аспирант кафедры «Физика», доцент кафедры «Информатика и ИКТ», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: iktugaes@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Ковалева Элла Александровна*, канд. хим. наук, доцент кафедры «Математика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: kovaleva-ugntu@yandex.ru, Россия, г. Уфа.

*Коледина Камила Феликсовна*, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории математической химии,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук», e-mail: koledinakamila@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Кошкин Игорь Владимирович*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электроэнергетика и физика» Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, e-mail: koshkin@mail.kz, Республика Казахстан, г. Костанай.

*Крымский Виктор Григорьевич*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Информационно-управляющие системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: vikrymsky@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Кучеров Борис Алексеевич*, аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы», Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», e-mail: boris.ku4erov@gmail.com, Россия, г. Королев.

*Кушнир Валентина Геннадьевна*, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Машины, тракторы и автомобили» Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, e-mail: valkush@mail.ru, Республика Казахстан, г. Костанай.

*Леонов Вадим Владимирович*, кандидат биологических наук, заведующий сектором электрохимических исследований лаборатории «Физико-химическая механика», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт механики» Уфимского научного центра Российской академии наук, e-mail: denisovaolga@bk.ru, Россия, г. Уфа.

*Морозов Иван Сергеевич*, аспирант кафедры «Информационные и управляющие системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна», e-mail: mmmmogoz@yandex.ru, Россия, г. Санкт-Петербург.

*Мухамдиев Айдар Асхатович*, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: Aidar80@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Мухортова Елена Ивановна*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические машины и электрооборудование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: roginskaya36@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Нелепин Владислав Сергеевич*, магистрант Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, e-mail: valkush@mail.ru, Республика Казахстан, г. Костанай.

*Пленкин Антон Павлович*, аспирант кафедры «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: pljonkin@mail.ru, Россия, г. Таганрог.

*Рогинская Любовь Эммануиловна*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: roginskaya36@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Саенко Алексей Геннадиевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: svshap@ufacom.ru, Россия, г. Уфа.

*Сафин Рашид Рафаилович*, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: safin\_rg@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Серенков Павел Степанович*, д-р техн. наук, зав. кафедрой «Стандартизация, метрология и информационные системы», Белорусский национальный технический университет, e-mail: Pavel\_Serenkov@mail.ru, Республика Беларусь, г. Минск.

*Скрипник С.П.*, канд. техн. наук, старший преподаватель Черниговского государственного технологического университета, e-mail: basalow@mail.ru, Украина, г. Чернигов.

*Фадеева Алена Сергеевна*, студентка, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: alenapoltavchenko@yandex.ru, Россия, г. Таганрог.

*Федосов Артем Васильевич*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана тру-

да», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: pbot@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Чердниченко Петр Иванович*, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Машины и аппараты легкой промышленности» Черниговского государственного технологического университета, e-mail: pitercher@ukr.net, Украина, г. Чернигов.

*Шапиро Семен Вольфович*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный университет экономики и сервиса», e-mail: svshar@ufacom.ru, Россия, г. Уфа.

*Шуляк Александр Анатольевич*, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора научно-производственного предприятия «Курай», e-mail: roginskaya36@mail.ru, Россия, г. Уфа.

*Юнусов Андрей Рифович*, канд. техн. наук, директор ООО «УфаСистемаГаз», e-mail: yunusov@molniya-ufa.ru, Россия, г. Уфа.

## ABOUT THE AUTHORS

*Akhmedzhanov Farit M.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Information and Control Systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: farakhm@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Akhmetov Ilnur V.*, cand. sci. phys.-math., associate professor, Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: ilnurakhmetov@gmail.com, Russia, Ufa.

*Bakalov Valery G.*, cand. sci. tech., associate professor, associate professor chair of «Machines and apparatuses of light industry», Chernihov State Technological University, e-mail: bakalow@mail.ru, Ukraine, Chernihov.

*Bakalov Oleg V.*, senior lecturer chair of «Machines and apparatuses of light industry», Chernihov State Technological University, e-mail: oleglan@mail.ru, Ukraine, Chernihov.

*Belkin Aleksandr K.*, lead engineer Federal federal state unitary enterprise Scientific design-technology bureau «Vikhr», e-mail: roginskaya36@mail.ru, Russia, Ufa.

*Vazhdaev Konstantin V.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Infocommunication technologies and nanoelectronics» Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir State University», e-mail: vazhdaevk@gmail.com Russia, Ufa.

*Gaynullina Leysen A.*, undergraduate chair of «Industrial safety and labor protection», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: lisichka-93@mail.ru, Russia, Ufa.

*Gubaydullin Irek M.*, dr. tech. phys.-math., associate professor, senior researcher laboratory «Mathematical chemistry», Federal state budgetary institution of science «Institute of Petrochemistry and Catalysis» Russian academy of sciences, e-mail: irekmars@mail.ru, Russia, Ufa.

*Denisova Olga A.*, dr. tech. phys.-math., associate professor, head chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Russia, Ufa.

*Dolomatov Michail Yu.*, cand. sci. tech., dr. sci. chem, professor chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», head of the laboratory «Electronics and Nanotechnology», e-mail: dolomatov@gmail.com, Russia, Ufa.

*Zikiy Anatoliy N.*, cand. sci. tech., senior researcher, JSC «TRIC», e-mail: zikiy50@mail.ru, Russia, Taganrog.

*Zlaman Pavel N.*, lead design engineer, «Scientific design bureau modeling and control systems», Federal State autonomous educational institution of higher education «Southern federal university», e-mail: otel24d@nkbmius.ru, Russia, Taganrog.

*Imilbaev Ramis R.*, post-graduate student chair of «Information and Control Systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», enginer LLC «UfaSistema-Gaz», e-mail: foraspi@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Kanareykin Vladimir I.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Infocommunication technologies and nanoelectronics» Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir State University», e-mail:

kanareikina1948@mail.ru, Russia, Ufa.

*Karabelskaya Irina V.*, post-graduate student, associate professor chair of «Informatics and ICT», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: iktugaes@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kovaleva Ella A.*, cand. sci. chem, associate professor chair of «Mathematics», Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Ufa state petroleum technological university», kovaleva-ugntu@yandex.ru, Russia, Ufa.

*Koledina Kamila F.*, cand. sci. phys.-math., researcher laboratory «Mathematical chemistry» Federal state budgetary institution of science «Institute of Petrochemistry and Catalysis» Russian academy of sciences, e-mail: koledinakamila@mail.ru, Russia, Ufa.

*Koshkin Igor V.*, cand. sci. tech., head chair of «Electric Power and Physics», Kostanay state university named after A. Baitursynov, e-mail: koshkin@mail.kz, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

*Krymsky Viktor G.*, dr. sci. tech., head chair of «Information and Control Systems», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: vikrymsky@mail.ru, Russia, Ufa.

*Kucherov Boris A.*, post-graduate student chair of «Information technology and control systems», State budgetary educational institution of higher education Moscow region «Technological academy», e-mail: boris.ku4erov@gmail.com, Russia, Korolev.

*Kushnir Valentina G.*, dr. sci. tech., professor, head chair of «Machinery, tractors and automobiles», Kostanay state university named after A. Baitursynov, e-mail: valkush@mail.ru, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

*Leonov Vadim V.*, cand. sci. biology, head sector of electrochemical researches of laboratory «Physical and Chemical Mechanics» laboratory, Federal state budgetary institution of science «Institute of Mechanics» Ufa scientific center Russian academy of sciences, e-mail: denisovaolga@bk.ru, Russia, Ufa.

*Morozov Ivan S.*, post-graduate student chair of «Information and operating systems chair», Federal state budgetary educational institution of higher education «St. Petersburg State University of technology and design», e-mail: mmmmoroz@yandex.ru, Russia, St. Petersburg.

*Mukhamadiev Aydar A.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Information and measuring technics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: Aidar80@mail.ru, Russia, Ufa.

*Muhortova Elena I.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Electrical machines and equipment», Federal state budgetary educational institution of higher education «Bashkir state agrarian university», e-mail: roginskaya36@mail.ru, Russia, Ufa.

*Nelepin Vladislav S.*, undergraduate Kostanay state university named after A. Baitursynov, e-mail: valkush@mail.ru, Republic of Kazakhstan, Kostanay.

*Pljonkin Anton P.*, post-graduate student «Information security of telecommunication systems», Federal State autonomous educational institution of higher education «Southern federal university», e-mail: pljonkin@mail.ru, Russia, Taganrog.

*Roginskaya Ljubov E.*, dr. sci. tech., professor chair of «Electromechanics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state aviation technical university», e-mail: roginskaya36@mail.ru, e-mail: elm.ugatu@gmail.com, Russia, Ufa.

*Saenko Alexey G.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: svshap@ufacom.ru, Russia, Ufa.

*Safin Rashit R.*, dr. sci. tech., associate professor, head chair of «Mathematics and mathematical modeling», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: safin\_rr@mail.ru, Russia, Ufa.

*Serenkov Pavel S.*, dr. sci. tech., head chair of «Standardization, metrology and information Systems», Belarusian National Technical University, e-mail: Pavel\_Serenkov@mail.ru, Republic of Belarus, Minsk.

*Skrypnic S.P.*, cand. sci. tech, senior lecturer Chernihov State Technological University, e-mail: bacalow@mail.ru, Ukraine, Chernihov.

*Fadeeva Alena S.*, post-graduate student Institute of computer technologies and information security Institute of

computer technologies and information security Institute of computer technologies and information security, Federal State autonomous educational institution of higher education «Southern federal university», e-mail: alenapoltavchenko@yandex.ru, Russia, Taganrog.

*Fedosov Artem V.*, cand. sci. tech., associate professor chair of «Industrial safety and labor protection», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state petroleum technological university», e-mail: pbot@mail.ru, Russia, Ufa.

*Cherednychenko Petr Ivanovich*, dr. sci. tech., professor, chair of «Machines and apparatuses of light industry», Chernihov State Technological University, e-mail: pitercher@ukr.net, Ukraine, Chernihov.

*Shapiro Semen V.*, dr. sci. tech., professor, chair of «Physics», Federal state budgetary educational institution of higher education «Ufa state university of economics and service», e-mail: svshap@ufacom.ru, Russia, Ufa.

*Shulyak A.A.*, cand. sci. tech., associate professor, deputy director of the scientific and production enterprise «Quray», e-mail: roginskaya36@mail.ru, Russia, Ufa.

*Yunusov Andrey R.*, cand. sci. tech., Director of LLC «UfaSistemaGaz», e-mail: yunusov@molniya-ufa.ru, Russia, Ufa.

## **Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:**

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля – 2,5 см с каждой стороны; шрифт – Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал – полуторный; ссылки на литературу – в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 или ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом:  
фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: **Фамилия И.О.doc**. (или docx). Отправлять по адресу: **uop-ugaes@mail.ru**.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельным файлом.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВПО «УГУЭС» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в **черно-белом** варианте в приложении к WORD. Например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

### **Памятка авторам**

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помните о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

**Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц.** Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.**

## **Requirements for the materials, provided for publication in the journal:**

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, are new, are interested in a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields – 2.5 cm on each side; font – Times New Roman, font size – 14, line spacing – one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST 7.1-2003 or GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC – in the upper right corner.
6. At the end of the article, specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send a color photo of the authors in a separate file (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSEI HE «USUES» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and tabular material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas are made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings – at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

### **Memo to authors**

The article is highly recommended:

- DO NOT use the tab key (Tab);
- DO NOT place your paragraph styles (other than the defaults);
- DO NOT set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- DO NOT put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («») or (“”).

Remember that it is necessary to distinguish between hyphens and dashes. Dash exhibited a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers. References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

**Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.**



