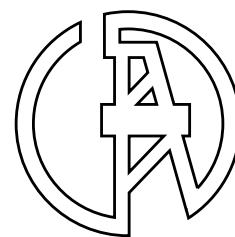


# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 2, т. 13, 2017

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

## Учредитель

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

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

Международный стандартный сериальный номер ISSN 1999-5458.

## Редакционная коллегия:

### Главный редактор:

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

### Зам. главного редактора:

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

### Члены редакционной коллегии:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



**Ответственный секретарь:** А.А. Мухамадиев  
**Технический редактор:** С.В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

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

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2017.

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

Тел.: (347) 243-16-19, [ies.rusoil.net](mailto:ies.rusoil.net)

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 25.05.2017 г. Формат 60x84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,95.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 131.

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

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

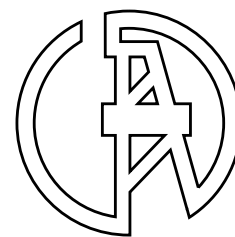
Материалы приводятся в авторской редакции.

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

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

# ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 2, v. 13, 2017

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

## Founder

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

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

International standard serial number ISSN 1999-5458.

## Editorial board:

### Editor-in-chief:

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

### Members of an editorial board:

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



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



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



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



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



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



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



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



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



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



### Deputy editor-in-chief:

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

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



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



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



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



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



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



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



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



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



**Assistant editor:** A.A. Mukhamadiev

**Technical editor:** S.V. Khalitova

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

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

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

© Ufa State Petroleum Technological University, 2017.

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

Tel. (347) 243–16–19, [ies.rusoil.net](mailto:ies.rusoil.net)

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 25.05.2017. Paper format 60x84/8. Offset printing. 13,95 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 131.

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

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Калий В.А.* Электромагнитный расчет магнитоэлектрического двигателя с удельной мощностью не менее 5 кВт/кг 5
- Никулин О.В., Шабанов В.А.* Устойчивость электропривода буровых насосов при нарушениях в системе возбуждения двигателей постоянного тока 11
- Тулупов В.Д., Ле Суан Хонг* Выбор рациональной системы тягового электропривода для вагонов метрополитена Социалистической Республики Вьетнам 19
- Шакирзянов А.А., Никитин О.Ф., Бакиев Т.А.* Перспектива применения пружинного регулятора подачи постоянной мощности в составе гидропривода в целях повышения его энергоэффективности 25

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Гвоздев В.Е., Абдрафиков М.А., Блинова Д.В., Кириллов К.В.* Анализ влияния дефектов различных типов на оценку показателей качества программно-аппаратных комплексов на стадии сопровождения 33
- Зелев А.П., Муфтеев В.Г., Талыпов М.А.* Концепция информационной системы преподавания графических дисциплин 41
- Талыбов Н.Г., Мустафаев В.А., Гусейнов А.Г., Салманова М.Н.* Моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением нечетких временных сетей Петри 48
- Лихачев Е.А., Зайцева А.А.* Методика проверки и регулировки характеристики входного направляющего аппарата двигателя типа ТВЗ-117 с применением компьютерных технологий 55
- Балтин Р.Р., Краснов А.Н., Майский Р.А.* Система мониторинга утечек газа через продувочные трубопроводы 62

## МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Мукаев Р.Ю., Федотова Ю.А.* Расчет скорости ультразвуковых волн в волноводе магнитострикционного датчика перемещений 68
- Зикий А.Н., Андрианов А.В., Зламан П.Н.* Исследование динамического диапазона смесителя по комбинационным составляющим 74
- Мухамадиев А.А., Тарасенко Л.С.* Методика проектирования узла фотоприемника акустооптического пирометра 79
- Абдрахманов В.Х., Важаев К.В., Салихов Р.Б.* Исследование возможности применения информационно-измерительных технологий и интернета вещей в агропромышленном комплексе 85
- Матанцев А.Б., Ясовеев В.Х., Уразбахтина Ю.О.* Применение искусственных нейросетей для снижения погрешности многосенсорных систем газоанализа 96

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Доланчи С.М., Денисова О.А.* Глобулы и их внутреннее строение 106
- Доломатов М.Ю., Паймурзина Н.Х., Ковалева Э.А.* Оценка энергии ионизации и сродства к электрону полициклических ароматических полупроводников по интегральным характеристикам распределения спектральной плотности электронных спектров 112
- Об авторах** 118

# CONTENT

## ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

- Kaliy V.A.* Electromagnetic calculation of the magnetic-electric engine with specific capacity at least 5 kW/kg 5
- Nikulin O.V., Shabanov V.A.* Stability of DC motors of drilling mechanisms in case of disturbances in excitation system 11
- Tulupov V.D., Le Xuan Hong.* Selection of the rational electric traction system for the metro of the Socialist Republic of Vietnam 19
- Shakirzyanov A.A., Nikitin O.F., Bakiev T.A.* The prospect of applying a spring-loaded constant power flow regulator as part of a hydraulic drive in order to increase energy efficiency 25

## DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

- Gvozdev V.E., Abdrafikov M.A., Blinova D.V., Kirillov K.V.* Analysis of different defect types influence on quality indicators assessment of hardware and software complexes at the maintenance stage 33
- Zelev A.P., Muftejev V.G., Talypov M.A.* Concept of the information system for teaching graphic disciplines 41
- Talibov N.G., Mustafaev V.A., Husseyinov A.H., Salmanova M.N.* Modeling of dynamic interacting processes using fuzzy timed Petri nets 48
- Likhachev E.A., Zajceva A.A.* The method of checking and adjusting the characteristics of the input guide apparatus type of engine TV3-117 with the use of computer technology 55
- Baltin R.R., Krasnov A.N., Maiski R.A.* Gas leak monitoring system through purgeable pipelines 62

## METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

- Mukaev R. Yu., Fedotova Yu.A.* Estimation of ultrasound waves velocity in a waveguide of a magnetostrictive displacement sensor 68
- Zikiy A.N., Andrianov A.V., Zlaman P.N.* The study of the dynamic range of the mixer on combinational components 74
- Mukhamadiev A.A., Tarasenko L.S.* Technique for designing a photodetector assembly of an acoustooptic pyrometer 79
- Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V., Salikhov R.B.* Study of the possibility of application of information-measuring technologies and the internet of things in the agro-industrial complex 85
- Matantsev A.B., Yasoveev V.Kh., Urazbakhtina Yu.O.* Usage of artificial neural networks for error reduction of multi-sensor gas analysis systems 96

## NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS

- Dolapchi S.M., Denisova O.A.* Globules and their internal structure 106
- Dolomatov M.Yu., Paymurzina N.Kh., Kovaleva E.A.* Estimation of ionization energy and electron affinity of polycyclic aromatic semiconductors by integral characteristics of the distribution of the spectral density of electronic spectrum 112
- About the authors** 118



**Калий В. А.**

**Kaliy V. A.**

кандидат технических наук,  
главный конструктор ОКБ АО «УАПО»,  
г. Москва, Российская Федерация

УДК 621.31

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ НЕ МЕНЕЕ 5 кВт/кг

В настоящей статье рассмотрен электромагнитный расчет и приведены параметры вентильного синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов номинальной мощностью 260 кВт при номинальной частоте вращения 2500 об/мин. Вентильный синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов предназначен для привода воздушного винта легкого самолета. Число фаз равно шести, схема соединения обмоток – звезда. Для достижения наилучших характеристик, в частности высокой удельной мощности 5 кВт/кг, был произведен поиск оптимального соотношения числа полюсов ротора и числа зубцов статора. Как показали расчеты, для реализации необходимого электромагнитного момента при заданных геометрических размерах в данном случае наилучшим вариантом является соотношение 28 полюсов на роторе и 36 зубцов статора. Также выполнено компьютерное моделирование разработанного электродвигателя в системах Mathcad, ANSYS, MATLAB, по результатам которого проведена предварительная компоновка электродвигателя. Для достижения высоких удельных показателей в конструкции электродвигателя был применен ряд специальных решений, среди которых применение двух трехфазных зубцовых обмоток, разделение способов охлаждения статора и ротора. Ротор, к тепловым потерям которого относятся фактически только потери трения, охлаждается набегающим потоком воздуха. Статор с основными тепловыми потерями, установленный в герметичном корпусе, охлаждается маслом, которое прокачивается под давлением. Самым сложным в разработке конструкции электродвигателя будет разработка герметичного статора. Здесь очень важна тщательная разработка корпуса и уплотнений на достаточно большом диаметре. На основе проведенных электромагнитных расчетов и предварительной проработки конструкции установлено, что разработанный на основе только отечественных электротехнических материалов электродвигатель на данном этапе проектирования не уступает зарубежному аналогу по удельной мощности. Кроме того, он может быть реализован на любом предприятии, специализирующемся на производстве электрических машин.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический двигатель, электромагнитный расчет, двигатель синхронный вентильный.

## ELECTROMAGNETIC CALCULATION OF THE MAGNETIC- ELECTRIC ENGINE WITH SPECIFIC CAPACITY NOT LESS 5 kW/KG

In this paper, an electromagnetic calculation of the valve synchronous motor with excitation from permanent high-coercive magnets and with a rated power of 260 kW at a nominal speed of 2500 rpm was considered and parameters were obtained. The valve synchronous electromotor with excitation from permanent magnets is intended for the airscrew drive of the light plane. The number of phases is six, the winding connection is a star. To achieve the best performance, in particular, a high specific power of 5 kW/kg, for the optimum ratio search of the number of poles of the rotor and the number of stator teeth was made. As calculations have shown, in order to realize the required electromagnetic moment for given geometric dimensions, the best option is the ratio of 28 rotor poles on and 36 stator teeth. In addition, computer simulation of the developed

electric motor in the Mathcad, ANSYS, MATLAB was carried out. Based on results, the preliminary arrangement of the electric motor were made. To achieve high specific parameters, a number of special solutions have been applied in the electric motor design, including the use of two three-phase concentrated windings, the separation of the methods for the stator and rotor cooling. The rotor, which thermal losses are in fact only the friction losses, is cooled by the oncoming airflow. An oil that is pumped under pressure cools the stator with the main thermal losses, installed in a sealed housing. The most difficult in the electric motor design is the development of a sealed stator. It is very important to carefully design the housing and seals on a sufficiently large diameter. Based on the electromagnetic calculations and preliminary design, it is established that the electric motor developed with the domestic electrotechnical materials at this design stage is not inferior to the foreign equivalent in terms of specific power. The considered electric motor can be realized at any enterprise specializing in the electric machine production.

**Key words:** magnetoelectric motor, electromagnetic calculation, synchronous valve motor.

В 2015 году компания «Сименс» показала новый электрический двигатель для легкого винтового полностью электрического самолета. Заявленные характеристики – мощность 260 кВт, масса при этом составляет всего лишь 50 кг. Удельная мощность спроектированного электродвигателя составляет 5 кВт/кг. Максимальная частота вращения электродвигателя разработки «Сименс» составляет 2500 об/мин.

В АО «Технодинамика» в 2016 году было принято решение произвести проекторочный расчет и разработать предварительную компоновку электродвигателя, не уступающего по своим параметрам этому зарубежному аналогу. Необходимо отметить, что по аналогии с прототипом выбрана конструкция магнитоэлектрического двигателя с возбуждением от постоянных магнитов при электропитании от статического инвертора напряжения.

При проведении проекторочных расчетов были использованы методики, представленные в [1–5], и рассмотрены два вида напряжения питания по постоянному току — 270 и 540 В, которые получают выпрямлением переменного тока напряжением 115/200 или 230/400 В соответственно.

Данное напряжение соответствует ГОСТ Р 54073-2010 и может быть получено как путем выпрямления источника с частотой тока 360-800 Гц, так и от аккумуляторной батареи с соответствующим числом последовательно включенных ячеек.

В проектируемом варианте было принято решение остановиться на более высоком напряжении 540 В, которое позволит снизить потери в токоведущих шинах и инверторе. Число фаз якоря электродвигателя принято шесть, соединенных звездой и конструктивно выполненных в виде зубцовых концентрических катушек. При этом для достижения наилучших характеристик в ходе расчета был произведен поиск оптимального соотношения числа полюсов ротора и числа зубцов статора. Как показали расчеты, для реализации электромагнитного момента при заданных геометрических размерах в данном случае наилучшим вариантом является соотношение 28 полюсов на роторе и 36 зубцов статора.

Обозначение электродвигателя — двигатель синхронный вентильный или ДСВ-260-2500. Основные параметры электродвигателя ДСВ-260-2500, полученные в результате электромагнитного расчета, приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Основные параметры электродвигателя

Наименование физической величины	Обозначение	Расчетное значение
Номинальная мощность, кВт	$P_{ном}$	260,0
Номинальное постоянное напряжение, В	$U_{пном}$	540
Номинальное фазное напряжение, В	$U_{фном}$	230
Номинальная частота вращения, об/мин	$n_{ном}$	2500
Число полюсов	$2p$	28
Режим работы		продолжительный
Охлаждение		жидкостное для статора
Материал стали статора		прецизионный сплав 49К2ФА

Толщина листов статора, мм	$\Delta_{ст}$	0,35
Материал стали ротора		алюминий АК-6
Толщина листов ротора, мм	$\Delta_p$	—
Основные параметры постоянных магнитов		
Марка магнита		N38
Материал магнита		сплав «неодим-железо-бор»
Остаточная индукция, Тл	$B_r$	1,22
Коэрцитивная сила по индукции, А/м	$H_{св}$	899000
Высота плашки магнита, мм	$h_m$	21
Ширина плашки магнита, мм	$b_m$	34,3
Длина одного магнита, мм	$l_{пм}$	28
Число магнитов на одном полюсе	$N_{пмп}$	2
Полное число магнитов	$N_{пм}$	56
Основные геометрические размеры двигателя		
Диаметр ротора, мм	$D_p$	456,0
Диаметр расточки статора, мм	$D_a$	457,0
Длина воздушного зазора, мм	$\delta$	0,5
Полюсное деление, мм	$\tau$	51,3
Коэффициент полюсного перекрытия	$\alpha$	0,68
Активная длина статора, мм	$l_a$	54
Активная длина ротора, мм	$l_p$	54
Высота бандажной перемычки, мм	$h_{бк}$	3,0
Диаметр вала ротора, мм	$D_в$	50,0
Основные геометрические размеры статора двигателя		
Число зубцов статора	$z$	36
Ширина паза минимальная, мм	$b_{n1}$	26,7
Ширина паза максимальная, мм	$b_{n2}$	29,2
Ширина зубца, мм	$b_{z2}$	15
Высота зубца, мм	$h_z$	16,8
Конфигурация паза		трапецеидальный
Площадь паза, мм <sup>2</sup>	$S_n$	405,4
Высота шлица, мм	$h_{шл}$	1,5
Ширина шлица, мм	$b_{шл}$	8
Высота ярма статора, мм	$h^{я}$	8,7
Параметры обмотки статора двигателя		
Коэффициент укорочения	$K_y$	
Коэффициент распределения	$K_p$	
Коэффициент скоса	$K_{ск}$	1,0
Обмоточный коэффициент	$K_o$	0,902
Коэффициент воздушного зазора	$K_\delta$	1,014
Число фаз	$m$	3
Соединение фаз		звезда
Число звезд	$N_{зв}$	2
Число пазов на полюс и фазу	$q$	3/14
Число сторон секций в пазу	$N_{см}$	2
Число параллельных ветвей	$a_1$	1
Число параллельных проводов	$a_2$	3
Число проводников в пазу	$N_a$	24
Число витков в фазе	$w_\phi$	24
Марка провода		ПЭТПД-2-200
Сечение провода, мм <sup>2</sup>	$S_{пя}$	3,86

Размеры провода голого, мм	$a \times b$	1,0 x 4,0
Размеры провода изолированного, мм	$a_{из} \times b_{из}$	1,10 x 4,12
Вылет обмотки статора, мм	$l_{выл}$	24
Средняя длина витка, м	$L_e$	0,218
Активное сопротивление фазы при 20 °С, Ом	$R_a$	0,00776
Индуктивное сопротивление рассеяния фазы, Ом	$X_s$	0,136
Индуктивное сопротивление фазы по оси $d$ , Ом	$X_d$	0,177
Индуктивное сопротивление фазы по оси $q$ , Ом	$X_q$	0,177
Шаг по пазам	$y$	1 (1 - 2)
Результаты поверочного расчета в номинальном режиме		
Расчетное напряжение фазы, В	$U_\phi$	230,0
Расчетный ток нагрузки, А	$I_n$	261
Расчетная частота вращения, об/мин	$n$	2500
Магнитный поток в зазоре в номинальном режиме, Вб	$\Phi_\delta$	
Полная индукция в зазоре в номинальном режиме, Тл	$B_\delta$	0,74
Расчетный коэффициент полюсного перекрытия	$\alpha_i$	0,675
Индукция в зубце якоря, Тл	$B_z$	1,99
Индукция в спинке якоря, Тл	$B_{я}$	1,70
Коэффициент насыщения магнитной цепи	$K_\mu$	2,529
Массовые характеристики		
Момент инерции ротора, кгм <sup>2</sup>	$J_p$	1,695
Масса активных материалов двигателя, кг	$M_{ac}$	32,6
Масса двигателя, кг	$M_{эд}$	48,9

Результаты моделирования разработанного электродвигателя ДСВ-260-2500 в системах Mathcad, ANSYS, MATLAB, полученные при заданной геометрии электродвигателя, приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что спроектированный электродвигатель обеспечивает мощность на валу 260 кВт при частоте вращения 2500 об/мин.

Коэффициент полезного действия ДСВ-260-2500 равен 95 %, что не уступает электродвигателю «Сименс». Предварительная компоновка электродвигателя ДСВ-260-2500 приведена на рисунке 1, а результаты поверочного расчета с моделированием магнитного поля представлены на рисунках 2-4.

**Таблица 2.** Результаты поверочного расчета в номинальном режиме

Наименование физической величины	Значение
Напряжение постоянное $U$ , В	540
Постоянный ток $I$ , А	508
Полезная мощность на валу $P_2$ , Вт	260
Номинальная частота вращения, об/мин	2500
Момент электромагнитный, $H$	996,8
Действующий ток фазы статора $I_s$ , А	522,4
Плотность тока $J_{лс}$ , А/мм <sup>2</sup>	21,8
Потребляемая мощность $P_{ла}$ , кВт	274,7
Коэффициент полезного действия $\eta$ , %	95,2



**Рисунок 1.** Предварительная компоновка электродвигателя ДСВ-260-2500



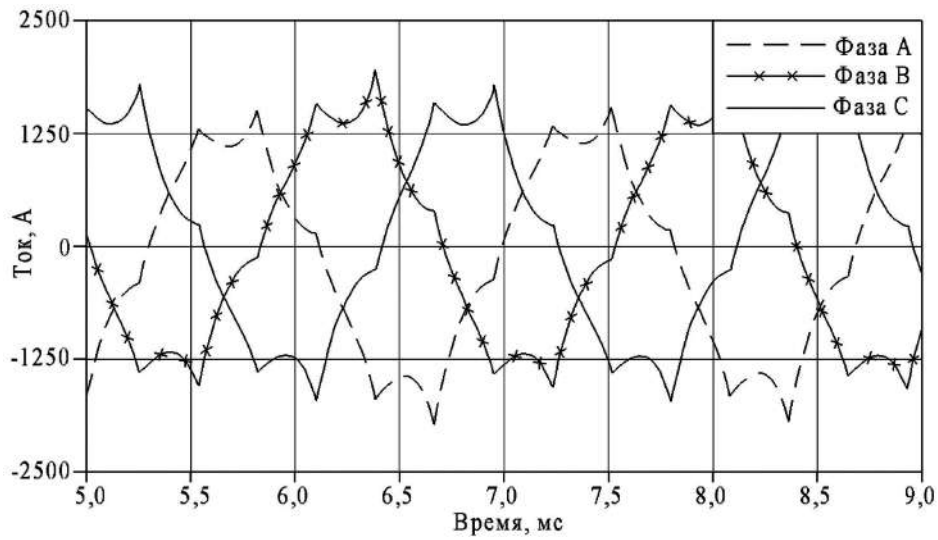


Рисунок 2. Графики токов в рабочих обмотках одной трехфазной звезды (показаны удвоенные токи)

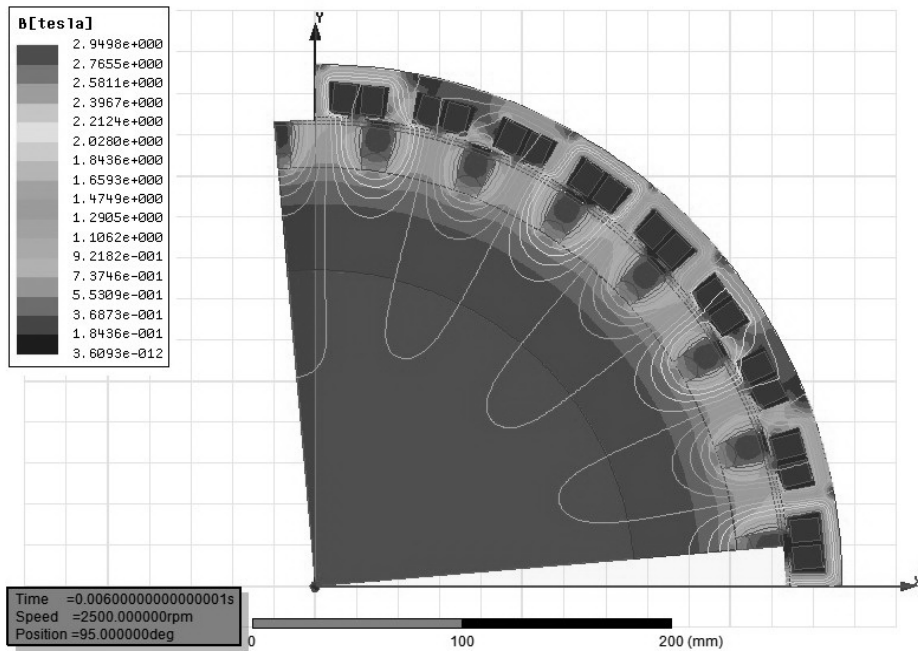


Рисунок 3. Распределение индукции и магнитных силовых линий в магнитной системе электродвигателя

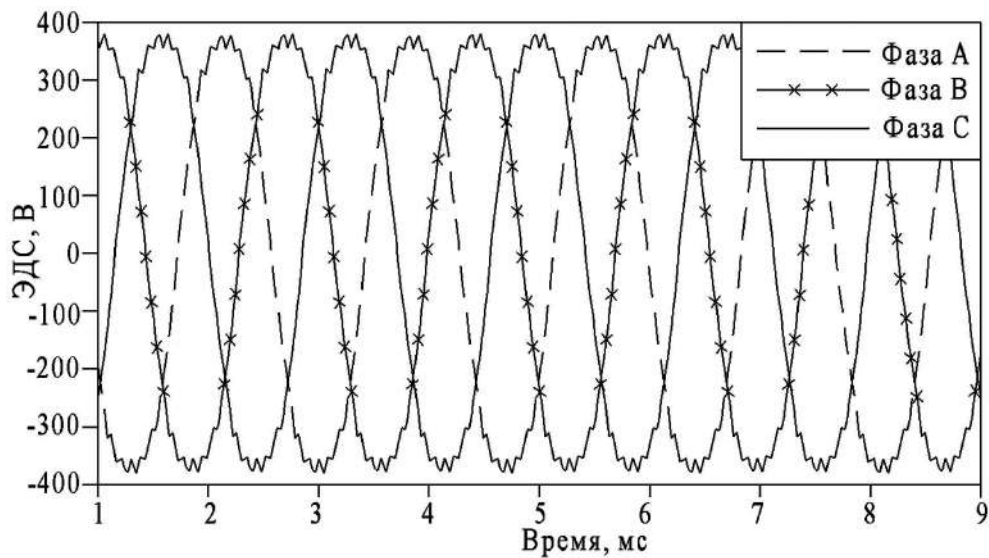


Рисунок 4. Графики фазных противо-ЭДС (для одной трехфазной звезды)

Основные характеристики спроектированного электродвигателя приведены в таблице 2. Они показывают, что для выбранных геометрических размеров и способа охлаждения они являются достаточными. Предварительная компоновка и оценка массы электродвигателя ДСВ-260-2500 показывает, что она не превышает 50 кг.

Для достижения высоких удельных показателей в конструкции электродвигателя ДСВ-26-2500 должен быть применен ряд специальных конструктивных решений. Основным техническим решением в отношении конструкции в данной электрической машине является разделение способов охлаждения статора и ротора. Ротор, к тепловым потерям которого относятся фактически только потери трения, охлаждается набегающим потоком воздуха. Статор с основными

тепловыми потерями, установленный в герметичном корпусе, охлаждается маслом, которое прокачивается под давлением. Самым сложным в разработке конструкции электродвигателя будет разработка герметичного статора. Здесь необходима тщательная разработка корпуса и уплотнений на достаточно большом диаметре.

### Вывод

Таким образом, проведенные электромагнитные расчеты и предварительная проработка конструкции показывают, что разработанный на основе только отечественных электротехнических материалов электродвигатель на данном этапе проектирования не уступает зарубежному образцу по удельной мощности. Он вполне может быть реализован на любом предприятии, производящем электрические машины.

### Список литературы

1. Специальные электрические машины / Под ред. А.И. Бертинова. М.: Энергоатомиздат, 1982. 547 с.
2. Попов В.И. Новые схемы трехфазных обмоток электрических машин с улучшенными свойствами: монография. Нижний Новгород: ВГИПИ, 1998. 116 с.
3. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
4. Пospelov Л.И. Конструкция авиационных электромашин. М.: Энергия, 1982. 320 с.
5. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969. 632 с.

### References

1. Spetsial'nyye elektricheskiye mashiny [Special Electric Machines]. Pod red.

A.I. Bertinova. Moscow, Energoatomizdat, 1982, 547 p.

2. Popov V.I. Novyye skhemy trekhfaznykh obmotok elektricheskikh mashin s uluchshennymi svoystvami [New Schemes of Three-Phase Windings of Electrical Machines with Improved Properties]: monograph. Nizhniy Novgorod, VGIPI, 1998, 116 p.

3. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya Ye.A. Asinkhronnyye dvigateli serii 4A [Asynchronous Motors of 4A Series]: reference book. Moscow, Energoizdat, 1982, 504 p.

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

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



**Никулин О. В.**  
**Nikulin O. V.**

кандидат технических наук,  
ООО «УК «Татбурнефть»,  
г. Альметьевск, Российская Федерация



**Шабанов В. А.**  
**Shabanov V. A.**

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

УДК 621.31

## УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА БУРОВЫХ НАСОСОВ ПРИ НАРУШЕНИЯХ В СИСТЕМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исследуется электропривод бурового насоса на основе двигателя постоянного тока при отказах системы возбуждения. Рассматривается возможность сохранения в работе электропривода бурового насоса при аварийном исчезновении тока в двух из четырех полюсных катушках возбуждения четырехполюсного электродвигателя постоянного тока. Для рассматриваемого аварийного режима получена математическая модель магнитной цепи двигателя постоянного тока и компьютерная модель электротехнического комплекса в среде Simulink. На основе осциллограмм, снятых при бурении скважины глубиной 1931 м, рассмотрено изменение режима работы бурового насоса при потере тока возбуждения в двух полюсных катушках. Показаны графики изменения подачи и давления на выходе бурового насоса в процессе бурения. Показано, что при таком аварийном режиме возможно сохранение в работе электродвигателя бурового насоса, если обеспечить регулирование коэффициентов усиления по скорости и току в цепи обратной связи в схеме управления электроприводом.

**Ключевые слова:** электродвигатель постоянного тока, математическая модель, буровой насос.

## STABILITY OF DC MOTORS OF DRILLING MECHANISMS IN CASE OF DISTURBANCES IN EXCITATION SYSTEM

The condition of the electric driver of the mud pump made on the base of a DC motor because of failures in the excitation system are reviewing. An opportunity to keep the driver of the mud pump operational at failures of two of four of the current pole coils of excitation of the four poles electric DC motor are considering. For the reviewed emergency mode we compiled a mathematical model of magnetic circuit of the DC motor, and a computer model of the electric system in the Simulink environment. On the base of the waveforms detected in the process of drilling wells of 1931 m depth, we considered a change of the operating mode of the mud pump while losing the excitation current of two of the pole coils. There are diagrams of the flow and pressure change at the outlet of the mud pump in the drilling process. It have revealed that the describe emergency mode could secure operations of the electric motor of the mud pump, if we could provide it rate regulation of the acceleration by speed and current in the feedback circuit of the scheme of the motor control.

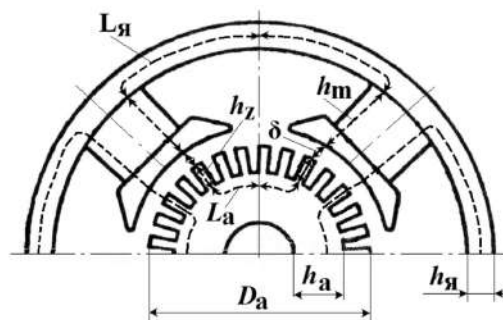
**Key words:** DC motor, mathematical model, mud pump.

**Введение.** Для привода как основных, так и вспомогательных механизмов буровых установок широко используются как нерегулируемые, так и регулируемые электроприводы [1–3]. Достоинства и недостатки частотно-регулируемого электропривода переменного тока рассмотрены в [4–6], возможности частотного регулирования синхронных электродвигателей в приводе буровых установок рассмотрены в [7–11]. Достоинствами электродвигателей постоянного тока (ДПТ) в приводе буровых лебедок и насосов являются высокий пусковой момент и сохранение высокого КПД во всем диапазоне регулирования [12–14]. Поэтому их разработка продолжает оставаться актуальной [15–17] и они находят применение для привода основных механизмов буровых установок типа БУ-2000/125ЭП и БУ-2900/175ЭП, в которых буровые насосы, лебедки и роторы в качестве электропривода используют ДПТ с независимым возбуждением. Однако электродвигатели буровых механизмов эксплуатируются в тяжелых условиях — наличие влаги, пыли и вибрации, что повышает вероятность отказов в работе как электродвигателей, так и их систем возбуждения и управления. Из опыта эксплуатации известны случаи частичного отказа системы возбуждения, когда ток возбуждения исчезает не во всех, а только в части полюсных катушек возбуждения. Это нарушает нормальную работу электродвигателя и может привести к аварийному останову процесса бурения и значительному материальному ущербу. Поэтому представляет научный и практический интерес исследование процессов при частичных отказах системы возбуждения ДПТ и возможности сохранения устойчивости буровых установок при таких отказах.

**Постановка задачи.** В буровых установках БУ-2000/125ЭП и БУ-2900/175ЭП используются четырехполюсные ДПТ. Обмотка возбуждения четырехполюсного ДПТ содержит две пары полюсных катушек, соединенных последовательно-параллельно и образующих две параллельные цепи. В каждой из параллельных цепей две полюсные катушки включены последовательно. При выходе из строя одной из параллельных

цепей исчезает ток только в одной паре полюсных катушек, в то время как по второй паре катушек продолжает протекать ток возбуждения и магнитное поле в электродвигателе частично сохраняется. Если при этом ДПТ останется в работе, то буровая установка может остаться в работе. Это позволит либо сохранить устойчивость технологического процесса и продолжить бурение, либо безаварийно его остановить. Целью статьи является исследование изменения скорости вращения и мощности, развиваемой ДПТ при частичном отказе системы возбуждения, на примере электропривода бурового насоса.

**Метод исследования.** Для исследования устойчивости электропривода бурового насоса при частичных отказах системы возбуждения ДПТ используется математическая модель магнитной цепи машины постоянного тока и компьютерная модель электро-технического комплекса бурового насоса в среде программирования Matlab/Simulink. В основе анализа свойств ДПТ при нарушениях в системе возбуждения лежит расчет магнитной цепи. При исчезновении тока в части катушек возбуждения изменяются пути протекания магнитного потока и изменяется уравнение равновесия намагничивающих сил. В нормальном режиме работы все четыре полюса машины создают магнитные потоки, одинаковые по величине и одинаково распределенные в зазоре. Поэтому расчет магнитной цепи достаточно вести для одной пары полюсов для средней линии магнитного потока. Магнитная цепь машины постоянного тока, показанная на рисунке 1, разбита на участки: воздушный зазор ( $\delta$ ), зубцы якоря ( $h_z$ ), ярмо (сердечник) якоря ( $2L_a$ ), полюсы ( $h_m$ ) и ярмо статора (станины) ( $2L_{\text{я}}$ ).



**Рисунок 1.** Магнитная цепь машины постоянного тока в нормальном режиме

В нормальном режиме работы уравнение по закону полного тока для магнитной цепи записывают либо для одного полюса [12], либо для одной пары полюсов [14]. Уравнение магнитной цепи для одной пары полюсов без учета реакции якоря имеет вид:

$$F = \int \overline{H} dl = 2H_\delta \delta + 2H_z h_z + 2H_a L_a + 2H_m h_m + 2H_y L_y, \quad (1)$$

где  $F = 2w_\delta i_\delta$  (2)

— магнитодвижущая сила, созданная током возбуждения двух обмоток возбуждения;  $H$  — вектор напряженности магнитного поля;  $dl$  — элемент дуги, по которой ведется интегрирование;  $\delta, h_z, L_a, h_m, L_y$  — показанные на рисунке 1 геометрические размеры;  $H_\delta, H_z, H_a, H_m, H_y$  — напряженности магнитного поля на соответствующих участках;  $w_\delta$  — число витков обмотки возбуждения на полюс;  $i_\delta$  — ток возбуждения.

При отказе одной из обмоток возбуждения магнитные цепи изменятся и примут вид, показанный на рисунке 2.

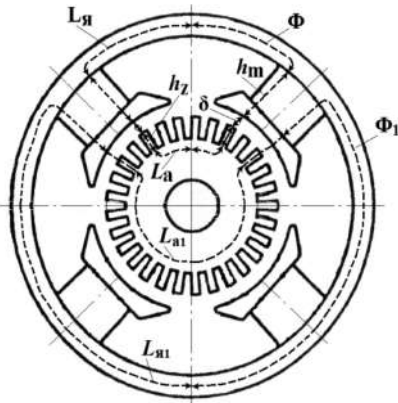


Рисунок 2. Магнитная цепь машины постоянного тока при отказе одной из катушек возбуждения

В отличие от рисунка 1 для анализа магнитной цепи на рисунке 2 необходимо рассматривать два магнитных потока  $\Phi$  и  $\Phi_1$ , отличающихся длиной магнитной цепи. Длины концентрических участков  $L_a$  и  $L_y$  для потока  $\Phi_1$  на рисунке 2 увеличиваются примерно в три раза. Так, если длина участка  $L_a$  на рисунке 1 потока  $\Phi$  определяется по формуле [10]:

$$L_a = \frac{\pi(D_a - 2h_z - h_a)}{4p} + \frac{h_a}{2}, \quad (3)$$

где  $p$  — число полюсов, то для участка  $L_{a1}$  на рисунке 2 длина магнитной цепи будет определяться выражением

$$L_{a1} = 3 \frac{\pi(D_a - 2h_z - h_a)}{4p} + \frac{h_a}{2}. \quad (4)$$

Аналогично для участка  $L_y$  потока  $\Phi$  его длина определяется по формуле [1]:

$$L_y = \frac{\pi(D_a + (\delta + h_m) + h_y)}{4p} + \frac{h_a}{2}, \quad (5)$$

а для участка  $L_{y1}$ :

$$L_{y1} = 3 \frac{\pi(D_a + (\delta + h_m) + h_y)}{4p} + \frac{h_a}{2}. \quad (6)$$

Тогда уравнение по закону полного тока для контура с потоком  $\Phi_1$  при отказе одной из катушек можно записать в виде:

$$F_1 = \int \overline{H} dl = 2H_\delta \delta + 2H_z h_z + 2H_a L_{a1} + 2H_m h_m + 2H_y L_{y1} = 2\omega_\delta i_\delta. \quad (7)$$

Магнитная цепь на рисунке 2 содержит два неизвестных потока  $\Phi$  и  $\Phi_1$ , и для ее расчета необходимо решать систему из двух уравнений: уравнения (1), записанного для рисунка 2, и уравнения (7). При неизменном токе возбуждения магнитодвижущая сила  $F$  по уравнению (2), созданная током возбуждения двух обмоток возбуждения, остается неизменной:

$$F = 2\omega_\delta i_\delta = const. \quad (8)$$

Поэтому сумма намагничивающих сил по уравнениям (1) и (7) для всех участков магнитной цепи на рисунках 1 и 2 также остается неизменной.

*Компьютерная модель.* Для решения уравнений (1) и (2) с учетом нелинейности характеристики намагничивания и исследования устойчивости электропривода бурового насоса при нарушении симметрии системы возбуждения ДПТ была разработана компьютерная модель электротехнического комплекса бурового насоса в среде Simulink (рисунок 3). Модель электротехнического комплекса содержит подсистему (модель) магнитной цепи, модель ДПТ, модель бурового насоса (блок регуляторов и формирования нагрузки) и подсистему вспомогательных расчетов.

В модели магнитной цепи выполняется расчет намагничивающих сил по уравнениям (1) и (2) на участках магнитных цепей  $\Phi$  и  $\Phi_1$  (см. рисунок 2). Для учета намагничивания стали на участках магнитной цепи использо-



Рисунок 3. Компьютерная модель электротехнического комплекса бурового насоса и расчета магнитной цепи ДПТ при частичном отказе системы возбуждения

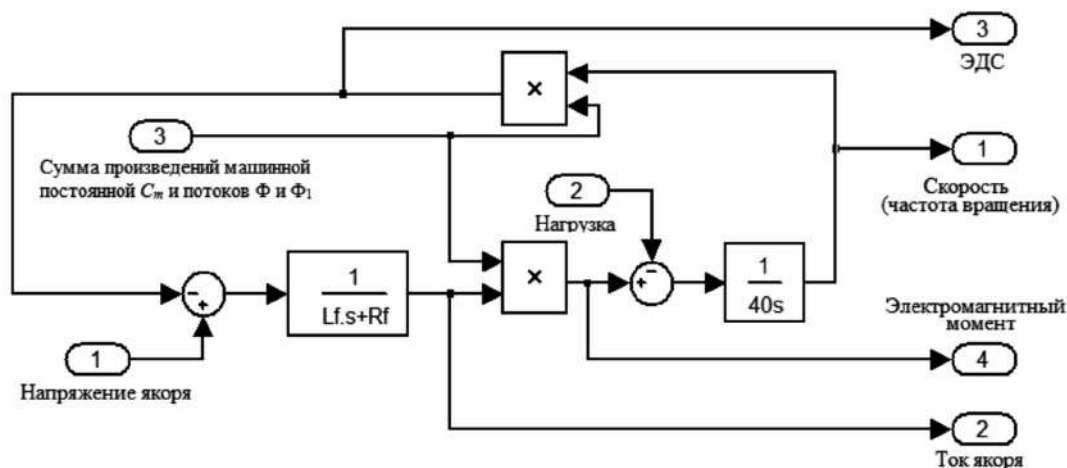


Рисунок 4. Модель ДПТ в составе модели электротехнического комплекса бурового насоса на рисунке 3

ван блок одномерной таблицы Look-UpTable, задающий в табличной форме кривую намагничивания  $B(H)$  электротехнической стали. В подсистеме вспомогательных расчетов вычисляются: величина магнитного потока  $\Phi_1$ , при котором соблюдается условие (8); сумма произведений машинной постоянной  $C_m$  и потоков  $\Phi$  и  $\Phi_1$ ; развиваемый электромагнитный момент. При создании модели ДПТ использованы передаточные функции для тока якоря и частоты вращения при нулевых начальных условиях [18]:

$$i(s) = [u(s) - e(s)] \frac{1}{R + Ls}; \quad (9)$$

$$\omega(s) = [M(s) - M_c(s)] \frac{1}{Js}, \quad (10)$$

где  $i$  — ток якоря;  $u$  — напряжение якоря;  $e$  — ЭДС якоря;  $R$  — активное сопротивление цепи якоря;  $L$  — индуктивность цепи якоря;  $\omega$  — частота вращения;  $M$  — электромагнитный момент;  $M_c$  — момент сопротивления на валу двигателя;  $J$  — момент инерции;  $s$  — оператор дифференцирования.

Модель электродвигателя в составе электротехнического комплекса, представленная на рисунке 3 блоком ДПТ, показана на рисунке 4.

Заданием скорости ДПТ является сигнал «напряжение якоря», пропорциональный

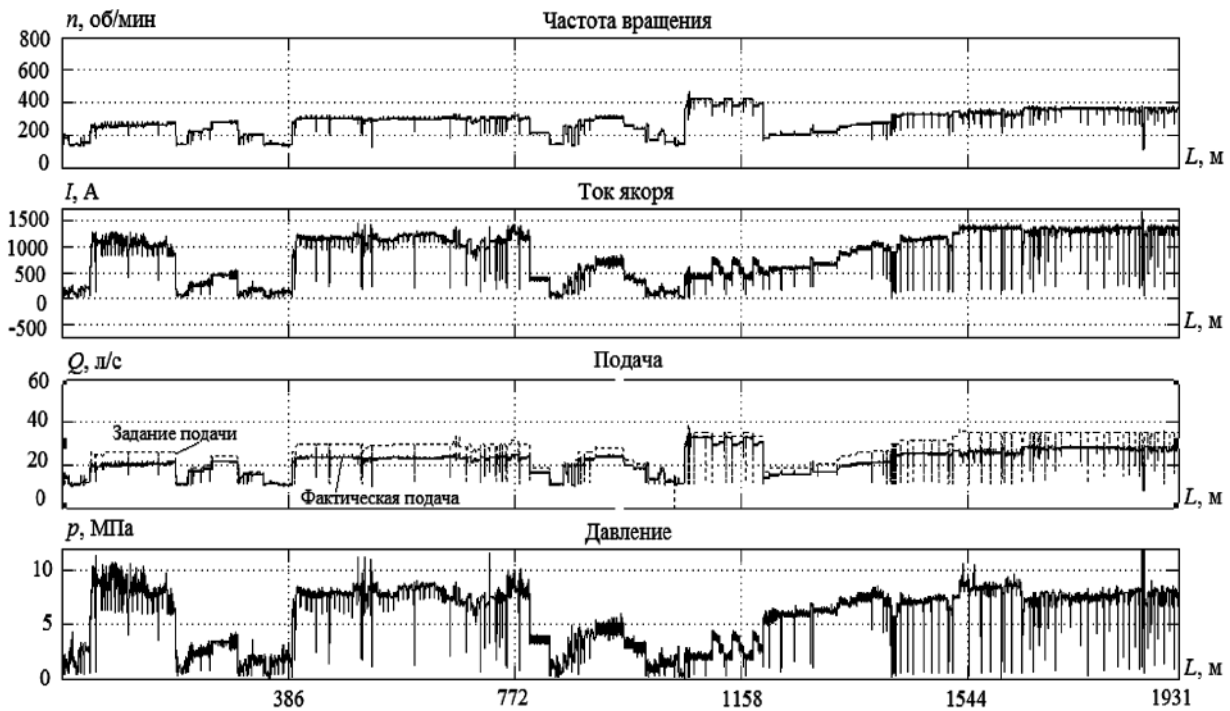


Рисунок 5. Результаты моделирования

заданию необходимой подачи бурового насоса. Нагрузкой ДПТ является сигнал «нагрузка», пропорциональный давлению на выходе бурового насоса.

Результаты расчетов на модели показали, что при исчезновении тока возбуждения в одной паре полюсных катушек магнитный поток в зазорах снижается, частота вращения увеличивается, развиваемые электродвигателем электромагнитный момент и мощность снижаются. Мощность исследуемого четырехполюсного ДПТ снизилась на 54 %.

*Исследование устойчивости бурового насоса.* Рассмотрим изменение режима работы бурового насоса при потере тока возбуждения в одной паре полюсных катушек ДПТ на примере скважины 20627 глубиной 1931 м ООО «УК «Татбурнефть». Бурение производилось без смены втулок с учетом рекомендаций, приведенных в [19].

Изменение режимных параметров бурового насоса, полученное на модели при выведенной из работы одной паре полюсных катушек возбуждения, приведены на рисунке 5.

При исследовании работы ДПТ бурового насоса в модель были введены пропорциональный регулятор скорости и ПИ-регулятор тока, существующие в реальной системе управления в составе блока регуляторов с

теми же настройками (рисунок 3). Данные о подаче, выгруженные из контроллера системы контроля параметров бурения, подавались на вход «нагрузка» (рисунки 3 и 4). Система управления настроена таким образом, что при достижении током якоря номинального значения, автоматически (в процессе дальнейшего бурения) снижается частота вращения двигателя, обеспечивая регулирование по закону постоянства мощности. Из рисунка 5 видно, что частота вращения  $n$ , ток якоря  $I$ , подача насоса  $Q$  и давление на выходе  $p$  непрерывно изменяются в процессе бурения. При моделировании при исчезновении тока в двух полюсных катушках обмотки возбуждения происходит снижение частоты вращения насоса. На этих участках ток меньше номинального значения, мощность и подача насоса снижены, что приводит к снижению механической скорости бурения скважины. Для сохранения частоты вращения и восстановления требуемой подачи бурового насоса необходимо ввести усилительные блоки для регулирования скорости вращения ДПТ в функции подачи насоса. Для этого в цепи обратной связи по току и скорости в модель были введены блоки КУ1 и КУ2 (рисунок 3), коэффициенты усиления которых подобраны таким образом,

чтобы подача насоса была равна заданию при недогруженном приводе и снижалась при номинальном токе якоря.

### Выводы

1. Разработана компьютерная модель электротехнического комплекса бурового насоса с электроприводом постоянного тока, позволяющая выполнять исследование работы электротехнического комплекса бурового

насоса при работе ДПТ с частично отказавшей системой возбуждения.

2. При выходе из строя одной из четырех полусных обмоток возбуждения электромагнитный момент и мощность ДПТ снижаются. Для сохранения в работе бурового насоса необходимо ввести регулирование коэффициентов усиления по скорости и току в цепи обратной связи в схеме управления электроприводом.

### Список литературы

1. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтяной и газовой промышленности: учебник для вузов. М.: Недра, 2000. 487 с.
2. Шабанов В.А. Основы регулируемого электропривода основных механизмов бурения, добычи и транспорта нефти: учеб. пособие для вузов. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2009. 156 с.
3. Никулин О.В., Шабанов В.А. Об особенностях эксплуатации электрооборудования и системы автоматизации системы верхнего привода /// *ROGTEC*. 2016. Вып. 45. С. 61–76.
4. Шабанов В.А., Никулин О.В. Оценка эффективности частотно-регулируемого привода буровых насосов в Азнакаевском УБР ООО «Татнефть-Бурение» // *Энергетика Татарстана*. 2008. № 1 (9). С. 74–81.
5. Абрамов Б.И., Коган А.И., Пономарев В.М., Шевырева Н.Ю., Шевырев Ю.В., Фащиленко В.Н. Активные выпрямители как универсальное средство повышения качества электрической энергии в системах электропитания буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом // *Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016*, Пермь, 3–7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во Пермского национального политехнического университета, 2016. С. 372–376.
6. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Основные тенденции развития автоматизированного электропривода // *Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016*, Пермь, 3–7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во Пермского национального
- политехнического университета, 2016. С. 81–83.
7. Шабанов В.А., Никулин О.В. Система автоматического регулирования электроприводов буровых насосов // *Энергетика Татарстана*. 2008. № 3. С. 48–52.
8. Шабанов В.А., Никулин О.В. Возможности скалярного частотного регулирования синхронных электродвигателей буровых установок // *Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: Межвуз. сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ*, 2010. С. 59–66.
9. Шабанов В.А., Никулин О.В. Векторное регулирование момента синхронного электропривода бурового насоса // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2012. № 1. С. 137–144.
10. Шабанов В.А., Никулин О.В., Чумаков Д.И. Экономический эффект от внедрения синхронного частотно-регулируемого электропривода бурового насоса // *Академия Энергетики*. 2010. № 2 (34). С. 92–94.
11. Абрамов Б.И., Кожиков О.И., Шиленков В.А., Васильев В.К., Таран Д.А., Кириллов В.Е. Создание современных электротехнических комплексов для управления наземных и морских буровых установок // *Тр. VIII Междунар. (XIX Всеросс.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014*. Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2014. Т. 2. С. 150–154.
12. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Юрай, 2015. 676 с.
13. Усольцев А.А. Электрические машины: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 532 с.
14. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн.



учебн. заведений. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.

15. Morales R., Somolinos J.A., Sira-Ramirez H. Control of a DC Motor using Algebraic Derivative Estimation with Real Time Experiments // *Measurement*. 2014. Vol. 47. P. 401–417.

16. Tapia R., Roses J.S., Aguilar O., Templos A. On-Line Speed Control of the Shunt-Connected DC Motor Via Neurocontroller // *The 7th IET international conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 8–10 April 2014. Manchester, UK, 2014.

17. Козярук А.Е. Эффективный промышленный электропривод сегодня // *Тр. IX Междунар. (XX Всеросс.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016*, Пермь, 3–7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во Пермского национального политехнического университета, 2016. С. 56–58.

18. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

19. Шабанов В.А., Никулин О.В. Сокращение числа используемых втулок буровых насосов при регулируемом электроприводе // *Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всеросс. науч.-техн. конф.: в 2 т. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. Т. 1. С. 20–24.*

## References

1. Men'shov B.G., Ershov M.S., Jari-zov A.D. *Jelektrotehnicheskie ustanovki i komplekсы v neftjanoj i gazovoj promyshlennosti: uchebник dlja vuzov*. М.: Nedra, 2000. 487 p.

2. Shabanov V.A. *Osnovy reguliruемого jelektroprivoda osnovnyh mehanizmov burenija, dobychi i transporta nefti: uchebное posobie dlja vuzov*. Ufa: Izd-vo «Neftegazovoe delo», 2009. 156 p.

3. Nikulin O.V., Shabanov V.A. Ob osobennostjah jekspluatacii jelektrooborudovanija i sistemy avtomatizacii sistemy verhnego privoda // *ROGTEC*. 2016. Issue 45. P. 61–76.

4. Shabanov V.A., Nikulin O.V. Ocenka jeffektivnosti chastotno-reguliruемого privoda burovых насосов v Aznakaevskom UBR ООО

«Tatneft'-Burenie» // *Jenergetika Tatarstana*. 2008. № 1 (9). S. 74–81.

5. Abramov B.I., Kogan A.I., Ponomarev V.M., Shevyreva N.Ju., Shevyrev Ju.V., Fashhilenko V.N. Aktivnye vyprjamiteli kak universal'noe sredstvo povyshenija kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija burovых установок s chastotno-reguliruемым jelektroprivodom // *Тр. IX Mezhdunar. (XX Vseross.) конф. по автоматизированному электроприводу АЖЕП-2016*, Perm', 3–7 октябрия 2016 г. Perm: Izd-vo Permskogo nacional'nogo politehnicheskogo universiteta, 2016. S. 372–376.

6. Onishhenko G.B., Jun'kov M.G. Osnovnye tendencii razvitija avtomatizirovannogo jelektroprivoda // *Тр. IX Mezhdunar. (XX Vseross.) конф. по автоматизированному электроприводу АЖЕП-2016*, Perm', 3–7 октябрия 2016 г. Perm: Izd-vo Permskogo nacional'nogo politehnicheskogo universiteta, 2016. S. 81–83.

7. Shabanov V.A., Nikulin O.V. Sistema avtomaticheskogo regulirovanija jelektroprivodov burovых насосов // *Jenergetika Tatarstana*. 2008. № 3. S. 48–52.

8. Shabanov V.A., Nikulin O.V. Vozmozhnosti skaljarnogo chastotного regulirovanija sinhronnyh jelektrodvigatelej burovых установок // *Povyshenie nadezhnosti i jenergojeffektivnosti jelektrotehnicheskikh sistem i komplekсов: mezhvuz. sb. науч. тр. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2010. S. 59–66.*

9. Shabanov V.A., Nikulin O.V. Vektornoe regulirovanie momenta sinhronного jelektroprivoda burovого насоса // *Izvestija vuzov. Problemy jenergetiki*. 2012. № 1. S. 137–144.

10. Shabanov V.A., Nikulin O.V., Chumakov D.I. Jekonomicheskij jeffekt ot vnedrenija sinhronного chastotno-reguliruемого jelektroprivoda burovого насоса // *Akademija Jenergetiki*. 2010. № 2 (34). S. 92–94.

11. Abramov B.I., Kozhakov O.I., Shilenkov V.A., Vasil'ev V.K., Taran D.A., Kirillov V.E. Sozdanie sovremennyh jelektrotehnicheskikh komplekсов dlja upravlenija nazemnyh i morskikh burovых установок // *Тр. VIII Mezhdunar. (XIX Vseross.) конф. по автоматизированному электроприводу АЖЕП-2014*. Saransk: Izd-vo Mordovskogo universiteta, 2014. Т. 2. S. 150–154.

12. Kopylov I.P. *Jelektricheskie mashiny*. M.: Jurajt, 2015. 676 s.
13. Usol'cev A.A. *Jelektricheskie mashiny: ucheb. posobie*. SPb.: NIU ITMO, 2013. 532 s.
14. Vol'dek A.I. *Jelektricheskie mashiny: uchebnik dlja studentov vyssh. tehn. uchebn. zavedenij*. 3-e izd., pererab. L.: Jenergija, 1978. 832 s.
15. Morales R., Somolinos J.A., Sira-Ramírez H. Control of a DC Motor using Algebraic Derivative Estimation with Real Time Experiments // *Measurement*. 2014. Vol. 47. P. 401–417.
16. Tapia R., Roses J.S., Aguilar O., Templos A. On-Line Speed Control of the Shunt-Connected DC Motor Via Neurocontroller // *The 7th IET international conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 8–10 April 2014. Manchester, UK, 2014.
17. Kozjaruk A.E. *Jefferktivnyj promyshlennyj jelektroprivod segodnja* // Tr. IX Mezhdunar. (XX Vseross.) konf. po avtomatizirovannomu jelektroprivodu AJeP-2016, Perm', 3–7 oktjabrja 2016 g. Perm: Izd-vo Permskogo nacional'nogo politehnicheskogo universiteta, 2016. S. 56–58.
18. Chernyh I.V. *Modelirovanie jelektrotehnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink*. M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008. 288 s.
19. Shabanov V.A., Nikulin O.V. *Sokrasshenie chisla ispol'zuemyh vtulok burovyh nasosov pri reguliruemom jelektroprivode* // *Jelektrotehnologii, jelektroprivod i jelektrooborudovanie predpriyatij: sb. nauch. tr. II Vseross. nauch.-tehn. konf.: v 2 t*. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2009. T. 1. S. 20–24.



**Тулупов В. Д.**  
**Tulupov V. D.**

*доктор технических наук,  
профессор кафедры «Электротехнические  
комплексы автономных объектов  
и электрического транспорта»,  
ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Российская Федерация*



**Ле Суан Хонг**  
**Le Xuan Hong**

*(Социалистическая Республика Вьетнам)  
аспирант кафедры «Электротехнические  
комплексы автономных объектов  
и электрического транспорта»,  
ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Российская Федерация*

УДК 629.423.31

## **ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ**

Из-за роста населения современных мегаполисов увеличивается объем городских пассажирских перевозок. При этом необходимо в полном объеме учитывать требования комфортности перевозок, а также прорабатывать вопросы рационального использования материальных и топливно-энергетических ресурсов страны. Наиболее совершенным видом городского транспорта является электрический транспорт (метрополитен, троллейбус, трамвай и т.д.), который использует для тяги электрическую энергию и не оказывает вредного воздействия на окружающую среду. Известно, что городской электрический транспорт является одним из крупных потребителей электрической энергии. Поэтому очень важен правильный выбор рациональной конструкции тягового электроподвижного состава и эффективной его эксплуатации. На сегодняшний день система тягового электропривода (ТЭП) для вагонов метрополитенов Социалистической Республики Вьетнам окончательно еще не выбрана, поэтому, исходя из вышесказанного, выбранная тема исследования статьи является актуальной.

Научную ценность работы представляет оценка эффективности тягово-энергетических и экономических показателей вагонов метрополитенов с различными системами ТЭП на основе анализа результатов расчетов, полученных на математических моделях.

Практической значимостью работы являются предложения авторов по разработке и внедрению наиболее эффективного ТЭП для строящихся и проектируемых линий метрополитена в крупных городах Вьетнама.

**Ключевые слова:** городские пассажирские перевозки, наземный транспорт, выбор класса напряжения, коллекторная тяговая машина, электромеханическая характеристика, пусково-тормозная характеристика, кривые движения, кривые разгона, среднее ускорение, среднее замедление.

## **SELECTION OF THE RATIONAL ELECTRIC TRACTION SYSTEM FOR THE METRO OF THE SOCIALIST REPUBLIC OF VIETNAM**

Due to the growing population of modern megacities, the volume of urban passenger traffic is increasing. At the same time, it is necessary to take into full consideration the requirements for the comfort of transportation, as well as to study the issues of rational use of the country's material

and fuel-energy resources. The most perfect type of urban transport is electric transport (metro, trolley, tram, etc.), which uses electric energy for traction and does not have a harmful effect on the environment. It is known that urban electric transport is one of the major consumers of electrical energy. Therefore, the correct choice of the rational design of the tractive electric rolling stock and its effective operation is very important. To date, the traction drive system (TDS) for the railways of the subways of the Socialist Republic of Vietnam has not yet been fully selected, therefore, based on the foregoing, the topic chosen is relevant.

The scientific value of the work is a comprehensive assessment of the effectiveness of traction-energy and economic indicators of metro with various TDS on the basis of analysis of calculation results obtained on mathematical models.

The practical significance of the work are suggestions by the authors on developing and implementing the most effective TDS for the construction and projected subway lines in major cities of Vietnam.

**Key words:** city passenger transport, ground transportation, choice of voltage class, collector traction machine, electromechanical characteristic, starting and braking characteristic, driving curves, acceleration curves, average acceleration, average deceleration.

### Введение

Проблемы обеспечения городских пассажирских перевозок наземным транспортом крупных городов остаются актуальными и обуславливают необходимость строительства метрополитенов или увеличения их доли в общем пассажиропотоке. В связи с этим метрополитен является в настоящее время не только наиболее совершенным и комфортабельным видом массового пассажирского транспорта, но и самым надежным способом для решения всех транспортных проблем в городах Хошимин и Ханой (2 крупнейших города Вьетнама с населением в каждом более 7 млн чел.) [1].

Вышеизложенное касается принципов построения тягового электропривода (ТЭП) для вагонов метрополитена (ВМ), в частности для крупных городов Вьетнама, которые не имеют в настоящее время однозначного решения.

При этом если задача выбора класса напряжения является стандартной и легко разрешимой, то задача выбора принципов систем ТЭП для ВМ носит дискуссионный характер. Системы ТЭП сегодня реально могут быть либо с коллекторными тяговыми машинами (КТМ) постоянного тока (ПТ), либо с асинхронными (АТМ).

Преимущества приводов с использованием АТМ перед другими, присущие в некоторых областях электротехники, многими специалистами проецируются на всю сферу применения ТЭП, без учета какой-либо специфики. Поэтому разработка подходов к обоснованию выбора типа вагонов с оптимальным типом ТЭП для линий метрополи-

тена Вьетнама представляется актуальной задачей, имеющей практическое значение.

Для достижения поставленной цели в статье выполнен расчет технико-экономических показателей ВМ с различными системами ТЭП и проведена комплексная оценка их эффективности по полученным результатам расчета.

*Расчет технико-экономических показателей ВМ с различными системами ТЭП с помощью программы «MathCAD»*

На основе анализа результатов статистической обработки известных данных по эксплуатации, сведений и соображений показана неэффективность применения на вагонах метрополитена ТЭП с АТМ и обоснована целесообразность использования ТЭП на базе двигателя постоянного тока [2-5]. Для более убедительной оценки систем ТЭП авторами разработаны компьютерные модели (в среде MathCAD) для расчетов их сравнительных тягово-энергетических показателей. К этим расчетам относятся:

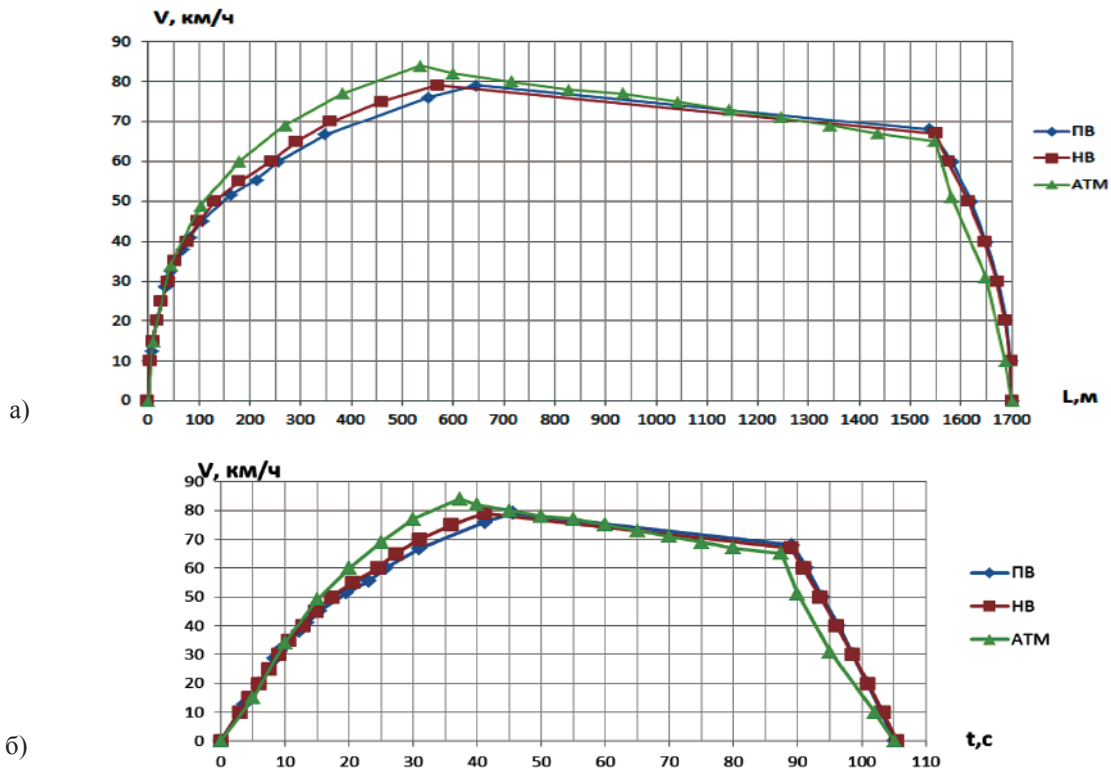
- расчет и построение электромеханической характеристики;
- расчет и построение пусково-тормозных характеристик;
- расчет и построение кривых движения для заданных условий;
- определение расхода энергии на движение и других показателей.

Все расчеты осуществляются для скорости сообщения 48 км/ч и на основе данных принятого расчетного режима работы ВМ (длина перегона 1700 м, уклон нулевой, масса вагона с пассажирами при полной

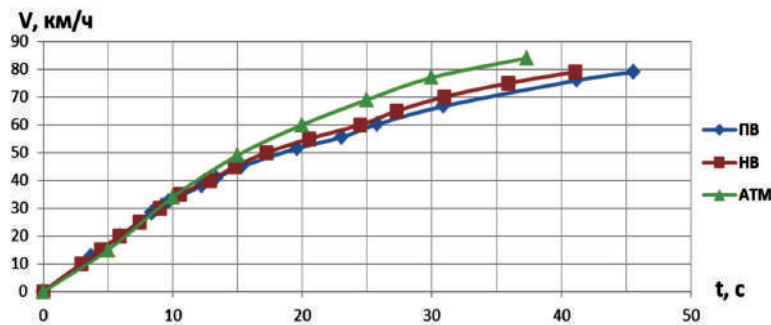
загрузке, напряжении в контактной сети при тяге 750 В и при рекуперации 1000 В).

В расчетах использованы параметры (технические характеристики) серийного вагона типа 81-717/714 с ТМ ПТ ДК-117А и вагона

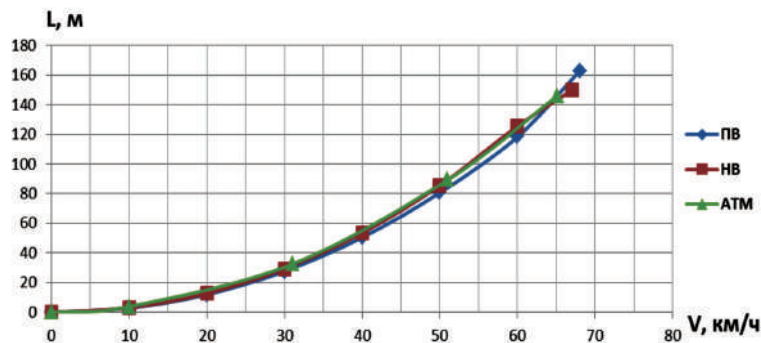
«Ока» типа 81-760/761 с АТМ ТАДП280М4 У2. По результатам расчета построены кривые движения ВМ с ТЭП постоянного тока последовательного возбуждения (ПВ), независимого возбуждения (НВ) и АТМ (рисунок 1).



а)  $V(L)$ ; б)  $V(t)$   
**Рисунок 1.** Кривые движения ВМ с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ при расчетном режиме ( $L = 1700$  м,  $V = 48$  км/ч)



**Рисунок 2.** Кривые разгона вагонов метрополитена с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ



**Рисунок 3.** Тормозные пути вагонов метрополитена с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ при расчетном режиме ( $V = 48$  км/ч)

На рисунке 2 представлены кривые разгона метropоездов с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ. Как видно, до скорости 40–50 км/ч они разгоняются почти одинаково, а только в зоне скоростей 60–80 км/ч метropоезда с АТМ разгоняются интенсивнее, а поезда с ПВ – самый медленный. Среднее ускорение метropоезда с АТМ при разгоне составило 1,0013 м/с<sup>2</sup>; у метropоездов «Серийный» (мод. 81.717/714) с ПВ — 0,9072 м/с<sup>2</sup>, а с НВ — 0,9356 м/с<sup>2</sup>.

В эксплуатации низкое ускорение метropоезда при разгоне приводит к необходимости двойного подключения тяги даже при работе на перегонах средней длины. Это вызывает перерасход электроэнергии на тягу и затрудняет работу машиниста в режиме нагона опозданий. Кроме того, более длительный уход метropоезда из зоны станции сокращает провозную способность линий метрополитена, которая ограничена именно пропускной способностью станции. Кажется, что это повышает преимущества ВМ с АТМ. Однако, по результатам расчета, значение среднего ускорения у ВМ с АТМ не сильно отличается от ВМ с ТЭП постоянного тока ПВ и НВ.

На рисунке 3 зависимость тормозного пути при служебном торможении от скорости. Очевидно, что такие характеристики по расчету (до скорости 60 км/ч) для всех типов поездов незначительно отличаются. У поездов с НВ более высокое значение среднего замедления (1,1572 м/с<sup>2</sup>), а у поездов с АТМ — 1,122 м/с<sup>2</sup>, а на эксплуатации — подробно отражены в [6].

Таким образом, тягово-тормозные характеристики вагонов метрополитена с АТМ много хуже прогнозировавшихся некоторыми специалистами.

*Определение расхода энергии на движение поезда*

По кривым движения расход энергии  $A_1$  определяют по выражению:

$$A_1 = \frac{1}{\eta_{п/ст}\eta_{тс}} \left\{ \frac{U_{кс}}{3600} \left[ (\sum I_{л,сп} \Delta t)_{тяг} - (\sum I_{л,сп} \Delta t)_{рек} \right] + \frac{P_{сч}}{3600} (T_{пер} + T_{ост}) \right\}, \text{ Вт} \cdot \text{ч}, \quad (1)$$

где  $\eta_{мс} = 0,93$  — средний КПД тяговой сети;  $\eta_{н/см} = 0,95$  — средний КПД тяговой подстан-

ции;  $P_{сч} = 3$  кВт — мощность нагрузки собственных нужд;  $T_{пер}$  — время движения поезда по перегону;  $T_{ост} = 25$  с — время остановки для метрополитена;  $U_{кс} = 750$  В — среднее напряжение в КС;  $I_{(л,сп)}$  — средний ток локомотива.

При аналитическом методе расход энергии  $A_2$  определяется суммированием отдельных составляющих:

$$A_2 = A_w + A_i + A_T + A_\eta + A_{п} + A_{сч} + A_{п/ст,кс},$$

$$A_2 = \frac{1}{\eta_{п/ст}\eta_{тс}} \left( \frac{A_w + A_i + A_T}{\eta_{ср,ТЭД}} + A_{п} + A_{сч} \right), \text{ Вт} \cdot \text{ч}, \quad (2)$$

где  $A_w$  — расход энергии на преодоление основного сопротивления движению;  $A_i$  — расход энергии на преодоление уклонов;  $A_T$  — расход энергии на торможение;  $A_\eta$  — расход энергии на компенсацию потерь в ТЭД;  $A_{сч}$  — расход энергии на собственные нужды;  $A_{п}$  — расход энергии на пуск;  $A_{п/ст,кс}$  — расход энергии на тяговые подстанции и КС;  $\eta_{ср,ТЭД}$  — КПД двигателя.

Проверка погрешности расчета удельного расхода энергии между графическим методом ( $A_{уд1}$ ) и аналитическим методом ( $A_{уд2}$ ):

$$A_{уд1,2} = \frac{A_{1,2}}{m \cdot L \cdot 10^{-3}}, \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{ тыс. км}, \quad (3)$$

$$\delta = \frac{|A_{уд2} - A_{уд1}|}{A_{уд1}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Погрешность  $\delta = 2,23$  % (меньше 10 %), следовательно, расчет сходится.

Как показали результаты тягово-энергетических расчетов (таблица 1), вагон метро с НВ ТМ позволяет получить лучшие энергетические показатели по сравнению не только с ПВ ТМ, но и с АТМ. Энергетическая эффективность ВМ с АТМ существенно ниже, чем ВМ с НВ ТМ.

*Расчет срока окупаемости замены серийных ВМ 81-717/714 с ТМ ПТ поездами с АТМ за счёт улучшения их энергетических показателей*

Срок окупаемости поезда с АТМ в анализируемых условиях рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{\Delta Ц}{Цэ}, \text{ лет}, \quad (5)$$

**Таблица 1.** Тягово-энергетические показатели вагонов метро по расчетному режиму

Параметры	Серийный вагон 81-717.714 (с ПВ), расчетный режим	Серийный вагон 81-717.714 (с НВ), расчетный режим	Вагон 81-760.761 (с АТМ), расчетный режим
Общая длина участка, м	1700	1700	1700
Общее время движения, с	105,128	105,128	105,128
Средняя скорость движения, км/ч	58,215	58,215	58,215
Скорость начала торможения, км/ч	68	67	65
Скорость начала выбега, км/ч	79	79	84
Среднее ускорение при разгоне, м/с <sup>2</sup>	0,9072	0,9356	1,0013
Среднее замедление при торможении, м/с <sup>2</sup>	1,0939	1,1572	1,122
Расход энергии на преодоление основного сопротивления движению, кВт·ч	12,5057	12,4001	12,7028
Расход энергии на торможение (без рекуперативного торможения), кВт·ч	23,674	22,26	23,37
Расход энергии на торможение (с рекуперативным торможением), кВт·ч	—	8,902	8,857
Расход энергии на собственные нужды, кВт·ч	0,10844	0,10844	0,10844
Расход энергии в преобразователе, кВт·ч	—	—	0,169
Суммарный расход энергии (без рекуперативного торможения), кВт·ч	48,707	46,772	50,139
Удельный расход энергии (без рекуперативного торможения), Вт·ч/тыс. км	62,72	60,23	63,57
Возврат энергии при рекуперативном торможении, кВт·ч	—	17,008	17,855
Итоговый расход энергии, кВт·ч	48,707	29,764	32,284
Удельный расход энергии, Вт·ч/тыс. км	62,72	38,33	40,93

где  $\Delta C$  — разница стоимости между метропоездами с ТМ ПТ и с АТМ [7–9];

$C_э$  — экономия за счёт улучшения энергетических показателей.

По результату расчета  $T = 54$  (года). Оказалось, что эти сроки неприемлемы (более 50 лет), и поэтому применение поездов с АТМ даже взамен серийных с эксплуатируемой системой ТЭП с ТМ ПТ экономически ущербно.

### Выводы

Таким образом, приведенные в выполненном анализе результаты расчета и сведения испытаний подтверждают, что в вагонах

метрополитена Вьетнама целесообразно применять КТМ с дискретными тиристорными регуляторами сил тяги и торможения, а не АТМ, тем более, что ВМ с АТМ из-за их дороговизны имеют срок окупаемости очень долгий, что очевидно неприемлемо. При реализации на ВМ с КТМ простых и проверенных на опытных образцах технических решений по совершенствованию их ТЭП [10] они не будут уступать поездам с АТМ ни по одному показателю. При цене ориентировочно вдвое меньшей они будут существенно эффективнее.

### Список литературы

1. Нгуен Тхи Бих Ханг. Повышение эффективности функционирования пассажирских автобусных перевозок в крупнейших городах социалистической Республики Вьетнам: автореф. ... канд. техн. наук. М., 2005. 22 с.
2. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Обоснование и выбор системы тягового электропривода вагонов метрополитена // В мире научных открытий. 2015. № 7.8 (67). С. 3119–3130.

3. Тулупов В.Д., Ле Суан Хонг. Сравнительная технико-экономическая эффективность вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 3, Т. 11. С. 30–38.

4. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Сопоставление эффективности систем тягового электропривода электроподвижного состава // Электрооборудование, эксплуатация и ремонт. М., 2015. № 9. С. 43–48.

5. Тулулов В.Д., Ле Суан Хонг. Тягово-энергетический рейтинг вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 3. С. 70–79.

Мнацаканов В.А. Инновационный метропоезд «Нева». Тягово-энергетические испытания // Метро и тоннели. 2014. № 1. С. 30–34.

6. Наш транспорт (Моё метро): Интернет-ресурс. <http://forum.nashtransport.ru/index.php?showtopic=1818>.

7. Поставки вагонов в Московское метро в 2011 году: Интернет-ресурс. <http://metroblog.ru/post/3384>.

8. Ле Суан Хонг, Тулулов В.Д. Оценка экономической эффективности альтернативных систем тягового электропривода Хошиминского метрополитена // Труды X юбилейной Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых «Trans-Mech-Art-Chem». М.: МИИТ, 2014.

9. Тулулов В.Д., Ле Суан Хонг. Предлагаемая система тягового электропривода с наилучшими технико-экономическими показателями для вагонов метрополитена в крупных городах Социалистической Республики Вьетнам // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 4. С. 263–273.

### References

1. Nguen Thi Bih Hang. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija passazhirskih avtobusnyh perevozok v krupnejshih gorodah socialisticheskoj Respubliki V'etnam: avto-ref. ... kand. tehn. nauk. M., 2005. 22 s.

2. Le Suan Hong, Tulupov V.D. Obosnovanie i vybor sistemy t'jagovogo jelektroprivoda vagonov metropolitena // V mire nauchnyh otkrytij. 2015. № 7.8 (67). S. 3119–3130.

3. Tulupov V.D., Le Suan Hong. Sravnitel'naja tehniko-jekonomicheskaja jeffektivnost' vagonov metropolitena s al'ternativnymi sistemami t'jagovogo jelektroprivoda // Jelektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy. 2015. № 3, T. 11. S. 30–38.

4. Le Suan Hong, Tulupov V.D. Sopotavlenie jeffektivnosti sistem t'jagovogo jelektroprivoda jelektropodvizhnogo sostava // Jelektrooborudovanie, jekspluatacija i remont. M., 2015. № 9. S. 43–48.

5. Tulupov V.D., Le Suan Hong. T'jagovo-jenergeticheskij rejting vagonov metropolitena s al'ternativnymi sistemami t'jagovogo jelektroprivoda // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2016. № 3. S. 70–79.

6. Mnacakanov V.A. Innovacionnyj metro-poezd «Neva». T'jagovo-jenergeticheskie ispytanija // Metro i tonneli. 2014. № 1. S. 30–34.

7. Nash transport (Mojo metro): Internet-resurs. <http://forum.nashtransport.ru/index.php?showtopic=1818>.

8. Postavki vagonov v Moskovskoe metro v 2011 godu: Internet-resurs. <http://metroblog.ru/post/3384>.

9. Le Suan Hong, Tulupov V.D. Ocenka jekonomicheskoi jeffektivnosti al'ternativnyh sistem t'jagovogo jelektroprivoda Hoshiminskogo metropolitena // Trudy X jubilejnoj Mezhdunar. nauch.-pract. konf. studentov i molodyh uchenyh «Trans-Mech-Art-Chem». M.: MIIT, 2014.

10. Tulupov V.D., Le Suan Hong. Predlagaemaja sistema t'jagovogo jelektroprivoda s nailuchshimi tehniko-jekonomicheskimi pokazateljami dlja vagonov metropolitena v krupnyh gorodah Socialisticheskoj Respubliki V'etnam // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2017. № 4. S. 263–273.





**Шакирзянов А. А.**  
**Shakirzyanov A. A.**  
инженер службы  
неразрушающего контроля  
Инженерно-технического  
центра,  
ООО «Газпром трансгаз  
Уфа», г. Уфа,  
Российская Федерация



**Никитин О. Ф.**  
**Nikitin O. F.**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Гидравлика, гидромашины  
и гидропневмоавтоматика»,  
ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный  
технический университет  
им. Н.Э. Баумана», г. Москва,  
Российская Федерация



**Бакиев Т. А.**  
**Bakiev T. A.**  
доктор технических наук,  
начальник Инженерно-  
технического центра,  
ООО «Газпром трансгаз  
Уфа», г. Уфа,  
Российская Федерация

УДК 21.316.728-82

## **ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ПРУЖИННОГО РЕГУЛЯТОРА ПОДАЧИ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ В СОСТАВЕ ГИДРОПРИВОДА В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

Рассмотрены основные способы управления скоростью выходного звена объемного гидропривода в общем виде, с точки зрения энергосбережения выбран наиболее приемлемый из них. С помощью мощностных диаграмм обоснован выигрыш в КПД. В рамках статьи разработана конструкция двухпружинного регулятора потока постоянной мощности прямого действия, работающего в составе гидропривода с регулируемым насосом, рассмотрены варианты аппроксимации расходно-перепадной характеристики, обоснован наиболее приемлемый из них, отмечены конструктивные ограничения, затрудняющие осуществление наиболее точной аппроксимации. С учетом этих ограничений составлена математическая модель гидропривода с разработанным регулятором, получены зависимости скоростей выходного звена и перемещений поршня регулятора от повышения давления в полости нагнетания вследствие изменения нагрузки на выходное звено. Обеспечено быстроедействие и динамическая устойчивость переходных процессов, оценена приемлемость применения регуляторов данного типа в составе регулируемого гидропривода.

**Ключевые слова:** объемный гидропривод, энергоэффективность, регулятор подачи, постоянная мощность, аппроксимация нелинейной характеристики, пружина сжатия, математическая модель привода, повышение КПД.

## **THE PROSPECT OF APPLYING A SPRING-LOADED CONSTANT POWER FLOW REGULATOR AS PART OF A HYDRAULIC DRIVE IN ORDER TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY**

The main methods for controlling the speed of the output link of the positive-displacement hydraulic drive are considered, the most acceptable one is selected from the energy saving point of view. High efficiency is shown by power diagrams. The design of double-spring constant power flow regulator has been developed, options for approximating the flow-response characteristic are considered, the most acceptable one is proved, but the most accurate approximation is not performed because of constructive constraints. In view of these limitations, a mathematical model of

the hydraulic drive with the developed regulator was compiled, the dependences of the output link speeds and the movements of the regulator piston on the pressure change in the injection cavity due to the increase in the load on the output link were obtained. The speed and dynamic stability of the transient processes are ensured, and the acceptability of the use of regulators of this type in the hydraulic drive is estimated.

**Key words:** fluid power drive, energy efficiency, feed controller, constant power, approximation of non-linear characteristics, compression spring, mathematical drive model, efficiency improvement.

**Основная часть.** В настоящее время в гидравлической технике все более популярной тенденцией является максимизация эффективности работы устройств, то есть повышение коэффициента полезного действия [1, 2]. Растущие мировые цены на энергоносители делают все более актуальной проблему энергосбережения [3–5]. Применительно к гидроприводам энергосберегающие технологии позволяют также повысить надежность, упростить конструкцию (например уменьшить вместимость баков и исключить охладители рабочей жидкости), существенно увеличить срок службы рабочих жидкостей и уплотнений.

КПД гидроприводов напрямую зависит от уровня дроссельных потерь мощности

$$P_{ном} = \Delta p Q / 60, кВт \quad (1)$$

в гидроустройствах, через которые проходит поток рабочих жидкостей (РЖ) расходом  $Q$ , л/мин, при величине потерь давления в гидроустройствах  $\Delta p$ , МПа.

В современных гидроприводах применяются 3 варианта управления скоростью движения выходного звена: машинное, дроссельное и машинно-дроссельное. В первом варианте регулирование скорости перемещения выходного звена гидродвигателя осуществляется за счет изменения рабочих объемов насоса и гидромотора при соблюдении закона равенства величины подачи насоса в единицу времени

$$Q_n = V_{0нmax} U_n n_n \quad (2)$$

и расхода РЖ

$$Q_{зд} = V_{0змmax} U_{зм} n_{зм}, \quad (3)$$

получаемого гидродвигателем, то есть без преднамеренных потерь расхода РЖ (энергии), а именно:

$$Q_n = Q_{зд}. \quad (4)$$

В приведенных формулах  $V_{0max}$  — максимальный рабочий объем;  $Q$  — подача,

$U = 0...1$  — параметр регулирования рабочего объема и  $n$  — частота вращения вала соответственно насоса и гидромотора [3].

Во втором варианте изменение скорости движения гидродвигателя (гидроцилиндра или гидромотора) осуществляется путем дросселирования поступающего к гидродвигателю одной части расхода потока РЖ  $Q_{др}$  и слива другой части расхода потока РЖ через переливной гидроклапан  $Q_{кл}$  в гидробак:

$$Q_n = Q_{др} + Q_{кл}. \quad (5)$$

На рисунке 1 показана мощностная диаграмма гидропривода дроссельного управления [3], где можно видеть, что при необходимости преодоления нагрузки, соответствующей давлению  $p_A$ , со скоростью, определяемой расходом  $Q_A$ , насос обеспечивает подачу  $Q_n$  при давлении нагнетания

$$p_{нз} = p_{кл} = p_A + \Delta p_{др}. \quad (6)$$

Мощность, теряемая в насосе:

$$N_{ном.н} = (Q_0 - Q_n) p_{кл}. \quad (7)$$

Потери мощности на гидроклапане:

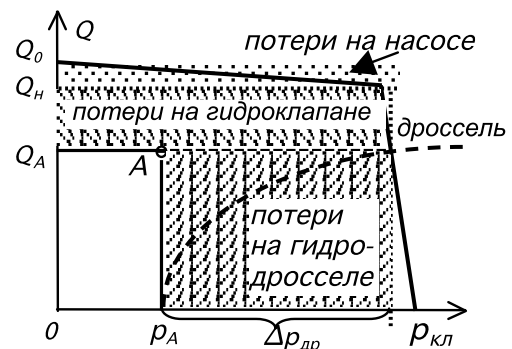
$$N_{ном.кл} = (Q_n - Q_A) (p_A + \Delta p_{др}). \quad (8)$$

На гидродросселе теряется энергия

$$N_{ном.др} = \Delta p_{др} Q_A \quad (9)$$

(заштрихованная область).

Отсюда полный КПД без учета механических потерь на насосе равен:



**Рисунок 1.** Мощностная диаграмма гидропривода с гидродросселем, установленным на входе гидравлического двигателя

$$\eta = p_A Q_A / p_{HA} Q_0. \quad (10)$$

С точки зрения энергосбережения дроссельное управление при таких больших потерях энергии на дросселе и гидроклапане наименее приемлемо. Однако его конструктивная простота (нерегулируемый насос, простой по конструкции гидродроссель) и высокое быстродействие в приводах сравнительно небольшой мощности (обычно до 3–5 кВт) во многих случаях являются решающими [4].

Поскольку для таких систем максимум отдаваемой мощности достигается при потере 1/3 подводимого давления на рабочих кромках золотника гидрораспределителя, их КПД не может быть выше 36 % [5].

В третьем варианте — гидропривод машинно-дроссельного управления — применяемый регулируемый насос работает совместно с гидродросселем (рисунок 2), на котором теряется часть энергии потока, потери энергии на гидроклапане сведены к минимуму.

Для работы гидравлического привода машинно-дроссельного управления используется регулирование подачи по давлению нагнетания, практически при постоянном давлении, т. е.  $p_{oi} - p_0 \rightarrow 0$ . Изменение подачи от  $Q_{ном}$  до  $\approx 0$  происходит в диапазоне нарастания давления с  $p_0$  до  $p_{01,02,03}$ . Угол наклона характеристики изменения подачи зависит от жесткости пружины — чем мягче пружина, тем меньше разность давлений ( $p_{oi} - p_0$ ) [3, 6, 7].

Схема механизма регулирования рабочего объема насоса (рисунок 2, б) включает в себя: орган регулирования рабочего объема, исполнительное устройство, состоящее из одноштокового гидроцилиндра и пружины, гидролинию с гидродросселем  $D_p$ , выполняющим роль демпфера.

Регулятор подачи начинает работать при достижении в напорной гидролинии некоторого уровня давления  $p_0$ , при котором

$$p_0 S_{шунт} = c_{np} z_0, \quad (11)$$

где  $S_{шунт}$  — площадь штоковой полости регулятора;  $c_{np}$  — жесткость пружины;  $z_0$  — предварительное поджатие пружины [3].

Поведение рабочей характеристики насосной установки при  $p_n > p_0$  описывается уравнением

$$Q_{HVi} = Q_{ном} [1 - A c_{np} (p_i - p_0)], \quad (12)$$

где  $Q_{ном}$  и  $p_0$  — параметры начала срабатывания регулятора подачи;  $A$  — множитель, учитывающий геометрические параметры регулятора подачи;  $c_{np}$  — жесткость пружины регулятора подачи;  $p_i$  — текущее давление,  $p_{oi} - p_0$  — диапазон изменения давления при регулировании подачи от  $Q_{ном}$  до  $Q = 0$  [8].

На рисунке 3 показана диаграмма работы гидропривода дроссельного управления с машинно-дроссельным регулированием подачи, из которой можно видеть, что при необходимости преодоления нагрузки, соответствующей давлению  $p_A$ , со скоростью, определяемой расходом  $Q_A$ , насос обеспе-

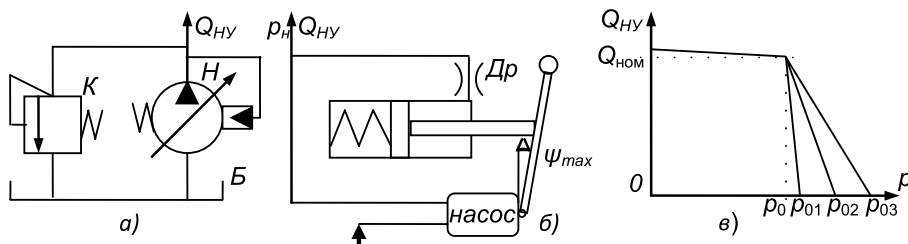


Рисунок 2. Схема насосной установки с регулированием подачи насоса по давлению (а), схема регулятора подачи (б) и рабочая характеристика насосной установки (в)



Рисунок 3. Мощностная диаграмма гидропривода с машинно-дроссельным регулированием подачи

чивает подачу  $Q_{нА}$  при давлении нагнетания  $p_{нзА}$ . На дросселе теряется энергия

$$N_{пот.др} = (p_{нзА} - p_A) Q_A. \quad (13)$$

(заштрихованная область). Полный КПД гидропривода без учета механических потерь на насосе равен:

$$\eta = p_A Q_A / p_{нзА} Q_{нА}. \quad (14)$$

Следует учитывать, что в этом случае давление  $p_{нз}$  на выходе насоса поддерживается постоянным не за счет слива части потока рабочей жидкости, подаваемого насосом, а за счет уменьшения рабочего объема регулируемого насоса, то есть за счет уменьшения величины его подачи. В результате при прочих равных условиях КПД гидропривода с машинно-дроссельным регулированием подачи насоса получается выше, чем у гидропривода с нерегулируемым насосом и дроссельным управлением. Однако следует помнить, что регулируемый нереверсивный насос несколько дороже нерегулируемого.

Выбор вида характеристики регулирования подачи насоса позволяет повысить рабочие параметры насоса и гидропривода. Применение характеристики, называемой «характеристика постоянной мощности»

$$N = pQ = \text{const}, \quad (15)$$

позволяет увеличить диапазон изменения давления при регулировании подачи от  $Q_{ном}$  до  $Q=0$  до 2 раз, то есть отношение  $p_{oi} / p_0$  стремится к 2. Такая схема обеспечивает наиболее полное восприятие гидроприводом располагаемой мощности на гидрофицированном механизме (машине). Теоретически мощности, определяемые площадями  $\theta Q_n K p_L$  и  $\theta Q_n A M p_M$ , равны между собой, а располагаемое гидроприводом давление  $p_M \gg p_L = p_{нзА}$ .

Потери на гидродросселе отсутствуют, а значит КПД при корректной настройке регулятора определяется лишь механическими потерями насосной установки. Показанная пунктиром на рисунке 3 такая расходно-перепадная характеристика является гиперболой, так как из (15)  $p = N/Q$ , причем значение мощности  $N$  есть величина постоянная.

Регулятор, обеспечивающий такое поведение характеристики постоянной мощности, выполняется, как правило, электрическими или электрогидравлическими устройствами,

требующими дополнительный подвод энергии. Выполнить регулятор прямого действия, использующий механическую энергию потока РЖ, представляется возможным при аппроксимации данной характеристики двумя прямыми, соответствующими работе двух пружин [8].

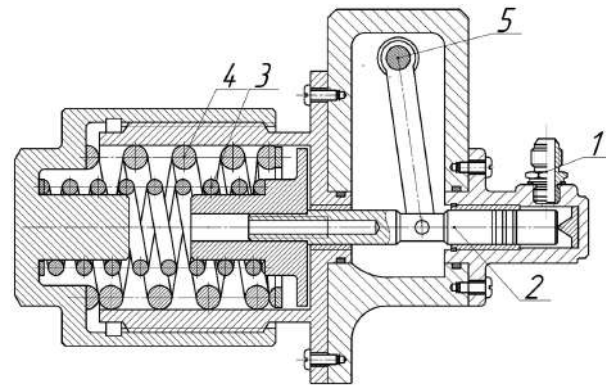
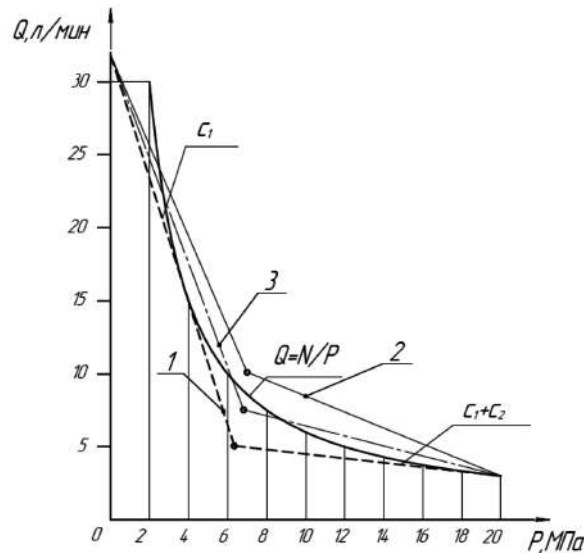


Рисунок 4. Конструкция регулятора мощности прямого действия

Принцип действия пружинного регулятора (рисунок 4) заключается в следующем: сила давления рабочей жидкости, подающейся в регулятор через штуцер 1, перемещает поршень 2 влево, тем самым сжимая пружину 3. Перемещаясь, поршень 2 проворачивает вал регулятора 5, который, будучи жестко связанным с регулирующим органом насоса (наклонным диском), изменяет рабочий объем, и, как следствие, подача насоса уменьшается пропорционально увеличению давления в полости нагнетания, обеспечивая постоянство потребляемой насосной установкой мощности.

Аппроксимация рабочей характеристики регулятора подачи РЖ «постоянной мощности» показана на рисунке 5.

Существует множество способов непрерывной аппроксимации с различными критериями оценки качества полученных результатов, суть которых сводится к минимизации отклонений аппроксимирующей функции от аппроксимируемой. Однако, как увидим далее, не менее важным требованием качества аппроксимации являются конструктивные особенности реализации рассчитываемых прямых. Таким образом, наиболее оптимальная характеристика выбирается не только математически, но и исходя из конструктивных соображений.



1 — аппроксимация кривой с помощью построения касательных;  
 2 — характеристика, полученная в рамках данной работы; 3 — желаемая оптимальная характеристика;  
 $C_1, C_2$  — жесткости пружин № 3 и № 4 соответственно

**Рисунок 5.** Рабочая характеристика регулятора подачи насоса

Рассмотрим 1-й способ аппроксимации с помощью построения касательных. Из крайней левой точки, соответствующей  $p = 0$  МПа  $Q = 32$  л/мин, проведем касательную к гиперболе, координаты точки касания найдены графически. Вторую касательную проводим через точку  $p = 20$  МПа  $Q = 3$  л/мин, соответствующую максимальному давлению. Точка пересечения двух кривых будет определять координату вступления в работу второй пружины, то есть момент перехода от первой касательной ко второй.

Уравнение касательной в общем виде имеет вид:

$$y(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0), \quad (16)$$

где производная функции в точке имеет геометрический смысл угла наклона касательной. В координатах  $Q(p)$  уравнения прямых будут иметь вид:

$$Q_1(p) = f(p_{\min}) + f'(p_{\min})(p - p_{\min}), \quad (17)$$

$$Q_2(p) = f(p_{\max}) + f'(p_{\max})(p - p_{\max}). \quad (18)$$

Учитывая равенство произведения давления и расхода, имеем:

$$f'(p) = \frac{dQ}{dp} = \frac{d\frac{N}{p}}{dp} = -\frac{N}{p^2}, \quad (19)$$

$$Q_1(p) = Q_{\max} - \frac{N}{2p_{\min}}(p - p_{\min}), \quad (20)$$

$$Q_2(p) = Q_{\min} - \frac{N}{2p_{\max}}(p - p_{\max}), \quad (21)$$

где  $(p_{\min}; Q_{\max})$  и  $(p_{\max}; Q_{\min})$  — соответствующие координаты точек касания прямой и гиперболы. Приравняв друг к другу правые части уравнений (20) и (21), найдем величины давления, а затем и расхода, при которых в работу вступит вторая пружина:

$$p^* = 6,34 \text{ МПа}; Q^* = 5,05 \text{ л/мин.}$$

Расход насоса связан с перемещением поршня регулятора соотношением:

$$Q = V_0 n \frac{y_{\max} - y}{y_{\max}}, \quad (22)$$

где  $y$  — перемещение поршня регулятора, изначально регулятор настроен на максимальный расход.

$$y_{\max} = R \operatorname{tg}(\gamma) = 50 \text{ мм} \cdot \operatorname{tg}(16^\circ) = 14,3 \text{ мм}, \quad (23)$$

где  $\gamma$  — угол наклона люльки насоса;  $R$  — расстояние между осями вала люльки насоса и поршня регулятора.

С учетом (23) найдем перемещение поршня регулятора, при котором в работу вступит вторая пружина:

$$y^* = y_{\max} - y_{\max} \cdot \frac{Q^*}{Q(0)} = 14,3 - 14,3 \cdot \left(\frac{5,05}{32}\right) = 12,043 \text{ мм} \approx 12 \text{ мм}. \quad (24)$$

Максимальное усилие, воспринимаемое пружинами:

$$P_{\max} = p_{\max} \cdot F_y = 20 \text{ МПа} \cdot 63,59 \text{ мм}^2 = 1272 \text{ Н}. \quad (25)$$

Усилие в момент переключения:

$$P_{\text{перекл}} = p^* \cdot F_y = 6,34 \text{ МПа} \cdot 63,59 \text{ мм}^2 = 403 \text{ Н}. \quad (26)$$

При данном способе аппроксимации получены следующие жесткости пружин:

$$c_1 = \frac{P_{\text{перекл}}}{y^*} = \frac{403 \text{ Н}}{12 \text{ мм}} = 33583 \text{ Н/м}, \quad (27)$$

$$c_2 = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{перекл}}}{y_{\text{max}} - y^*} = \frac{1272 \text{ Н} - 403 \text{ Н}}{14 \text{ мм} - 12 \text{ мм}} = 434500 \text{ Н/м}. \quad (28)$$

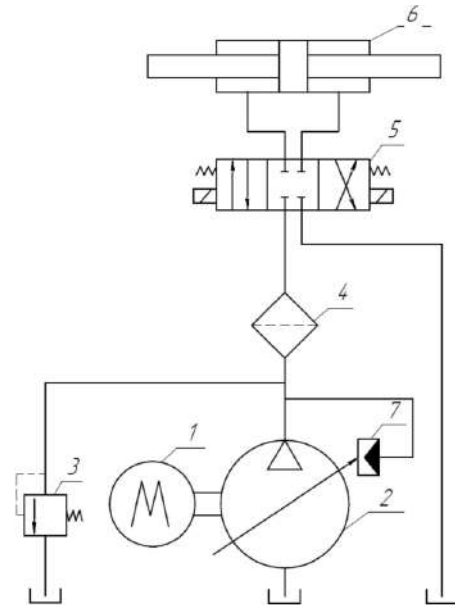
Однако при подборе пружин сжатия, соответствующих ГОСТ 18793-80 [9], оказалось, что данный способ аппроксимации неизбежно приведет к резкому росту габаритных размеров регулятора за счет большой жесткости второй пружины.

Второй способ аппроксимации (характеристика № 3 на рисунке 5) получен с помощью математической модели привода, реализованной в среде MatLabSimulink, путем варьирования параметров жесткостей пружин 3 и 4 (рисунок 4) и перемещения поршня в момент переключения  $y^*$ . Однако параметры пружин, соответствующие ГОСТ 18793-80 [9], а также геометрические ограничения не позволяют осуществить данный способ аппроксимации в чистом виде.

Наиболее приближенная к ней характеристика, удовлетворяющая ГОСТ 18793-80 [9] с пружинами сжатия № 1086-0911 и № 1086-1078,

имеющими жесткость 45328 и 213219 Н/м соответственно, обозначена № 2 (рисунок 5). Перемещение поршня регулятора в момент переключения, при котором в работу вступает пружина 4 (рисунок 4):  $y^* = 9,7 \text{ мм}$ .

После выбора способа аппроксимации и размеров пружин проведена проверка влияния выбранных пружин на динамику при работе гидропривода, изображенного на рисунке 6.



1 — электродвигатель; 2 — регулируемый аксиально-поршневой насос (с наклонным диском); 3 — предохранительный клапан; 4 — фильтр; 5 — направляющий распределитель; 6 — исполнительный гидродвигатель — гидроцилиндр

Рисунок 6. Гидравлическая схема привода

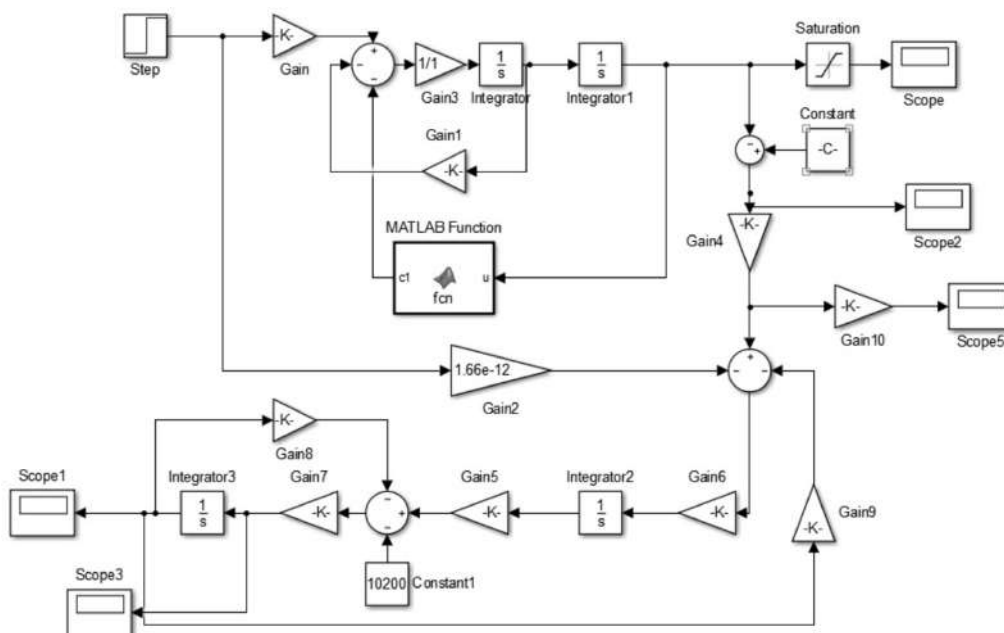


Рисунок 7. Структурная схема привода

Как видно из рисунка 6, давление  $p_n$  в полости нагнетания насоса связано с нагрузкой  $R$  на поршень гидроцилиндра 6 соотношением

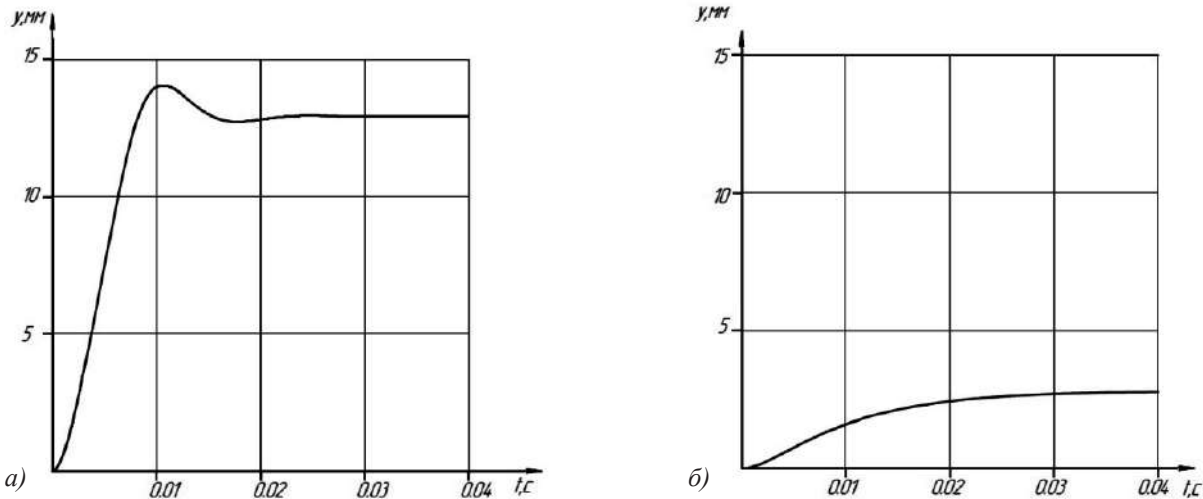
$$p_n = R/F_n, \quad (29)$$

где  $F_n$  – рабочая площадь гидроцилиндра. Поэтому для оценки влияния выбранных пружин на динамику работы гидропривода в среде MatLabSimulink были получены графики переходных процессов положения поршня регулятора (рисунок 7, Score) и скорости выходного звена при изменении давления в полости нагнетания (рисунок 7, Score 3):

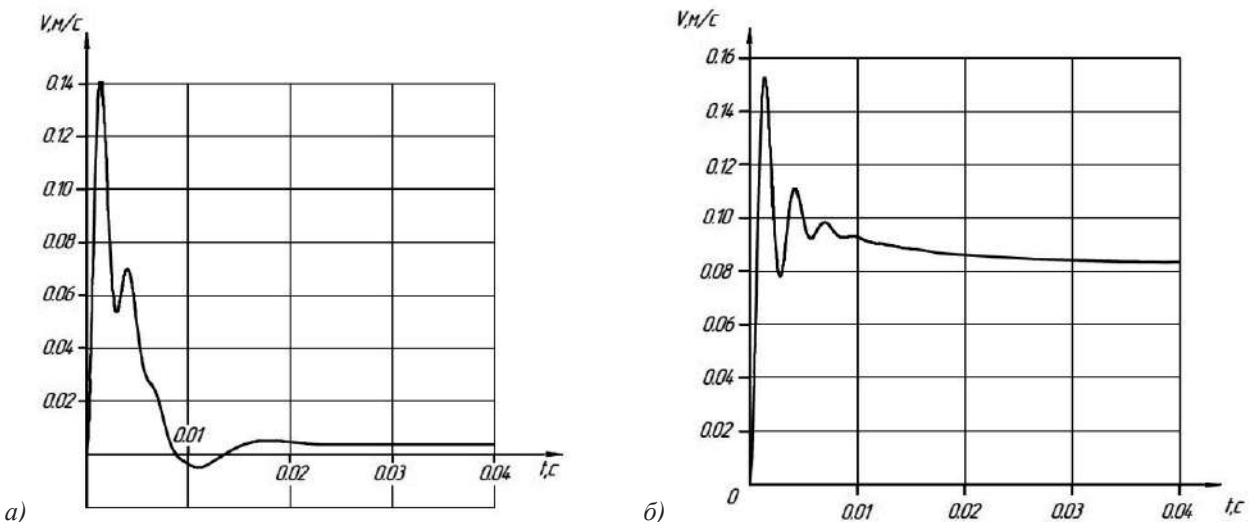
Как видно из рисунков 8 и 9, полученные переходные процессы являются устойчи-

выми, а их продолжительность составляет 0,04 с.

**Выводы.** Получены зависимости скоростей выходного звена и перемещений поршня регулятора от изменения давления в полости нагнетания вследствие увеличения нагрузки на выходное звено. Обеспечены быстродействие и динамическая устойчивость переходных процессов, подтверждена работоспособность регулятора подачи. Обоснован выигрыш в КПД за счет отсутствия потерь мощности на гидродросселе и гидроклапане. За счет простоты конструкции с учетом вышесказанного применение данного регулятора в составе гидропривода приемлемо.



**Рисунок 8.** Отклики перемещения поршня регулятора при мгновенном изменении давления в полости нагнетания с 0 до 2 МПа (а) и с 0 до 20 МПа (б) соответственно



**Рисунок 9.** Отклики изменения скоростей выходного звена при мгновенном увеличении давления в полости нагнетания с 0 до 2 МПа (а) и с 0 до 20 МПа (б) соответственно

**Список литературы**

1. ГОСТ 17398-72. Насосы. Термины и определения. М., 1972. 36 с.
2. ГОСТ 17752-81. Объемный гидропривод и пневмопривод. Основные термины и определения. М., 1981. 72 с.
3. Никитин О.Ф. Гидравлика и гидропневмопривод: учеб пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 430 с.
4. Свешников В.К. Новое в мире гидравлики // Конструктор. Машиностроитель. 2016. № 1. С. 27–31.
5. Свешников В.К. Гидравлика совершенствуется // РИТМ. Машиностроитель. 2016. № 3. С. 40–44.
6. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов. 4-е изд., стер. М.: Альянс, 2010. 423 с.
7. Никитин О.Ф. Надежность, диагностика и эксплуатация гидропривода мобильных объектов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 312 с.
8. Васильченко В.А. Гидравлическое оборудование мобильных машин. М.: Машиностроение, 1983. 301 с.
9. ГОСТ 18793-80. Пружины сжатия. Конструкция и размеры. М., 1980. С. 240–318.

**References**

1. GOST 17398-72. Nasosy. Terminy i opredeleniya. M. 1972. 36 s.
2. GOST 17752-81. Ob'emniy gidroprivod i pnevmoprivod. Osnovniye terminy i opredeleniya. M., 1981. 72 s.
3. Nikitin O.F. Gidravlika i gidropnevmoprivod: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2012. 430 s.
4. Sveshnikov V.K. Novoe v mire gidravliki // Konstruktor. Mashinostroitel'. 2016. № 1. S. 27–31.
5. Sveshnikov V.K. Gidravlika sovershenstvuetsya // RITM. Mashinostroitel'. 2016. № 3. S. 40–44.
6. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. Gidravlika, gidromashini i gidroprivodi: uchebnik dlya mashinostroitel'nykh vuzov. 4-e izd., ster. M.: Alyans, 2010. 423 s.
7. Nikitin O.F. Nadezhnost', diagnostika i ekspluatatsia gidroprivoda mobilnykh ob'ektov: ucheb. posobie. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2007. 312 s.
8. Vasilchenko V.A. Gidravlichesкое oborudovanie mobilnykh mashin. M.: Mashinostroenie, 1983. 301 s.
9. GOST 18793-80. Pruzhini szhatiya. Konstruktsia razmeriy. M., 1980. S. 240–318.





**Гвоздев В. Е.**  
**Gvozdev V. E.**

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



**Абдрафиков М. А.**  
**Abdrafikov M. A.**

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



**Блинова Д. В.**  
**Blianova D. V.**

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



**Кириллов К. В.**  
**Kirillov K. V.**

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

УДК 621.82

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НА ОЦЕНКУ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА СТАДИИ СОПРОВОЖДЕНИЯ**

Работа посвящена проблеме влияния учета типов дефектов на оценку показателей качества программно-аппаратных комплексов (ПАК) на стадии сопровождения. Отмечается, что непрерывно увеличивается значение ПАК в современных технических системах, которое уже достигает ключевого, системообразующего уровня. Подчеркивается, что дефекты в программной и аппаратной компоненте имеют разную природу и характер проявления: дефекты в аппаратной компоненте обусловлены протеканием физических и химических процессов, дефекты в программной составляющей, в свою очередь, обусловлены проектными ошибками, имеют систематический характер, а случайность их проявления объясняется случайным сочетанием свойств исходных данных и параметров. Приводится краткий обзор существующих подходов к обеспечению надежности и безопасности ПАК. Целью работы является определение случаев, в которых владение знаниями о дефектах, и, в пер-

вую очередь, об их типах, способствует повышению надежности ПАК на стадии сопровождения. В качестве показателя качества ПАК использовалась интегральная характеристика надежности — среднее значение коэффициента готовности. Приведены результаты вычислительного эксперимента, с помощью которого определялась степень соответствия теоретическому значению коэффициента готовности оценок данного показателя для моделируемых ситуаций: когда производится учет типа дефектов и без учета такового. В качестве статистических характеристик экспериментальных значений коэффициента готовности использовались оценки математических ожиданий и среднеквадратических отклонений. Степень соответствия оценивалась с помощью таких показателей, как абсолютное отклонение математических ожиданий значений коэффициента готовности и относительная погрешность. Отмечено, что отказы и сбои аппаратной и программной компонент ПАК являются их неотъемлемыми свойствами на стадии сопровождения. Но, тем не менее, знание дефектов способствует увеличению надежности ПАК на стадии сопровождения в случае, когда такие знания обеспечивают устранение дефектов с большей интенсивностью по сравнению с интенсивностью их возникновения.

**Ключевые слова:** безопасность, надежность, программно-аппаратный комплекс, сопровождение, коэффициент готовности, статистические характеристики, дефект.

## ANALYSIS OF DIFFERENT DEFECT TYPES INFLUENCE ON QUALITY INDICATORS ASSESSMENT OF HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEXES AT THE MAINTENANCE STAGE

This paper is devoted to the problem of considering the influence of defect types on quality indicators assessment of software and hardware complexes (SHC) at the maintenance stage. There has been noted that the SHC role in modern technical systems is continuously increasing, which already reaches a key backbone level. It has been emphasized that defects in the software and hardware component are of different nature and manifestation mode: defects in the hardware component are caused by physical and chemical processes while defects in the software component are stipulated by design errors, have a systematic nature, and the randomness of their manifestation is explained by a random combination of the original data and parameters properties. There has been presented a brief review of existing approaches to ensuring the SHC reliability and safety. This research is aimed to determine the cases in which knowledge of the defects, and, first of all, of their types, contributes to increasing reliability of the SHC at the maintenance stage. The integral reliability characteristic – the average availability value has been used as the SHC quality factor. The simulation experiment results used for calculation of the degree of conformity to the theoretical availability value of this factor assessment have been presented for situations simulated: when considering the type of defects and without accounting for it. The mathematical expectations and mean square deviations assessments have been implemented as statistical characteristics of the experimental availability values. The degree of conformity has been estimated using indicators such as the absolute deviation of the availability mathematical expectation values and the relative accuracy. It has been mentioned that failures and errors of the SHC hardware and software components are their integral features at the maintenance stage. Nevertheless, the knowledge of defects promotes a growth of the SHC reliability at the maintenance stage in the case when such knowledge ensures higher intensity defects elimination in comparison with their occurrence intensity.

**Keywords:** security, reliability, software and hardware complex, maintenance, availability index, static characteristics, defect.

**Введение.** В последнее время непрерывно возрастает роль программно-аппаратных комплексов (ПАК) в информационном обеспечении управления сложными техническими системами. Программно-аппаратные комплексы перестают играть вспомогательную, второстепенную роль, их важность все более возрастает и достигает системообразу-

ющего уровня в современных технических системах [1]. В настоящее время программно-аппаратные комплексы рассматриваются как целостное образование аппаратной и программной компонент [2]. Это обуславливает важность проблемы развития теоретических основ и инструментальных средств управления качеством программно-аппаратных ком-

плексов, важной составляющей которой являются теоретические основы анализа безопасности и надежности программных и аппаратных компонент на разных стадиях жизненного цикла [3].

В известной литературе анализируются различия в процессах возникновения дефектов в аппаратной и программной компонентах ПАК на стадии сопровождения: дефекты в аппаратной компоненте обусловлены физико-химическими процессами, и случайность их проявления обусловлена случайным характером выхода характеристических параметров элементов за допустимые границы [4, 5]. Дефекты в программной компоненте обусловлены ошибками проектирования, имеют систематический характер, и случайность их проявления обусловлена случайным сочетанием свойств исходных данных [6, 7].

Сложившаяся практика оценивания надежности ПАК на основе среднего значения коэффициента готовности [6, 8] не учитывает различную природу дефектов в программной и аппаратной составляющих; особенности локализации местоположения дефектов и их устранения существенно различаются.

Цель настоящей работы — оценить, в каком случае владение знаниями о типах дефектов способствует повышению надежности на стадии сопровождения.

### *1. Краткий анализ подходов к обеспечению надежности и безопасности ПАК*

Вопросам анализа надежности и безопасности аппаратной составляющей ПАК посвящены многие работы, ограниченный объем статьи позволяет сделать ссылки лишь на некоторые из них. В настоящем разделе кратко обозначены подходы к анализу надежности программной компоненты ПАК.

Проведенный анализ литературных источников позволяет выделить следующие сформировавшиеся к настоящему времени направления исследований в рамках проблемы управления дефектами программной компоненты ПАК:

— методы тестирования (модулей, сопряжений, стрессового, защитного, системного и т. д.), верификации и валидации. Этим вопросам посвящено значительное число

публикаций, руководств и стандартов [ESA PSS-05-10], [IEEE Std 1012-2004] и др.;

— теоретические и методические основы анализа надежности и безопасности программных компонент различного масштаба и сложности [1, 6, 8, 9] и др.;

— теоретические основы и инструментальные средства разработки систем, устойчивых к ошибкам [10] и др.;

— теоретические основы, руководства и инструментальные средства поддержки принятия решений на стадии проектирования по критериям надежности и безопасности [11] и др.;

— методологические, методические, модельные основы нового научного направления дефектологии программного обеспечения [7, 9, 12, 13].

Анализ литературных источников позволяет сделать заключение о том, что, во-первых, задача управления надежностью и безопасностью ПАК в настоящее время относится к числу приоритетных задач научных исследований [14]. Во-вторых, управление дефектами является центральной задачей управления надежностью и безопасностью [15]. Разноплановый характер работ, связанных с задачами управления дефектами, подтверждает обоснованность положения о том, что дефекты следует рассматривать как разновидность сложных систем. В-третьих, следует признать, что к настоящему времени не создан целостный научно-обоснованный подход к управлению дефектами ПАК. Основанием к такому заявлению служат, например, отчеты Standish Group, из которых следует, что несмотря на революционное развитие инструментальных средств детального проектирования, а также аппаратных компонент ПАК, эффективность реализации проектов создания и применения сложных программно-аппаратных комплексов практически не изменилась.

### *2. Постановка задачи*

В процессе функционирования ПАК происходят нежелательные события (НС): отказы и сбои, обусловленные дефектами в аппаратной и программной компонентах.

По результатам эксплуатации было установлено, что в течение определенного периода времени  $T$  фиксированной длины при

реализации отдельных функций ПАК наблюдается  $N$  нежелательных событий ПАК, причем  $N$  лежит в диапазоне от  $N^{(H)}$  до  $N^{(B)}$ , т. е.  $N \in [N^{(H)}, N^{(B)}]$ . По результатам тех же наблюдений установлено, что в течение  $T$  в среднем  $N_j$  нежелательных событий обусловлено дефектами  $j$ -го типа.

Интервалы времени между моментами фиксации нежелательных событий  $\tau_i^{(j)}$  ( $i = \overline{1; N_j}$ ,  $j = \overline{1; M}$ ), а также затраты времени на локализацию и устранение причин НС  $\gamma_i^{(j)}$  в течение  $T$  являются независимыми случайными величинами. В приведенных обозначениях  $j$  — признак типа дефекта,  $N_j$  — число зарегистрированных НС  $j$ -го типа. Постулируется, что потоки событий, связанные с фиксацией НС, локализацией и устранением непосредственной причины НС, являются простейшими. Графическая модель потока НС, локализации и устранения дефектов представлена на рисунке 1.

Случайным величинам  $\tau_i^{(j)}$  и  $\gamma_i^{(j)}$  ставятся в соответствие законы распределения непрерывных величин:

$$\begin{aligned} F(t) &= \sum_{j=1}^M \alpha_j F_j(t), \\ \Phi(t) &= \sum_{j=1}^M \alpha_j \Phi_j(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\alpha_j$  — доля НС, обусловленных дефектами  $j$ -го типа в общем числе  $N = \sum_{j=1}^M N_j$  зарегистрированных НС;  $F_j(t)$  — закон распределения наработки между НС, обусловленными дефектами  $j$ -го типа;  $\Phi_j(t)$  — закон распределения времени локализации и устранения дефекта  $j$ -го типа;  $M$  — число типов дефектов.

В качестве показателя интегральной характеристики надежности ПАК выступает среднее значение коэффициента готовности [6]:

$$K_G = \frac{\overline{T_H}}{\overline{T_H} + \overline{T_B}}, \quad (2)$$

где  $\overline{T_H}$  — средняя наработка между НС;  $\overline{T_B}$  — среднее время локализации и устранения дефекта  $j$ -го типа.

С учетом (1) теоретическое значение коэффициента готовности определяется соотношением:

$$K_G^{(T)} = \frac{\sum_{j=1}^M \alpha_j M_j[\tau]}{\sum_{j=1}^M \alpha_j M_j[\tau] + \sum_{j=1}^M \alpha_j M_j[\gamma]}, \quad (3)$$

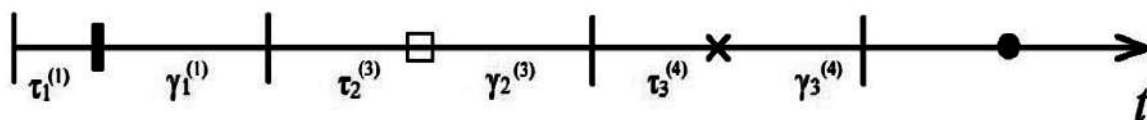
где  $M_j[\tau]$  — математическое ожидание наработки между НС  $j$ -го типа;  $M_j[\gamma]$  — математическое ожидание времени устранения дефекта  $j$ -го типа.

Оценка коэффициента готовности по выборочным данным с учетом типов дефектов определяется соотношением

$$K_G^{(M)} = \frac{\sum_{j=1}^M \alpha_j \overline{\tau_j}}{\sum_{j=1}^M \alpha_j \overline{\tau_j} + \sum_{j=1}^M \alpha_j \overline{\gamma_j}}, \quad (4)$$

где  $\overline{\tau_j} = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} \tau_i^{(j)}}{N_j}$  — оценка средней наработки между НС  $j$ -го типа,

$\overline{\gamma_j} = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} \gamma_i^{(j)}}{N_j}$  — оценка среднего времени локализации и устранения дефекта  $j$ -го типа.



- | Моменты начала исправной работы
- □ × ● Моменты проявления дефектов  $j$ -го типа
- $\tau_i$  Интервалы времени исправной работы до проявления дефекта
- $\gamma_i$  Интервалы времени локализации и устранения дефекта (время вынужденного простоя)

Рисунок 1. Графическая модель рассматриваемой задачи

Оценка коэффициента готовности без учета типов дефектов определяется соотношением (2), где

$$\bar{T}_H = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N},$$

$$\bar{T}_B = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_i}{N},$$

здесь  $N$  — общее число зарегистрированных дефектов.

Требуется определить, насколько различаются статистические оценки в случае, когда среднее значение коэффициента готовности определяется выражением (4) либо (2).

Предполагается, что проявление любого дефекта приводит к полной потере возможности реализации отдельной функции ПАК.

### 3. Решение задачи

Для решения задачи был проведен вычислительный эксперимент, схема которого представлена на рисунке 2.

В ходе эксперимента  $M$  принималось равным четырем. Коэффициенты  $\alpha_j, (j = \overline{1;M})$  принимали значения:  $\alpha_1 = 0.7$ ;  $\alpha_2 = 0.15$ ;  $\alpha_3 = 0.1$ ;  $\alpha_4 = 0.05$ . Значения  $N^{(H)}$  и  $N^{(B)}$  задавались равными  $0,8N$  и  $1,2N$  соответственно, где  $N$  — среднее количество зарегистрированных в системе дефектов (заданная величина, принималась равной 100). Значение  $Q$  принималось равным 104.

Выборочные значения  $\tau_i^{(j)}, \gamma_i^{(j)}$  формировались методом обратных преобразований [16]:

$$\tau_i^{(j)} = F_j^{-1}(Z_i),$$

$$\gamma_i^{(j)} = \Phi_j^{-1}(Z_i),$$

где  $Z_i$  — значения равномерно распределенной случайной величины  $Z_i \in [0;1]$ .

В качестве статистических характеристик оценок  $K_G^{(j)}, K_G$  использовались:

—  $M[K_G^{(j)}], M[K_G]$  — оценки математических ожиданий  $K_G^{(j)}, K_G$  соответственно;

—  $\sigma[K_G^{(j)}], \sigma[K_G]$  — оценки среднеквадратических отклонений  $K_G^{(j)}, K_G$  соответственно.

Степень соответствия статистических оценок  $K_G^{(j)}, K_G$  определялась посредством показателей:

—  $\delta_{abs}$  — значения абсолютных отклонений оценок математических ожиданий  $M[K_G^{(j)}], M[K_G]$  от  $K_G^{(T)}$ ;

—  $\delta_{отн}$  — относительная погрешность, определяемая как  $\frac{\delta_{abs}}{K_G^{(T)}} \cdot 100\%$ .

В ходе эксперимента параметры  $\lambda_j, \mu_j$  законов распределения  $F_j(t), \Phi_j(t)$  соответственно подбирались таким образом, чтобы исследовать три ситуации:

а) интенсивность локализации и устранения НС превосходит либо совпадает с интенсивностью возникновения НС;

б) интенсивность локализации и устранения НС меньше, чем интенсивность возникновения НС;

в) интенсивность устранения часто возникающих НС превосходит либо совпадает с

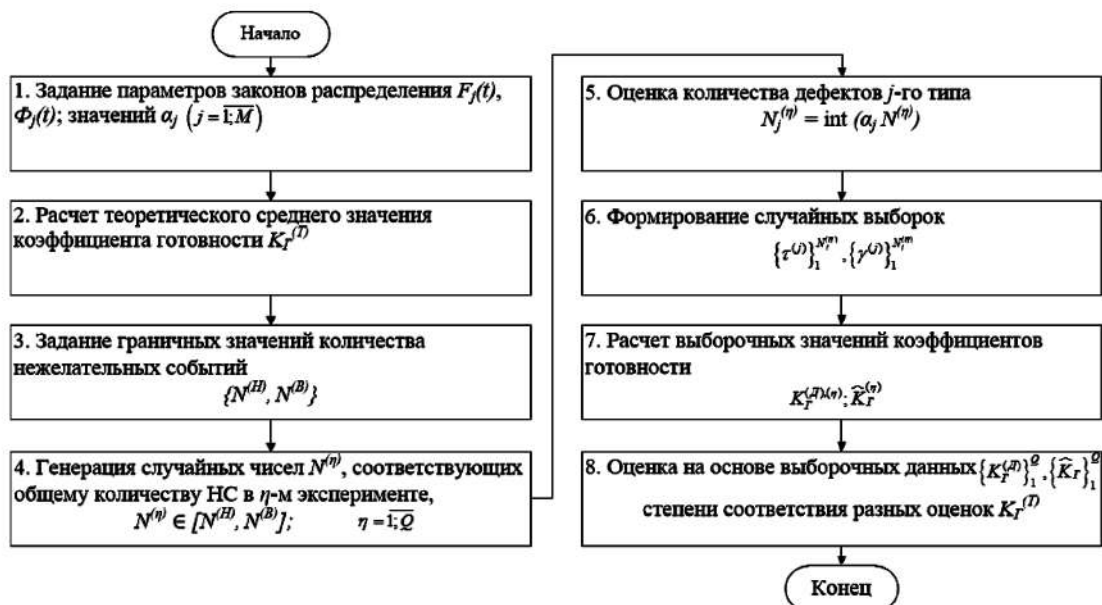


Рисунок 2. Схема вычислительного эксперимента

интенсивностью НС. Интенсивность устранения редко возникающих НС ниже, чем интенсивность их возникновения.

#### 4. Обсуждение результатов эксперимента

В таблицах 1 и 2 приведены некоторые из результатов, полученных в ходе проведения экспериментов.

Строки 1 и 2 таблицы соответствуют ситуации а); строки 3 и 4 — ситуации б); строки 5 и 6 — ситуации в).

В таблице 2 приведены результаты, соответствующие использованию выражений (2) и (4) для каждой из ситуаций.

Результаты эксперимента позволяют заключить, что владение знаниями о типах дефектов способствует повышению надежности на стадии сопровождения лишь в случае, когда такие знания обеспечивают устранение дефектов с большей интенсивностью, нежели их возникновение. При этом важно, чтобы быстро парировались проявления дефектов всех типов, а не только часто возникающих. Эффект от знания типов дефектов тем выше, чем больше скорость устранения дефектов по сравнению со скоростью возникновения НС, обусловленных дефектами.

#### Выводы

Отказы и сбои в аппаратной и программной компонентах являются неотъемлемыми свойствами ПАК на стадии сопровождения.

Это обусловлено, во-первых, деградацией свойств аппаратной компоненты в процессе эксплуатации. Во-вторых, невозможностью исчерпывающего испытания программной составляющей в процессе разработки. В-третьих, возможностью отклонения условий эксплуатации от тех, которые определены в техническом задании на разработку.

Качество функционирования ПАК определяется не только количеством дефектов (косвенной характеристикой чего является интенсивность возникновения НС), но и способностью обслуживающего персонала оперативно реагировать на нежелательные события. Это обуславливает значимость научных и прикладных задач, связанных с изучением условий возникновения НС (построением моделей среды использования ПАК); созданием и обеспечением функционирования систем сбора, систематизации, анализа данных о НС, симптомах их проявлений и причинах возникновения; совершенствованием методического, нормативного и инструментального обеспечения установления факта НС, локализации местоположения дефектов, повышения квалификации обслуживающего персонала.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00442.*

**Таблица 1.** Значения исходных параметров в вычислительных экспериментах

Номер эксперимента	Значения $\lambda_i$				Значения $\mu_i$			
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$
1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$
2	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$
3	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
4	$10^0$	$10^0$	$10^0$	$10^0$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
5	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
6	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$

**Таблица 2.** Результаты вычислительного эксперимента

Номер эксперимента	$K_G^{(T)}$	Статистические характеристики значения коэффициента готовности							
		без учета типов дефектов				с учетом типов дефектов			
		$M[K_G]$	$\sigma[K_G]$	$\delta_{abc}$	$\delta_{omn}$ %	$M[K_G^{(D)}]$	$\sigma[K_G^{(D)}]$	$\delta_{abc}$	$\delta_{omn}$ %
1	0,909	0,921	0,052	0,012	1,27	0,904	0,033	0,005	0,53
2	0,500	0,500	0,165	0,003	0,62	0,498	0,092	0,002	0,33
3	0,091	0,080	0,053	0,011	11,92	0,096	0,034	0,005	5,96
4	$1,6 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$	80,25	0,001	$5,2 \times 10^{-4}$	0,001	741
5	0,460	0,480	0,175	0,020	4,45	0,421	0,128	0,039	8,48
6	0,001	$8,7 \times 10^{-4}$	$7,6 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-4}$	28,47	0,002	0,001	$7,9 \times 10^{-4}$	64,71

### Список литературы

1. Мостовой А.Я. Управление сложными техническими системами: конструирование программного обеспечения спутников ДЗЗ: монография. М.: Техносфера, 2016. 352 с.
2. Гузаиров М.Б., Гвоздев В.Е., Ильясов Б.Г. и др. Элементы системной инженерии: методологические основы разработки программных систем на основе V-модели жизненного цикла. М.: Машиностроение, 2013. 180 с.
3. Гвоздев В.Е., Костюкова А.П., Кириллов К.В. Статистическое оценивание показателей надежности систем обработки данных и управления по неполным сведениям о выборочных данных // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 4, Т. 12. С. 73–78.
4. Gvozdev V.E., Morozov A., Kirillov K.V., Subhangulova A.S. Effect of different defect types on static parameters of reliability assessment // CSIT'2016. Proceedings of the 18th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. 2016. P. 57–61.
5. Кириллов К.В. Оценивание показателей состояния аппаратно-программных комплексов при переменном объеме выборочных данных [Электронный ресурс] // Тр. Пятой Междунар. науч. конф., Банное, Россия, 24-28 февр. 2016 г. (ИТиС – 2016). Банное, 2016.
6. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб. пособие. СПб.: Питер, 2005. 479 с.
7. Липаев В.В. Функциональная безопасность программных средств. М.: СИНТЕГ, 2004. 348 с.
8. ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности
9. Бородакий Ю.В., Пальчун Б.П., Назаренко Д.Д. Проблемы оценки надежности компьютерных программ // Проблемы информатизации регионального управления: матер. Второй Всеросс. конф. КБНЦ, Нальчик 2016.
10. Morozov A., Janschek K., Yusupova N. On the Influence of Control from Properties to Software Error Location // Proceedings of the International Workshop Innovation of

Information Technologies, Dresden, Germany. Dresden 2010.

11. Kaplan S., Visnepolschi S., Zlotin B., Zusman A. New Tools for Risk Analysis: Anticipatory Failure Determination (AFD) and the Theory of Scenario Structuring // Ideation International Inc. 2005. 71 p.

12. Гвоздев В.Е., Блинова Д.В., Черняховская Л.Р. Предупреждение дефектов на ранних стадиях проектирования аппаратно-программных комплексов на основе положений теории intersubъективного управления // Онтология проектирования. 2016. Т. 6. № 4 (22). С. 452–464.

13. Гвоздев В.Е., Блинова Д.В. Онтологический анализ дефектов при проектировании компонентов аппаратно-программных комплексов // Онтология проектирования. 2015. Т. 5. № 4 (18). С. 399–410.

14. Гвоздев В.Е., Блинова Д.В., Давлиева А.С., Тесленко В.В. Построение базовых моделей эффективности функционирования аппаратно-программных комплексов на основе методов математической статистики // Программная инженерия. 2016. Т. 7. № 11. С. 483–489.

15. Гвоздев В.Е., Блинова Д.В. Элементы теории управления непреднамеренными дефектами в информационно-коммуникационных системах // Системная инженерия. 2015. № 2 (2). С. 104–113.

16. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Изд-во «Наука», 1973. 312 с.

### References

1. Mostovoj A.Ja. Upravlenie slozhnymi tehničeskimi sistemami: konstruirovanie programmnogo obespečenija sputnikov DZZ: monografija. M.: Tehnosfera, 2016. 352 s.
2. Guzairov M.B., Gvozdev V.E., Il'jasov B.G. i dr. Elementy sistemnoj inzhenerii: metodologičeskie osnovy razrabotki programmyh sistem na osnove V-modeli zhiznennogo cikla. M.: Mashinostroenie, 2013. 180 s.
3. Gvozdev V.E., Kostjukova A.P., Kirillov K.V. Statisticheskoe ocenivanie pokazatelej nadezhnosti sistem obrabotki dannyh i upravlenija po nepolnym svedenijam o vyborochnyh dannyh // Elektrotehničeskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2016. №4, Т. 12. S. 73–78.

4. Gvozdev V.E., Morozov A., Kirillov K.V., Subhangulova A.S. Effect of Different Defect Types on Static Parameters of Reliability Assessment // CSIT'2016: Proceedings of the 18th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. 2016. P. 57–61.
5. Kirillov K.V. Ocenivanie pokazatelej sostojanija apparatno-programmnyh kompleksov pri peremennom obeme vyborochnykh dannyh [Electronic Resurce] // Information technologies and systems (ITiS – 2016): Proceedings of the International Workshop. Russia, the town of Bannoe. 2016.
6. Cherkosov G.N. Nadezhnost' apparatno-programmnyh kompleksov. ucheb. posobie. SPb.: Piter, 2005. 479 s.
7. Lipaev V.V. Funkcional'naja bezopasnost' programmnyh sredstv. M.: SINTEG, 2004. 348 s.
8. GOST R 51901.5-2005 Menedzhment riska. Rukovodstvo po primeneniju metodov analiza nadezhnosti.
9. Borodakij Ju.V., Pal'chun B.P., Nazarenko D.D. Problemy ocenki nadezhnosti komp'juternyh programm // Problemy informatizacii regional'nogo upravlenija: Mater. Vtoroj Vseross. konf. KBNC. Nal'chik, 2016.
10. Morozov A., Janschek K., Yusupova N. On the Influence of Control from Properties to Software Error Location // Proceedings of the International Workshop Innovation of Information Technologies, Dresden, Germany. Dresden, 2010.
11. Kaplan S., Visnepolschi S., Zlotin B., Zusman A. New Tools for Risk Analysis: Anticipatory Failure Determination (AFD) and the Theory of Scenario Structuring // Ideation International Inc. 2005. 71 p.
12. Gvozdev V.E., Blinova D.V., Chernjahovskaja L.R. Preduprezhdenie defektov na rannih stadijah proektirovanija apparatno-programmnyh kompleksov na osnove polozenij teorii intersub'yektivnogo upravlenija // Ontologija proektirovanija. 2016. T. 6. № 4 (22). S. 452–464.
13. Gvozdev V.E., Blinova D.V. Ontologicheskij analiz defektov pri proektirovanii komponentov apparatno-programmnyh kompleksov // Ontologija proektirovanija. 2015. T. 5. № 4 (18). S. 399–410.
14. Gvozdev V.E., Blinova D.V., Davlieva A.S., Teslenko V.V. Postroenie bazovykh modelej effektivnosti funkcionirovanija apparatno-programmnyh kompleksov na osnove metodov matematicheskoj statistiki // Programmaja inzhenerija. 2016. T. 7. № 11. S. 483–489.
15. Gvozdev V.E., Blinova D.V. Jelementy teorii upravlenija neprednamerennymi defektami v informacionno-kommunikacionnyh sistemah // Sistemnaja inzhenerija. 2015. № 2 (2). S. 104–113.
16. Sobol' I.M. Chislennye metody Monte-Karlo. M.: Izd-vo «Nauka», 1973. 312 s.





**Зелев А. П.**  
**Zelev A. P.**

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



**Муфтеев В. Г.**  
**Mufteev V. G.**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Российская Федерация



**Талыпов М. А.**  
**Talypov M. A.**

ассистент кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», г. Уфа, Российская Федерация

УДК 004.9

## КОНЦЕПЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕПОДАВАНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

Предлагается интерактивная мультимедийная система преподавания геометрических основ конструирования изделий машиностроения.

Ведение лекций в системе построено на апробированной методике, характеризующейся легкостью восприятия и усвоения учебного материала, исключающей потери времени на рутинное ведение конспектов студентами.

Практические и лабораторные занятия построены на эффективной методике быстрой загрузки упражнений с интерактивного сайта непосредственно в среду САД-систем. Упражнение содержит образец выполнения и методические указания.

Система в целом обеспечивает эффективное использование аудиторного времени и позволяет освоить большой учебный материал при ограниченном ресурсе времени.

**Ключевые слова:** интерактивная мультимедийная система, САД-системы, геометрические основы конструирования.

## CONCEPT OF THE INFORMATION SYSTEM FOR TEACHING GRAPHIC DISCIPLINES

An interactive multimedia system to teach geometric fundamentals of engineering product design is offered.

The system implies delivering lectures using a proven methodology characterized by ease of perception and effective learning of study material, which eliminates time consuming note-taking.

Practical and laboratory classes are designed to use an effective technique which allows quick download from the interactive website directly into CAD-system. An exercise includes an example and methodical recommendations.

The entire system ensures quality classroom time and enables to master a large number of learning material within the limited amount of time.

**Keywords:** interactive multimedia system, CAD-systems, geometric bases of construction.

## Актуальность многофункциональной информационной системы при преподавании вузовских графических дисциплин

Известно: объем информации в каждой отрасли знаний удваивается каждые 3-5 лет. Увеличивается дифференциация отраслей. Период же обучения в техническом вузе остается постоянным и составляет 4-5 лет. Отсюда является актуальным стремление к сокращению учебного времени по отдельным дисциплинам, к оптимизации процесса обучения: а) дать больше современных знаний студентам при сокращении аудиторного времени: б) научить учиться самостоятельно (подготовить специалиста воспринимать новые знания после окончания вуза).

Объективно над каждой вузовской дисциплиной нависает угроза сокращения количества учебных часов. И это сокращение происходит постоянно, высвобождая учебное время для непрерывно расширяющегося объема новых знаний.

Возникают задачи оптимизации учебного процесса: а) дать больше современных знаний, умений, навыков в условиях уменьшения учебного времени за счет избавления от ненужных действий в аудиторное время; б) перенести часть функций обучения за пределы аудитории.

### 1. Лекционные занятия

Какие действия убрать из методики проведения лекций, чтобы высвободить аудиторное время?

При изучении графических дисциплин много времени расходуется на перечерчивание студентами изображений с доски.

Детализируем процесс появления картины в конспекте (рисунок 1):

1) на доске лектор с нуля вычерчивает условие задачи, создает стартовую картину (интервал Л1-Л2);

2) лектор объясняет теоретический материал, развивая стартовую картину и двигаясь в сторону завершения задачи (интервал Л2-Л3);

3) появляется интервал времени на перечерчивание картины с доски в конспект студенту (интервал С1-С3).

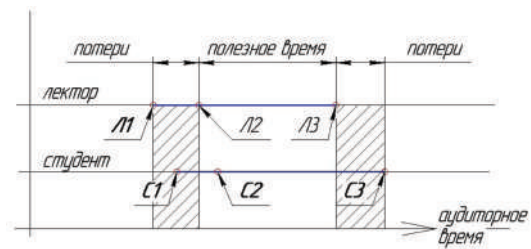


Рисунок 1. Течение лекционного времени «классная доска + мел»

Все три этапа характеризуются пониженным вниманием студента, так как его мыслительный потенциал расходуется по двум направлениям: перечертить и услышать. Таким образом, происходит потеря времени с одновременным, не самым высоким качеством восприятия учебного материала.

Напрашивается технология лекции, при которой присутствует лишь интервал Л2-Л3: стартовая картина должна возникнуть моментально, без потерь времени на 1 этапе (рисование условия на доске). Студент должен освободиться от перечерчивания без потерь времени на 3 этапе. Студент не пишет конспект, а с максимальным вниманием воспринимает новую информацию. Лектор передает студенту готовый конспект заранее, до лекции, с качественными чертежами и внятным сопроводительным текстом.

*Опыт ведения лекций.* Авторы имеют опыт проведения лекций по данной технологии. Все графические операции выполнялись в графическом редакторе КОМПАС 3D. Стартовые картины лектор готовил заранее. Процесс решения задачи, развитие чертежа выполнялись в режиме онлайн с применением мультимедиапроектора. Студенты задолго до лекции получили от преподавателя электронный конспект и имели возможность при желании вывести конспект на печать до лекции, ознакомиться с ним. Во время лекции студенты не отвлекаются на перечерчивание, а, имея в руках готовый конспект, воспринимают новую информацию, задают вопросы.

*Развитие лекционной технологии.* Авторы опираются на имеющийся многолетний опыт преподавания начертательной геометрии (НГ), инженерной графики, компьютерной графики, геометрического моделирования в САПР, а также многолетний опыт програм-

мирования в области разработки программного обеспечения конструирования сложных технических поверхностей, разработки программного обеспечения в ИС предприятие.

Практика преподавания показывает, что сегодня необходима специальная многофункциональная информационная система, позволяющая оптимизировать все стадии преподавания. Отдельные подсистемы собственной разработки уже имеются и применяются более 5 лет, по отдельным подсистемам имеется практика применения, накоплена практика проведения аудиторных и дистанционных занятий.

В данный момент у авторов выстраивается комплексное представление о многофункциональной информационной системе преподавания перечисленных графических дисциплин, которую нужно поэтапно разрабатывать и применять в практике преподавания. Разрабатываемая информационная система включает, в частности, подсистему сопровождения лекций.

## 2. Контроль знаний студентов

*Дистанционный контроль знаний.* В условиях сокращения аудиторного времени целесообразно время аудиторного контроля знаний сократить до минимума, а значительную часть контроля вынести за пределы аудиторного времени. Компьютерные технологии позволяют большую часть контроля знаний и самоконтроль вывести в область дистанционного общения.

Попутно возникает вопрос: можно ли доверять результатам дистанционного контроля знаний, если преподаватель не видит, насколько самостоятельно студент выполнял контрольные задания. Корреляционный анализ результатов дистанционного контроля и аудиторного контроля, на наш взгляд, позволит выработать правильное отношение преподавателя к результатам дистанционного контроля. К этому анализу нам предстоит вернуться более взвешенно в дальнейшей преподавательской деятельности в условиях применения описываемой информационной системы.

*Опыт дистанционного контроля знаний.* Авторы имеют опыт проведения дистанционного контроля, состоящего в тестировании

студентов по нескольким темам. Достоверность авторства результатов тестирования не проверялась (студент лично проходил тестирование либо обращался за помощью к сторонним исполнителям). Для развития дистанционного тестирования предполагается применение соответствующего математического аппарата.

Опыт показывает положительные стороны дистанционного контроля: а) не требуется компьютерный класс для контроля знаний; б) студент планирует свое время так, чтобы ему было удобно вне расписания провести дистанционный контроль собственных знаний и самоконтроль.

Разрабатываемая информационная система включает *подсистему дистанционного контроля знаний и самоконтроля.*

## 3. Электронные практические занятия

Практические занятия по начертательной геометрии целесообразно проводить с помощью чертежно-графических редакторов КОМПАС 3D, AutoCAD или с применением других известных программных продуктов. Положительные моменты: а) точное выполнение графических операций, б) приобретение навыков работы с графическим редактором, в) применение 3D моделирования при решении задач начертательной геометрии, г) индивидуальный подход с учетом уровня подготовленности студентов.

Разрабатываемая информационная система включает *подсистему электронных практических занятий.*

## 4. Рейтинговый показатель успеваемости студентов

Психология студента требует знания объективной оценки собственного уровня прохождения учебного процесса для возможной корректировки подхода к прохождению учебы. Собственно учебный процесс со стороны преподавателя тоже требует ясного объективного представления о том, насколько успешно студент справляется с учебной нагрузкой.

Авторы имеют опыт разработки и применения рейтинговой системы, программирования алгоритмов на базе метаданных системы ИС предприятие.

Разрабатываемая информационная система включает *подсистему расчета текущего рейтинга студента*.

### 5. Обучение и самообучение основам геометрического моделирования для САПР

Компьютерные технологии открывают большие возможности самообучения: а) предоставление иллюстрированного обучающего теоретического и практического материала, б) предоставление студенту набора вычисляемых упражнений, задач, курсовых работ различного уровня сложности.

*Опыт применения обучающей подсистемы.* Авторский программный продукт применяется более 7 лет в качестве обучающего компьютерного методического материала, на котором студенты знакомятся и осваивают основы геометрического моделирования сложных объектов.

На сайте Башкирского государственного аграрного университета в бегущей нижней строке находятся кнопки перехода на тематические сайты. Кнопка <Обучение САПР> переводит пользователя на учебный сайт, где предлагается пройти обучение САПР на базе КОМПАС 3D и AutoCAD (рисунок 2).



Рисунок 2. Фрагмент главной страницы сайта Башкирского государственного аграрного университета

При посещении страницы «Обучение САПР» студент оказывается перед выбором одного из многих направлений, предлагаемых древовидным списком направлений самообучения.

Преподавание геометрического моделирования в САПР мультимедийными средствами в БГАУ ведется с 2012 г. Накоплен определенный опыт. Разработана мультимедийная система интерактивного обучения САПР [1].

Обучение геометрическому моделированию в САПР на базе КОМПАС 3D разбито на два раздела: КОМПАС ГРАФИК и КОМПАС 3D.

Представляют интерес теоретические и практические разработки моделирования кривых линий и поверхностей высокого качества (рисунок 3).

По каждой теме выполняется определенный набор упражнений.

Технология выполнения упражнений заимствована из методики Соколовой Т.Ю. [2]. На учебном сайте находятся файлы упражнений. Для каждого упражнения показана картинка с упражнением и методические указания к выполнению. При указании номера упражнения файл упражнения скачивается и устанавливается в графической среде КОМПАС 3D (или AutoCAD).

Раздел КОМПАС ГРАФИК содержит 6 тем:

1. Основные элементы интерфейса;
2. Общие положения;
3. Основные приемы редактирования;
4. Приемы создания обозначений и объектов оформления;
5. Чертеж. Создание чертежей;
6. Создание объектов спецификации в чертеже.



Рисунок 3. «Reception» раздела сайта по основам САПР

Первые 4 темы и упражнения взяты из подготовительного курса компании «АСКОН» для сдачи экзамена на сертификат первой ступени. Последние 2 темы — реальные пункты экзаменационного билета при сдаче на сертификат одного из авторов.

Рекомендуется окна в Windows установить так, чтобы одновременно в поле зрения были и методические указания на сайте, и окно с упражнением в графической среде КОМПАС.

Обучение КОМПАС 3D выполняется с использованием встроенного учебника <Азбука КОМПАС 3D>.

<Азбука КОМПАС 3D> содержит ряд тем. В нашей учебной программе последовательность прохождения тем следующая:

1. Операция выдавливания. Модель вилка;
2. Создание сборки;
3. Создание чертежей;
4. Создание спецификации;
5. Операция вращения;
6. Операция по сечениям;
7. Кинематическая операция;
8. Операции с листовым материалом;
9. Поверхность по сети точек;
10. Поверхность по сети кривых.

Первые 4 темы обязательны. Прохождение остальных тем в аудиторном режиме зависит от ресурса учебного времени, отведенного на курс. В любом случае после освоения методики обучения в Азбуке КОМПАС 3D по первым 4 темам и приобретения общекультурной компетенции (читать, понимать, уметь повторить) остальные темы можно пройти самостоятельно в рамках ресурса учебной программы на самостоятельную работу.

После завершения выполнения тем студент может проверить себя выполнением тестов в интерактивном режиме с получением оценки.

Имеется база данных тестов на выполнение 3D моделирования трех уровней сложности.

Предлагаемая технология позволяет подготовить студентов к сдаче экзаменов на сертификаты первой и второй ступеней. И такой опыт имеется. К сожалению, в настоящее время экзамены платные. И не все студенты

могут себе позволить роскошь сдачи экзаменов на сертификаты.

#### *Обобщение методик*

Преподавание САПР с применением КОМПАС 3D на этапе обучения геометрическому моделированию требует определенных знаний о методах проецирования, которые они получают из курса начертательной геометрии.

Разрабатываемая информационная система включает *подсистему обучения графическим дисциплинам, часть которой: «Обучение САПР» успешно применяется более 5 лет.*

#### **Перспективы создания информационной системы преподавания графических дисциплин**

Возникает необходимость создания комплексной информационной системы и комплексной образовательной программы, которые позволят объединить процесс обучения основам геометрического моделирования в САПР с обучением основам теории проецирования НГ.

Проблему создания комплексной информационной системы и комплексной образовательной программы может решить коллектив профессионалов, имеющих опыт преподавания как НГ, так и основ геометрического моделирования в САПР, объединяющих в себе опыт программирования графических редакторов, геометрического моделирования, программного продукта дистанционного взаимодействия «Преподаватель — Студент».

Полученный авторами опыт преподавания графических дисциплин в вузе с применением мультимедийной методики позволил сформулировать концепцию разработки комплексной информационной системы преподавания графических дисциплин, которую могли бы взять на вооружение коллективы разработчиков образовательного программного обеспечения.

#### *Концепция информационной системы*

Авторами предлагается концепция системы, в которой функционально выделяются 5 подсистем:

1. Подсистема сопровождения лекционных занятий (пройдена апробация графической части в редакторе КОМПАС 3D);

2. Подсистема промежуточного контроля знаний студентов, в том числе, дистанционно (пройдена апробация с помощью интернет ресурсов);

3. Подсистема сопровождения практических занятий;

4. Подсистема рейтинговой оценки работы студентов (пройдена апробация методик с помощью разработанных алгоритмов в системе 1С Предприятие);

5. Подсистема обучения и самообучения для студентов.

#### *1. Подсистема сопровождения лекционных занятий*

Задачи подсистемы:

а) формирование стартовой картины;  
б) формирование методического видео;  
в) развитие стартовой картины лектором в процессе подачи учебного материала;

г) хронологические перемещения по графической базе в любую точку временного пространства;

д) акустическое сопровождение;

е) формирование электронного конспекта, содержащего методические видеофрагменты, статические иллюстрации, тексты.

Программный продукт позволяет а) подготовить стартовые картины и видеофрагменты для применения на лекции; б) использовать графические средства развития стартовых картин как по оригинальному пути, так и по пути, сформированному заранее; в) сформировать электронный конспект со статическими изображениями, видеофрагментами, текстами.

#### *2. Подсистема промежуточного контроля знаний обучаемых*

Промежуточный контроль охватывает текущие контрольные работы, зачеты, экзамены. В результате проведенного контроля система выдает оценку выполненной студентом работы.

Задачи подсистемы:

а) накопление базы контрольных заданий;  
б) формирование алгоритмов подбора контрольных заданий в зависимости от различных факторов – специальности, уровня сложности, тематики и др.;

в) диагностика выполненных заданий.

Подсистема включает логические программные средства оперативного комплектования заданий для контрольных работ, коллоквиумов, зачетов, экзаменов на основе вектора параметров. Программный продукт разрабатывается на основе метаданных и языковых средств системы 1С Предприятие.

#### *3. Подсистема сопровождения практических занятий*

Задачи подсистемы:

а) создание базы двумерных и трехмерных условий графических задач для использования их на практических занятиях;

б) предоставление студентам средств графического редактора, с помощью которых на экране он выполняет решение задачи;

в) создание оценочных средств по решенной задаче.

Преподавательский коллектив подготавливает электронную базу условий задач в формате графического редактора, а также графические или видео иллюстрации, поясняющие условие задачи. Студент во время занятия развивает данное условие задачи средствами графического редактора. Диагностический инструмент оценивает решение, выставляет оценку по задаче и обеспечивает сбор статистической информации по результатам решения задач.

#### *4. Подсистема рейтинговой оценки обучаемых*

Задачи подсистемы:

а) предоставление преподавателю возможности простой установки алгоритмов расчета рейтинговой оценки учебной деятельности студента;

б) автоматическая выработка рейтинговой оценки студента на любой момент времени.

#### *5. Подсистема самообучения*

Подсистема самообучения содержит методическую информацию для самостоятельного изучения геометрического моделирования, основ САПР, начертательной геометрии, инженерной графики. Широко используются графические возможности систем КОМПАС 3D, AutoCAD.

#### **Выводы**

1. Опыт авторов по разработке и применению отдельных модулей и подсистем в системе преподавания графических дисциплин

плин привел к возможности формирования концепции соответствующей информационной системы преподавания.

2. Разработана концепция многофункциональной системы преподавания графических вузовских дисциплин, обеспечивающая мультимедийную технологию ведения всех видов учебных занятий, включая самоподготовку, промежуточный контроль знаний и самоконтроль.

3. Наличие большого количества задач для студентов, превышающего 5–10-кратный

запас относительно решаемых на занятиях в течение семестра, позволяет держать их в открытом доступе, включая экзаменационные задачи.

Мобильность автоматизированного комплектования различных блоков задач по заданному вектору целевых параметров обеспечивает оперативность и удобство подготовки к учебным занятиям с учетом уровня подготовленности студентов, к мероприятиям промежуточного контроля знаний студентов в условиях открытости базы задач для студентов.

### Список литературы

1. Муфтеев В.Г. и др. 2012-2017. Интерактивная система обучения САПР. <http://fair-nurbs-ru.lgb.ru>.
2. Соколова Т.Ю. AutoCAD 2009 (+CD): учеб. пособие для вузов. СПб.: Питер, 2008. 574 с.

### References

1. Mufteev V.G. i dr. 2012-2017. Interaktivnaja sistema obuchenija SAPR. <http://fair-nurbs-ru.lgb.ru>.
2. Sokolova T.Ju. AutoCAD 2009 (+CD): ucheb. posobie dlja vuzov. SPb.: Piter, 2008. 574 s.



**Талыбов Н. Г.**  
**Talibov N. G.**

кандидат технических наук, доцент,  
проректор по организации учебного  
процесса и технологии обучения,  
Сумгаитский государственный  
университет,  
г. Сумгаит, Азербайджанская Республика



**Мустафаев В. А.**  
**Mustafayev V. A.**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Информатика»,  
Сумгаитский государственный  
университет,  
г. Сумгаит, Азербайджанская Республика



**Гусейнов А. Г.**  
**Husseynov A. N.**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Информационные  
технологии и программирование»,  
Сумгаитский государственный  
университет,  
г. Сумгаит, Азербайджанская Республика



**Салманова М. Н.**  
**Salmanova M. N.**

аспирант кафедры «Информатика»,  
Сумгаитский государственный  
университет,  
г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

УДК 519.95

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Рассмотрено моделирование динамических взаимодействующих процессов, описывающих функционирование сложных объектов в условиях неопределенности. Модели динамических процессов представлены в виде нечетких временных сетей Петри. На примере робототехнологического комплекса циклического действия показано, что принятые правила срабатывания переходов полностью описывают процесс функционирования нечетких временных сетей Петри.

**Ключевые слова:** модель, алгоритм, треугольное нечеткое число, нечеткие временные сети Петри, робототехнологический комплекс.



## MODELING OF DYNAMIC INTERACTING PROCESSES USING FUZZY TIMED PETRI NETS

The modelling of dynamic interacting processes is examined in the thesis which shows the operation of complex objects in the condition of uncertainty. The models of dynamic processes are presented in the form specific to fuzzy timed Petri Nets. It describes that the principles of triggering rules of transition fully show the functioning process of fuzzy timed Petri Nets in the example of robotic complex which is characterized by circular motion.

**Key words:** model, algorithm, triangular fuzzy number, fuzzy timed Petri Nets, robotic complex.

### Введение

Одной из основных задач нечеткого моделирования является исследование параллельных динамических взаимодействующих процессов, функционирующих в условиях неопределенности, обусловленной нечеткостью временных, ресурсных и других ограничений [1–3]. Структурные связи, функциональные и причинно-следственные отношения между элементами системы, характеризующимися неопределенными параметрами, усложняют решение задачи.

Перспективно в данном случае применение различных расширений моделирующего аппарата нечеткой сети Петри. В статье представлена в виде нечеткой временной сети Петри (НВСП) модель робототехнологического комплекса, функционирующего в условиях неопределенности. Разработан алгоритм вычисления структурных элементов НВСП.

*Представление модели динамических процессов в виде нечеткой временной сети Петри и определение правила срабатывания переходов*

При решении практических задач нечеткого моделирования наибольшее применение нашли простейшие частные случаи нечетких чисел и интервалов, получившие свое название по виду их функций принадлежности. Нечеткое моделирование основывается на теории нечетких множеств и нечеткой логики. Входящие в модель управления входные и выходные лингвистические переменные могут задаваться как нечеткие числа или нечеткие интервалы. В связи с этим треугольные и трапециевидные функции принадлежности нечеткого множества могут быть выбраны как структурные элементы модели. При этом целесообразность использования трапециевидных нечетких интервалов и

нечетких чисел обуславливается не только простотой выполнения операций над ними, но и их наглядной графической интерпретацией.

Треугольным нечетким числом (ТНЧ) называют такое нормальное нечеткое число, функция принадлежности которого может быть задана треугольной функцией. В этом случае ТНЧ представляют в виде кортежа из трех чисел:  $A = \langle a, \alpha, \beta \rangle$ , где  $a$  — модальное значение ТНЧ;  $\alpha$  и  $\beta$  — левый и правый коэффициенты нечеткости ТНЧ [4].

Для решения задач нечеткого моделирования необходимо определить некоторые операции над ТНЧ, аналогичные арифметическим операциям над обычными числами и интервалами. Для определения аналогов обычных арифметических операций над нечеткими числами и нечеткими интервалами используется принцип обобщения [5].

Модель динамических взаимодействующих процессов представляется в виде НВСП.

Нечёткая временная сеть Петри определяется выражением

$$C_T = (N, \mu_0, Z_T, S_T),$$

где  $N = (P, T, I, O)$  — структура НВСП:  $P = \{p_i\}$  ( $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  — число позиций) — множество позиций;  $T = \{t_j\}$ , ( $j = 1, \dots, m$ ;  $m$  — число переходов) — множество переходов;  $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ ;  $O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$  — соответственно входная и выходная функции переходов;

$\mu_0 = (\mu_1^0, \mu_2^0, \dots, \mu_n^0)$  — вектор начальной маркировки, каждый компонент  $\mu_i^0$  представляет собой треугольное нечеткое число

$$\mu_i^0 = \langle \mu_{1i}^0, \mu_{2i}^0, \mu_{3i}^0 \rangle (i \in \{1, 2, \dots, n\}).$$

$z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$  — вектор параметров временных задержек маркеров в позициях НВСП, каждый компонент  $z_i$  представляет собой ТНЧ:

$$z_i = \langle z_{1i}, z_{2i}, z_{3i} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, n\}).$$

$s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$  — вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов НВСП, каждый компонент  $s_j$  представляет собой ТНЧ:

$$s_j = \langle s_{1j}, s_{2j}, s_{3j} \rangle, (j \in \{1, 2, \dots, m\}).$$

Текущее состояние НВСП определяется вектором  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ , компоненты которого представляют собой ТНЧ  $\mu_i = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i} \rangle$ , ( $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) и интерпретируются как значения функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующих позициях  $p_i \in P$  относительно времени, отсчитываемого от момента запуска данной НВСП.

Переход  $t_k \in T$  НВСП называется разрешенным при некоторой доступной маркировке  $\mu$ , если выполнено следующее условие:

$$\mu_i = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i} \rangle > 0 / (\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0).$$

Если переход  $t_k \in T$  НВСП разрешен при некоторой доступной маркировке  $\mu$ , то нечеткое срабатывание данного перехода, осуществляемое за время  $s_k = \langle s_{1k}, s_{2k}, s_{3k} \rangle$ , приводит к новой маркировке  $\mu_k$ , компоненты вектора которой определяются следующим образом:

— для каждой из входных позиций  $p_i \in P$ , для которых  $I(p_i, t_k) > 0$ , по формуле:

$$\begin{aligned} \mu'_k &= \langle \mu'_{1k}, \mu'_{2k}, \mu'_{3k} \rangle = \\ &= \langle 0, 0, 0 \rangle / (\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0); \end{aligned} \quad (1)$$

— для каждой из выходных позиций  $p_j \in P$ , для которых  $O(t_k, p_j) > 0$ , по формуле:

$$\begin{aligned} \mu'_j &= \min \{ \max \{ \mu_i \} + s_k, \mu_j \}, \\ (i \in \{1, 2, \dots, n\}) \wedge (I(p_i, t_k) > 0), \\ (\forall p_j \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0) \wedge (\mu_j \neq \langle 0, 0, 0 \rangle), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\max$ ,  $\min$  — расширенная операция максимума и минимума для ТНЧ, а «+» — операция сложения ТНЧ;

— для каждой позиции  $p_i \in P$ , не являющейся входным и выходным, по формуле:

$$\mu'_i = \langle \mu'_{1i}, \mu'_{2i}, \mu'_{3i} \rangle = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i} \rangle,$$

$$(\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) = 0) \wedge (O(t_k, p_j) = 0).$$

Если некоторые из позиций  $p_j \in P$  являются одновременно входными и выходными для разрешенного перехода  $t_k \in T$ , то для них компоненты вектора новой маркировки рассчитываются последовательно; вначале по формуле (1), затем по формуле (2).

После нечеткого срабатывания перехода соответствующие маркеры становятся доступными только после окончания действия временных задержек, которые определяют доступную маркировку  $\mu'_j$  по формуле:

$$\begin{aligned} \mu'_i &= \mu_i + z_i / (\forall p_i \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > \\ &> 0) \wedge (\mu_j \neq \langle 0, 0, 0 \rangle). \end{aligned}$$

Для выходных позиций  $p_j$  перехода  $t_k$ , для которых  $\mu_j = \langle 0, 0, 0 \rangle$ , по определению  $\mu'_j = \langle 0, 0, 0 \rangle$ .

*Алгоритм вычисления структурных элементов нечетких временных сетей Петри*

При решении практических задач удобно использовать матричное представление структуры НВСП. Элементы матриц входных  $d_{ij}^-$ , выходных  $d_{ij}^+$  позиций и инцидентий  $d_{ij}$  определяются так [6]:

$$\begin{aligned} d_{ij}^- &= \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in I(t_j), \\ 0, & \text{если } p_i \notin I(t_j), \end{cases} \\ d_{ij}^+ &= \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in O(t_j), \\ 0, & \text{если } p_i \notin O(t_j), \end{cases} \\ d_{ij} &= \begin{cases} -1, & \text{если } p_i \in I(t_j), p_i \notin O(t_j), \\ 1, & \text{если } p_i \notin I(t_j), p_i \in O(t_j), \\ 0, & \text{если } p_i \notin I(t_j), p_i \notin O(t_j), \end{cases} \end{aligned}$$

*Начало алгоритма*

Шаг 1. Создание входных и выходных матриц, представляющих входную и выходную функции НВСП в размерности  $m \times n : d_{ij}^-, d_{ij}^+ (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m})$ .

Шаг 2. Определение размерности и ввод структурных элементов НВСП:  $\mu_{ij}, z_{ij} (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, n}); s_{ij} (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, m})$ .

Шаг 3. Полагают:  $k = 1$ .

Шаг 4. Полагают:  $j = 1; q = 1; i = 0$ .

Шаг 5. Индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i = i + 1$ .

Шаг 6. Если выполняется условие  $i \leq n$ , то осуществляется переход к шагу 7, в противном случае — к шагу 15.

Шаг 7. Создание промежуточной матрицы  $\mu_{li}^1 : \mu_{li}^1 = \mu_{li}; (l = \overline{1, 3})$ .

Шаг 8. Если выполняется условие  $(\mu_{li}^1 = 0) \wedge (\mu_{2i}^1 = 0) \wedge (\mu_{3i}^1 = 0)$ , то осуществляется переход к шагу 5, в противном случае — к шагу 9.

Шаг 9. Вычисляют:  $\mu_{li}^1 = \mu_{li} + z_{li}; (l = \overline{1, 3})$ .

Шаг 10. Если выполняется условие  $i = d_{kj}^-$ , то осуществляется переход к шагу 11, в противном случае — к шагу 5.

Шаг 11. Если  $j = 1$ , то полагают:  $\{\max_a = \mu_{1i}^1; \max_\alpha = \mu_{2i}^1; \max_\beta = \mu_{3i}^1\}$  и осуществляется переход к шагу 12, в противном случае — к шагу 13.

Шаг 12. Обнуление элементов матрицы  $\mu_{li}^1$ :  $\mu_{li}^1 = 0 (l = \overline{1,3})$  индекс  $j$  увеличивается на единицу:  $j = j + 1$  и осуществляется переход к шагу 5.

Шаг 13. Полагают:  $a_1 = \max_a; a_2 = \mu_{1i}^1$ .

Шаг 14. Если выполняется условие  $a_1 \geq a_2$ , то  $\max'_a = a_1$ , в противном случае  $\max'_a = a_2$ ;

14.1 полагают:  $\alpha_1 = \max_\alpha; \alpha_2 = \mu_{2i}^1$ ;  $\beta_1 = \max_\beta; \beta_2 = \mu_{3i}^1$ ; вычисляют:  $\alpha'_1 = a_1 - \alpha_1$ ;  $\alpha'_2 = a_2 - \alpha_2$ ;

14.2 если выполняется условие  $\alpha'_1 \geq \alpha'_2$ , то  $\max'_\alpha = \alpha'_1$ , в противном случае  $\max'_\alpha = \alpha'_2$ ;

14.3 вычисляют:  $\max'_\alpha = \max'_\alpha - \max'_\alpha$ ;  $\beta'_1 = a_1 + \beta_1; \beta'_2 = a_2 + \beta_2$ ;

14.4 если выполняется условие  $\beta'_1 \geq \beta'_2$ , то  $\max'_\beta = \beta'_1$ , в противном случае  $\max'_\beta = \beta'_2$ ;

14.5 вычисляют:  $\max'_\beta = \max'_\beta - \max'_\beta$ , осуществляется переход к шагу 12.

Шаг 15. Полагают:  $i = 1$ .

Шаг 16. Если выполняется условие  $i \leq n$ , то осуществляется переход к шагу 17, в противном случае — переход к шагу 25.

Шаг 17. Если выполняется условие  $i = d_{kp}^+$ , то осуществляется переход к шагу 18, в противном случае индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i = i + 1$  и осуществляется переход к шагу 16.

Шаг 18. Создание промежуточной матрицы  $\mu_{li}^2$ : вычисляют:  $\{\mu_{1i}^2 = \max_a + s_{1k}; \mu_{2i}^2 = \max_\alpha + s_{2k}; \mu_{3i}^2 = \max_\beta + s_{3k}\}$ .

Шаг 19. Если выполняется условие  $(\mu_{1i}^1 = 0) \wedge (\mu_{2i}^1 = 0) \wedge (\mu_{3i}^1 = 0)$ , то осуществляется переход к шагу 20, в противном случае — переход к шагу 21.

Шаг 20. Полагают:  $\mu_{li}^1 = \mu_{li}^2; (l = \overline{1,3})$ ; индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i = i + 1$  и осуществляется переход к шагу 16.

Шаг 21. Если выполняется условие  $q = 1$ , то полагают:  $\{\min_a = \mu_{1i}^2; \min_\alpha = \mu_{2i}^2; \max_\beta = \mu_{3i}^2\}$  и осуществляется переход к шагу 22, в противном случае — переход к шагу 23.

Шаг 22. Полагают  $\{\mu_{1i}^1 = \min_a; \mu_{2i}^1 = \min_\alpha; \mu_{3i}^1 = \min_\beta\}$ ; значение  $q$  увеличивается на единицу:  $q = q + 1$  и осуществляется переход к шагу 17.

Шаг 23. Полагают:  $a_1 = \min_a; a_2 = \mu_{1i}^2$ .

Шаг 24. Если выполняется условие  $a_1 \leq a_2$ , то  $\min'_a = a_1$ , в противном случае  $\min'_a = a_2$ ;

24.1 полагают:  $\alpha_1 = \min_\alpha; \alpha_2 = \mu_{2i}^2$ ;  $\beta_1 = \min_\beta; \beta_2 = \mu_{3i}^2$ ; вычисляют:  $\alpha'_1 = a_1 - \alpha_1$ ;  $\alpha'_2 = a_2 - \alpha_2$ ;

24.2 если выполняется условие  $\alpha'_1 \leq \alpha'_2$ , то  $\min'_\alpha = \alpha'_1$ , в противном случае  $\min'_\alpha = \alpha'_2$ ;

24.3 вычисляют:  $\min'_\alpha = \min'_\alpha - \min'_\alpha$ ;  $\beta'_1 = a_1 + \beta_1; \beta'_2 = a_2 + \beta_2$ ;

24.4 если выполняется условие  $\beta'_1 \leq \beta'_2$ , то  $\min'_\beta = \beta'_1$ , в противном случае  $\min'_\beta = \beta'_2$ ;

24.5 вычисляют:  $\min'_\beta = \min'_\beta - \min'_\beta$  и осуществляется переход к шагу 22.

Шаг 25. Новая маркировка принимается за текущую:  $\mu_{lr} = \mu_{lr}^1; (l = \overline{1,3}; r = \overline{1, \bar{n}})$ .

Шаг 26. Значение  $k$  увеличивается на единицу:  $k = k + 1$ . Если  $k \leq m$ , то осуществляется переход к шагу 4.

*Конец алгоритма.*

*Модель робототехнологического комплекса циклического действия*

Рассмотрим НВСП, представляющую робототехнологический комплекс циклического действия, в состав которого входят прокатный стан, две транспортные системы (ТС) (одна подает прокатному стану, а другая принимает снятые со стана после холодной сварки заготовки), два промышленных робота (ПР), выполняющих операции перемещения заготовки из буферного накопителя на выход прокатного стана, установленного на принимающей ТС, и перемещения пакета, доставленного подающей ТС к прокатному стану.

Модель функционирования активных элементов робототехнологического комплекса циклического действия представляется в виде НВСП. Определена структура НВСП и разработана граф-схема (рисунок 1) функционирования робототехнологического комплекса.

Множество позиций и переходов сети интерпретируются следующим образом:  $p_1$  — прокатный стан осуществляет холодную сварку;  $p_2$  — пакет находится в приемной позиции прокатного стана;  $p_3$  — заготовка находится в буферной выходной позиции прокатного стана;  $p_4$  — рабочая позиция прокатного стана свободна;  $p_5$  — приемная позиция прокатного стана свободна;  $p_6$  — выходная буферная позиция про-

катного стана свободна;  $p_7$  — ПР свободен;  $p_8$  — в приемной позиции ТС установлена заготовка;  $p_9$  — приемная позиция ТС незагружена;  $p_{10}$  — ПР загружает пакет в приемную позицию прокатного стана;  $p_{11}$  — ПР из буферного накопителя на выходе прокатного стана загружает заготовку на приемной позиции ТС;  $t_1$  — выполнение загрузки в приемную позицию прокатного стана;  $t_2$  — загрузка в приемную позицию прокатного стана закончена;  $t_3$  — выполнение операции холодной сварки;  $t_4$  — операция холодной сварки закончена;  $t_5$  — ПР выполняет загрузку из буферного накопителя на выходе прокатного стана на приемную позицию ТС;  $t_6$  — отправка заготовки и освобождение всех выходных приемных позиций.

Входные, выходные и матрица инцидентий НВСП имеют вид:

$$d^- = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$d^+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Элементы вектора начальной маркировки:

$$\mu_1^0 = \mu_2^0 = \mu_3^0 = \mu_{10}^0 = \mu_{11}^0 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \quad \mu_4^0 = \langle 1, 0, 4, 0, 3 \rangle, \\ \mu_5^0 = \langle 0, 5, 0, 3, 0, 4 \rangle, \quad \mu_6^0 = \langle 1, 5, 0, 4, 0, 2 \rangle, \quad \mu_7^0 = \langle 1, 3, 0, 5, 0, 2 \rangle, \\ \mu_8^0 = \langle 0, 5, 0, 2, 0, 3 \rangle, \quad \mu_9^0 = \langle 0, 7, 0, 2, 0, 2 \rangle.$$

Элементы вектора параметров временных задержек маркеров в позициях:

$$z_1 = \langle 1, 0, 3, 0, 3 \rangle, \quad z_2 = \langle 1, 0, 0, 4 \rangle, \quad z_3 = \langle 1, 0, 2, 0, 2 \rangle, \\ z_4 = \langle 0, 5, 0, 3, 1 \rangle, \quad z_5 = \langle 1, 0, 2, 0 \rangle, \quad z_6 = \langle 1, 0, 2, 1 \rangle, \\ z_7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \quad z_8 = \langle 1, 0, 3, 1 \rangle, \quad z_9 = \langle 1, 0, 0 \rangle, \quad z_{10} = \langle 1, 0, 2, 1 \rangle, \\ z_{11} = \langle 1, 0, 1 \rangle.$$

Элементы вектора параметров времен срабатывания разрешенных переходов:

$$s_1 = \langle 0, 4, 0, 3, 0, 1 \rangle, \quad s_2 = \langle 0, 7, 0, 0, 2 \rangle, \quad s_3 = \langle 1, 0, 2, 0, 1 \rangle, \\ s_4 = \langle 0, 6, 0, 1, 0 \rangle, \quad s_5 = \langle 1, 0, 3, 0 \rangle, \quad s_6 = \langle 1, 0, 5, 0, 5 \rangle.$$

Маркировка  $\mu^0$  соответствует состоянию готовности робототехнологического комплекса к работе. Задержки в позициях сети имитируют время исполнения производственной операции;  $t_1$  — время выполнения операции холодной сварки на прокатном стане;  $t_8$  — время ожидания прибытия ТС с пакетом;  $t_9$  — время ожидания прибытия

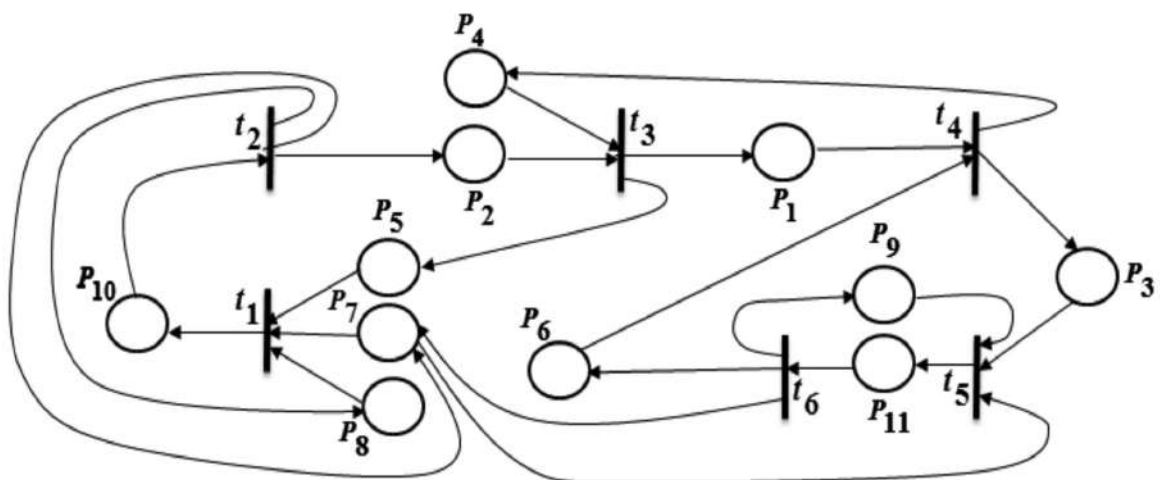


Рисунок 1. Граф-схема функционирования робототехнологического комплекса циклического действия

приемного ТС;  $z_{10}$  и  $z_{11}$  — время перемещения пакета и его установки в приемную позицию прокатного стана и соответственно время перемещения заготовки из буферного накопителя и установки заготовки в приемную позицию ТС. Время перехода ПР со входа на выход прокатного стана и обратно считается малым, не учитывается и приравнивается нулю.

При реализации разработанного алгоритма получено множество достижимых маркировок. Ниже приведены результаты исследования.

Маркировка, полученная при срабатывании перехода  $t_j$ :

$$\begin{aligned} \mu_1^1 = \mu_2^1 = \mu_3^1 = \mu_5^1 = \mu_7^1 = \mu_8^1 = \mu_{11}^1 &= \langle 0,0,0 \rangle, \\ \mu_4^1 &= \langle 1.5, 0.7, 1.3 \rangle, \quad \mu_6^1 = \langle 2.5, 0.6, 1.2 \rangle, \quad \mu_9^1 = \langle 1.7, 0.2, 0.2 \rangle, \\ \mu_{10}^1 &= \langle 1.9, 0.8, 0.8 \rangle. \end{aligned}$$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода  $t_2$ :

$$\begin{aligned} \mu_1^2 = \mu_3^2 = \mu_5^2 = \mu_{10}^2 = \mu_{11}^2 &= \langle 0,0,0 \rangle, \quad \mu_2^2 = \langle 3.6, 1, 2 \rangle, \\ \mu_4^2 &= \langle 2, 1, 2.3 \rangle, \quad \mu_6^2 = \langle 3.5, 0.8, 2.2 \rangle, \quad \mu_7^2 = \langle 3.6, 1, 2 \rangle, \\ \mu_8^2 &= \langle 3.6, 1, 2 \rangle, \quad \mu_9^2 = \langle 2.7, 0.2, 0.2 \rangle. \end{aligned}$$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода  $t_3$ :

$$\begin{aligned} \mu_2^3 = \mu_3^3 = \mu_4^3 = \mu_{10}^3 = \mu_{11}^3 &= \langle 0,0,0 \rangle, \quad \mu_1^3 = \langle 5.6, 1.2, 2.5 \rangle, \\ \mu_5^3 &= \langle 5.6, 1.2, 2.5 \rangle, \quad \mu_6^3 = \langle 4.5, 1, 3.2 \rangle, \quad \mu_7^3 = \langle 3.6, 1, 2 \rangle, \\ \mu_8^3 &= \langle 4.6, 1.3, 3 \rangle, \quad \mu_9^3 = \langle 3.7, 0.2, 0.2 \rangle. \end{aligned}$$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода  $t_4$ :

$$\begin{aligned} \mu_1^4 = \mu_2^4 = \mu_6^4 = \mu_{10}^4 = \mu_{11}^4 &= \langle 0,0,0 \rangle, \quad \mu_3^4 = \langle 7.2, 1.6, 2.8 \rangle, \\ \mu_4^4 &= \langle 7.2, 1.6, 2.8 \rangle, \quad \mu_5^4 = \langle 6.6, 1.4, 2.5 \rangle, \quad \mu_7^4 = \langle 3.6, 1, 2 \rangle, \\ \mu_8^4 &= \langle 5.6, 1.6, 4 \rangle, \quad \mu_9^4 = \langle 4.7, 0.2, 0.2 \rangle. \end{aligned}$$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода  $t_5$ :

$$\begin{aligned} \mu_1^5 = \mu_2^5 = \mu_3^5 = \mu_6^5 = \mu_7^5 = \mu_9^5 = \mu_{10}^5 &= \langle 0,0,0 \rangle, \\ \mu_4^5 &= \langle 7.7, 1.9, 3.8 \rangle, \quad \mu_5^5 = \langle 7.6, 1.6, 2.5 \rangle, \quad \mu_8^5 = \langle 6.6, 1.9, 5 \rangle, \\ \mu_{11}^5 &= \langle 9.2, 2.1, 3 \rangle. \end{aligned}$$

Процесс продолжается до получения искомой маркировки.

### Выводы

Разработанный алгоритм вычисления структурных элементов НВСП обеспечивает

— удобные преобразования внешних данных во внутренний формат, используемый в среде моделирования;

— эффективную форму представления структуры, динамики состояния модели, пространства достижимых состояний и последовательности срабатывания переходов в виде совокупности векторов и матриц;

— упрощение и ускорение процесса моделирования, выявление тупиковых состояний.

Программа разработана в системе Borland Delphi 7.0 на основе описанного алгоритма. Ресурсы современных компьютеров позволяют решать задачи с матрицами достаточно большого размера, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к моделированию сложных объектов, функционирующих в условиях неопределенности.

### Список литературы

- Егоров А.С., Шайкин А.Н. Логическое моделирование в условиях неопределенности на базе нечетких интервальных сетей Петри // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2002. № 2. С. 134–139.
- Ding Z., Zhou Y., Zhou M. A Polynomial Algorithm to Performance Analysis of Concurrent Systems Via Petri Nets and Ordinary Differential Equations // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2015. V. 12, № 1. P. 295–308.
- Гусейнов А.Г., Талыбов Н.Г., Манфова Х.И. Разработка средства автоматизации моделирования интеллектуальной

системы управления гибкой производственной системой // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Вып. 2 (108). С. 104–110.

4. Борисов В.В., Круглов В.В., Федюлов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012. 284 с.

5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 717 с.

6. Akhmedov M.A., Mustafayev V.A. Development of Fuzzy Model for Investigation Functioning Active Elements of the Flexible Manufacture Module // Proc. 9th Intern. Conf. on Application of Fuzzy Systems and Soft

Computing (ICAFS – 2010). Prague, Czech Republic, 26-27 Aug., 2010. Kaufering: b-Quadrat Verlag, 2010.

### References

1. Egorov A.S., Shajkin A.N. Logical Modeling in Conditions of Uncertainty Based on Fuzzy Interval Petri Nets // *Izv. RA of Science, Theory and Control Management*. 2002. № 2. P. 134–139. [in Russian language].
2. Ding Z., Zhou Y., Zhou M. A Polynomial Algorithm to Performance Analysis of Concurrent Systems Via Petri Nets and Ordinary Differential Equations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2015. V. 12, № 1. P. 295–308.
3. Husseyinov A.H., Talibov N.H., Manafova X.I. Development of Automation Modeling Means of Intelligent Control System by Flexible Production System // *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2016, Issue 2 (108), Pp. 104–110. [in Russian language].
4. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. *Fuzzy Models and Networks*. M.: Telekom, 2012. 284 p. [in Russian language].
5. Leonenkov A.V. *Fuzzy Modeling in Environments MATLAB and Fuzzy TECH*. SPb.: BHV-Peterburg, 2005. 717 p. [in Russian language].
6. Akhmedov M.A., Mustafayev V.A. Development of Fuzzy Model for Investigation Functioning Active Elements of the Flexible Manufacture Module // *Proc. 9th Intern. Conf. on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS–2010)*. Prague, Czech Republic, 26–27 Aug., 2010. Kaufering: b-Quadrat Verlag, 2010.



**Лихачев Е. А.**  
**Likhachev E. A.**

*старший преподаватель кафедры  
«Информационно-измерительная техника»  
Факультета авионики, энергетики  
и инфокоммуникаций,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*



**Зайцева А. А.**  
**Zajceva A. A.**

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

УДК 621.45.05

## **МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ И РЕГУЛИРОВКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХОДНОГО НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ДВИГАТЕЛЯ ТИПА ТВЗ-117 С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Важнейшим требованием, выполнение которого необходимо обеспечить в процессе эксплуатации летательного аппарата (ЛА), является высокая безопасность полета при низкой экономичности перевозок, которая в значительной степени зависят от надежности работы и экономичности двигателей, установленных на летательном аппарате. Исходя из этого, к двигателям ЛА предъявляются следующие основные требования:

- обеспечение заданных летно-технических данных ЛА;
- большой ресурс и надежность в работе при всех возможных условиях применения ЛА;
- экономичность на всех режимах работы силовой установки.

Поскольку в процессе эксплуатации ЛА (особенно в районах с повышенным содержанием в атмосфере абразивных частиц) происходит износ лопаток силовой установки, возникает необходимость их регулировки с целью выравнивания до нормы, заданной заводом-изготовителем, мощностных характеристик.

Технология проведения проверки характеристики входного направляющего аппарата двигателей типа ТВЗ-117 представляет собой сложный и относительно долгий процесс, требующий от обслуживающего персонала определенных навыков по выполнению такого рода работ.

Предлагаемый способ проверки и регулировки не несет в себе отклонений от технологии проверки завода-изготовителя, а лишь усовершенствует ее, сводя всю проверку к банальной работе с ЭВМ, не требующей при этом специальной подготовки. Данный способ позволяет проверить оба двигателя за считанные минуты и получить точные данные для их регулировки.

Все это ведет к сохранению ресурса двигателей, экономии топлива и времени.

**Ключевые слова:** входной направляющий аппарат, энкодер, турбовальный авиационный двигатель ТВЗ-117, термopара, контроль, силовая установка, турбина компрессора, частота вращения турбокомпрессора, положение лопаток входного направляющего аппарата.

## THE METHOD OF CHECKING AND ADJUSTING THE CHARACTERISTICS OF THE INPUT GUIDE APPARATUS TYPE OF ENGINE TB3-117 WITH THE USE OF COMPUTER TECHNOLOGY

The most important requirement that you must provide in the process of operation of the aircraft, is a high safety at a low cost transportation, which largely depend on the reliability and efficiency of the engines installed on the aircraft. On this basis, the aircraft engines must meet the following basic requirements:

- ensuring specified flight technical data of the aircraft;
- a great resource and reliability under all possible conditions of use of the aircraft;
- efficiency in all modes of operation of the power plant.

Because the process operation of the aircraft (especially in areas with a high content in the atmosphere, abrasive particles) the wear of the blades of the power plant, there is a need of adjustment in order to align Yes standards specified by the manufacturer performance.

The technology of verification characteristics of the input guide apparatus type of engine TV3-117 is a complex and relatively long process that requires personnel with certain skills to implement such work.

The proposed method of checking and adjusting does not carry deviations from the technology validation of the manufacturer, but only improves it, reducing the whole test to just working with computers, without requiring special training. This method allows to test both engines in a matter of minutes and obtain accurate data to adjust.

All of this leads to preserving engine life, save fuel and time.

**Key words:** inlet guide vanes, encoder, aircraft turboshaft engine TB3-117, thermocouple, control, power plant, turbine compressor, speed of turbocharger, position of blades input guide apparatus.

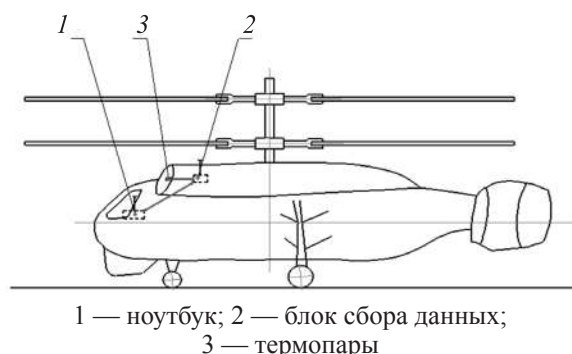
Активно развивающийся в настоящее время вертолетный рынок вызывает обострение конкуренции между производителями. В целях получения преимущества перед конкурентами на предприятиях осуществляются непрерывная модернизация и сертификация выпускаемой продукции, техническое перевооружение, совершенствуется система менеджмента качества в соответствии с требованиями международных стандартов.

В основе эффективной работы двигателей типа ТВ3-117 лежит «Входной направляющий аппарат» (ВНА) лопаточного типа. Аппарат ограничивает поток забираемого двигателем воздуха при уменьшении его потребления. При этом происходит плавное регулирование производительности с одновременным пропорциональным изменением энергопотребления [1, 2].

В процессе выполнения работ по проверке характеристик углов направляющих аппаратов двигателей типа ТВ3-117, устанавливаемых на вертолёты Ка-27, Ка-28, Ка-31, Ка-32, Ми-17, Ми-8МТ, Ми-171, Ми-172, постоянно возникают трудности при снятии показаний

с лимба для замера углов поворота ВНА при работающем двигателе и построении реальной характеристики ВНА.

Методика проведения проверки характеристик ВНА (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Схема проведения работ, связанных с регулировкой входного направляющего аппарата

Перед началом выполнения работ требуется выполнить следующие требования:

- командир воздушного судна запрашивает метеостанцию о погодных условиях, скорость ветра должна быть не более 5 м/с;
- для уменьшения влияния задува выхлопных газов вертолет располагается на



открытой площадке против ветра или с направлением ветра около 20° справа.

Далее производится запуск двигателей и забиваются в программу «Характер» заданные и фактические значения частоты вращения турбокомпрессора (после трёхминутного режима), полученные путём визуального наблюдения за индикатором тахометра двигателя.

Далее по запросу от ноутбука через блок согласования по радиоканалу происходит опрос блока сбора данных (2 на рисунке 1) о положении лопаток направляющего аппарата турбокомпрессора и температуры атмосферного воздуха на входе в двигатель.

В качестве датчика, определяющего положения лопаток ВНА, выбран энкодер абсолютного типа с использованием системы исчисления — код Грея [3].

Применение сенсора, основанного на кодах Грея, обусловлено:

- отсутствием ошибок инициализации (при запуске системы ясно, в каком положении находимся);
- отсутствием ошибок при подсчете импульсов на границах, «дребезжание» легко определяется по направлению;
- возможностью определить направление вращения;
- отсутствием проблемы с граничными положениями — меняется одновременно не более 1 бита [4].

Далее программа производит расчет и выводит результат настроек направляющего

аппарата. График зависимости угла поворота лопаток от приведенных оборотов компрессора строится по замеренным приборами частоте вращения турбины компрессора и температуре атмосферного воздуха.

Схема на рисунке 2 показывает принцип работы блока сбора данных (БСД) и его связь с ноутбуком через блок согласования.

Блок сбора данных выполнен в отдельном корпусе и состоит из микроконтроллера (МК), который обеспечивает опрос датчика положения лопаток ВНА — энкодера (Э), датчиков измерения температуры — термопар и схемы приемопередатчика (ПП), которая обеспечивает передачу данных в ноутбук (ПК) по радиоканалу через блок согласования (БС).

Поскольку блок сбора данных является полностью автономным, он имеет встроенный источник питания — литиевый элемент 3 В. Ток потребления покоя составляет менее 1 мкА, ток потребления при передаче данных около 8,5 мА.

Блок согласования (БС) также выполнен в отдельном корпусе и состоит из микроконтроллера (МК), приемопередатчика (ПП) и схемы согласования (ССЗ) энергетических уровней с защитой от статического электричества для связи с ноутбуком.

Управление блоком сбора данных осуществляется со стороны ноутбука. Расчет характеристик параметров ВНА производится по специальной программе «Характер» на ноутбуке.

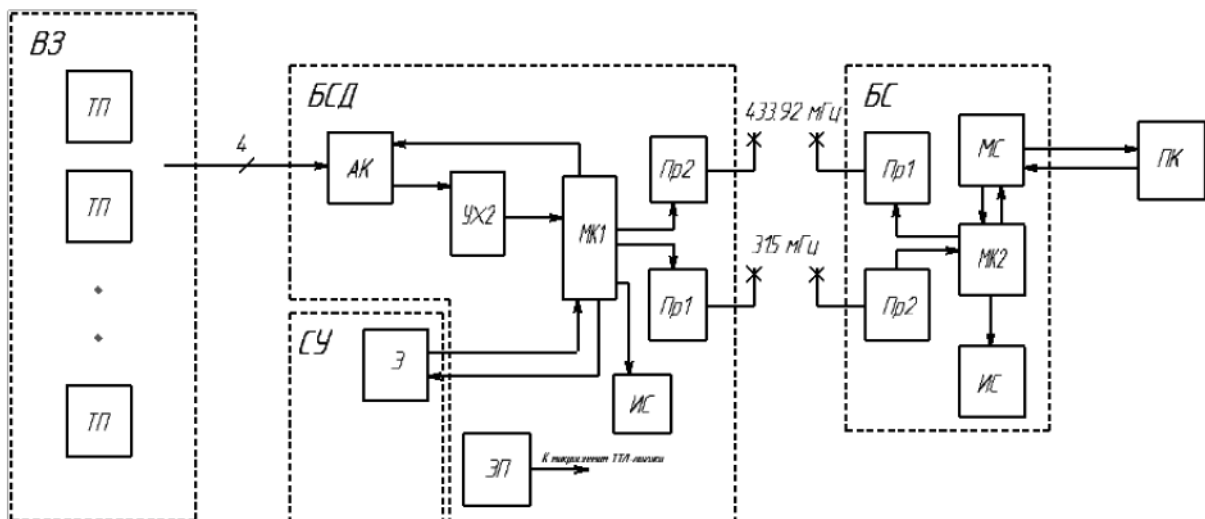


Рисунок 2. Электрическая функциональная системы контроля и регулировки параметров ВНА

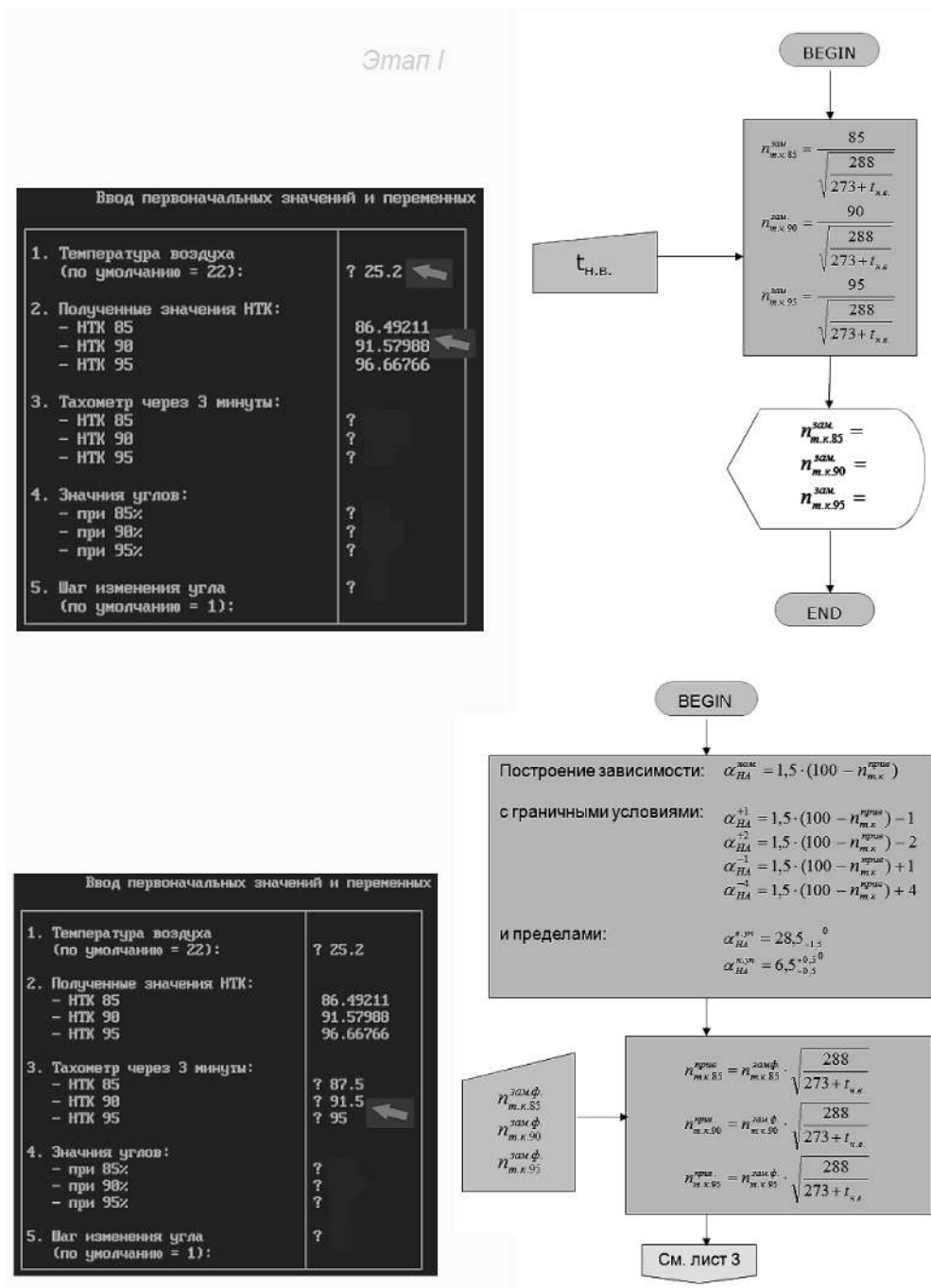


Рисунок 3. Первый этап алгоритма программы «Характер»

Рассмотрим алгоритм работы программы «Характер».

На первом этапе (рисунок 3) в программу поступают данные о температуре наружного воздуха  $t_{н.в.}$ , и вводятся замеренные значения показаний частоты вращения турбокомпрессора  $n_{т.к.зам.}$ .

Далее прямым движением рычага отдельного управления двигателем (РРУД) без корректировки частоты вращения  $n_{т.к.}$  в сторону снижения двигатель выводится на режимы, приблизительно соответствующие  $n_{т.к.пр.} = 85\%$ , 90% и 95%. На каждом режиме в программу

вводится значение  $n_{т.к.зам.}$  непосредственно после изменения положения РРУД и через три минуты [5].

На втором этапе (рисунок 4) проводится анализ полученной характеристики ВНА. Если полученная характеристика находится в зоне возможной корректировки положения лопаток ВНА, то выводятся рекомендации регулировочных работ. Если значения характеристики не попадают в зону возможной корректировки угла установки ВНА, то принимается решение об отстранения двигателя от эксплуатации.

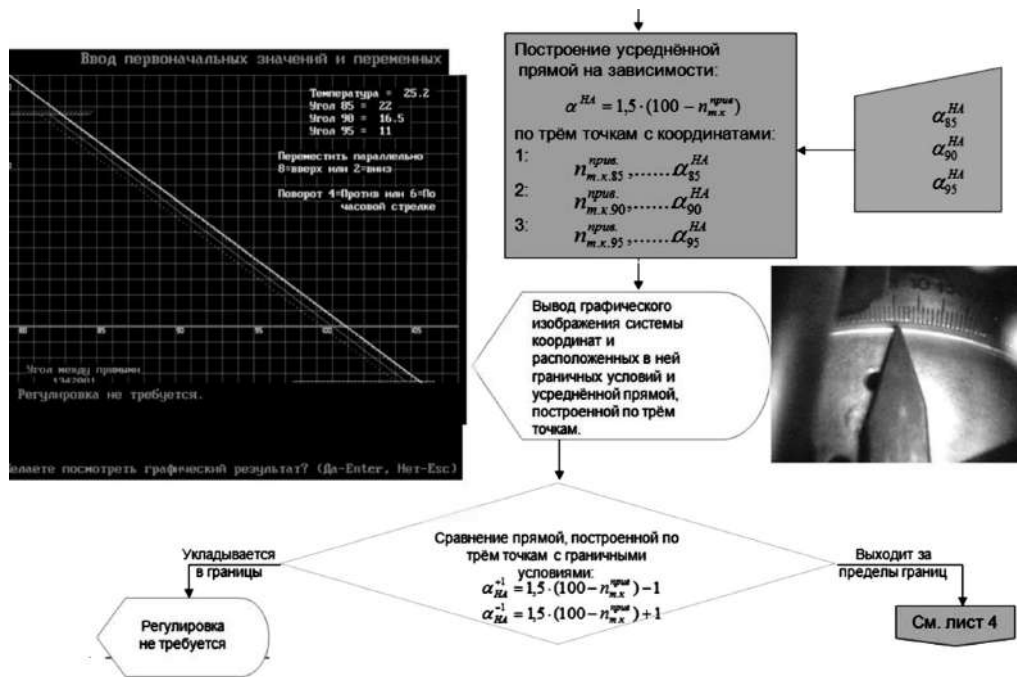


Рисунок 4. Второй этап алгоритма программы «Характер»

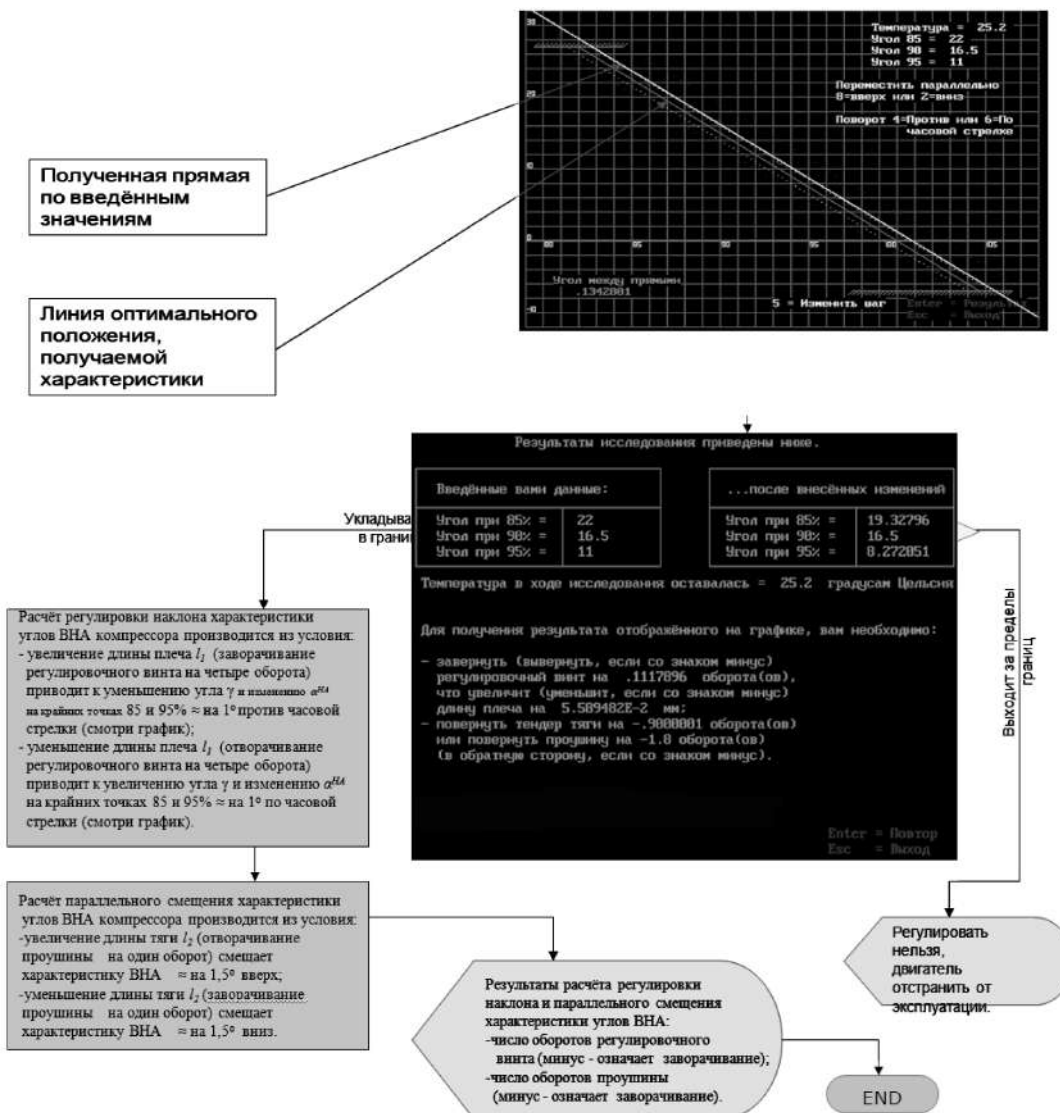


Рисунок 5. Построение графика зависимости угла поворота от приведенной частоты вращения турбокомпрессора

На каждом режиме определяется положение лопаток ВНА и заносится в программу, которая по измеренным значениям строит фактическую характеристику ВНА (рисунок 5).

На рисунке 6 представлена схема проведения регулировок ВНА.

Для регулировки углов установки лопаток ВНА используются тендер тяги (5) и регулировочный винт (1).

### Выводы

Применение данной методики имеет ряд преимуществ перед базовой:

— минимальное время на монтаж и демонтаж;

— минимальная доработка аппаратуры в части крепления датчика определения угла поворота энкодера абсолютного типа, предназначенного для крепления приспособления отметчика У6360-2901;

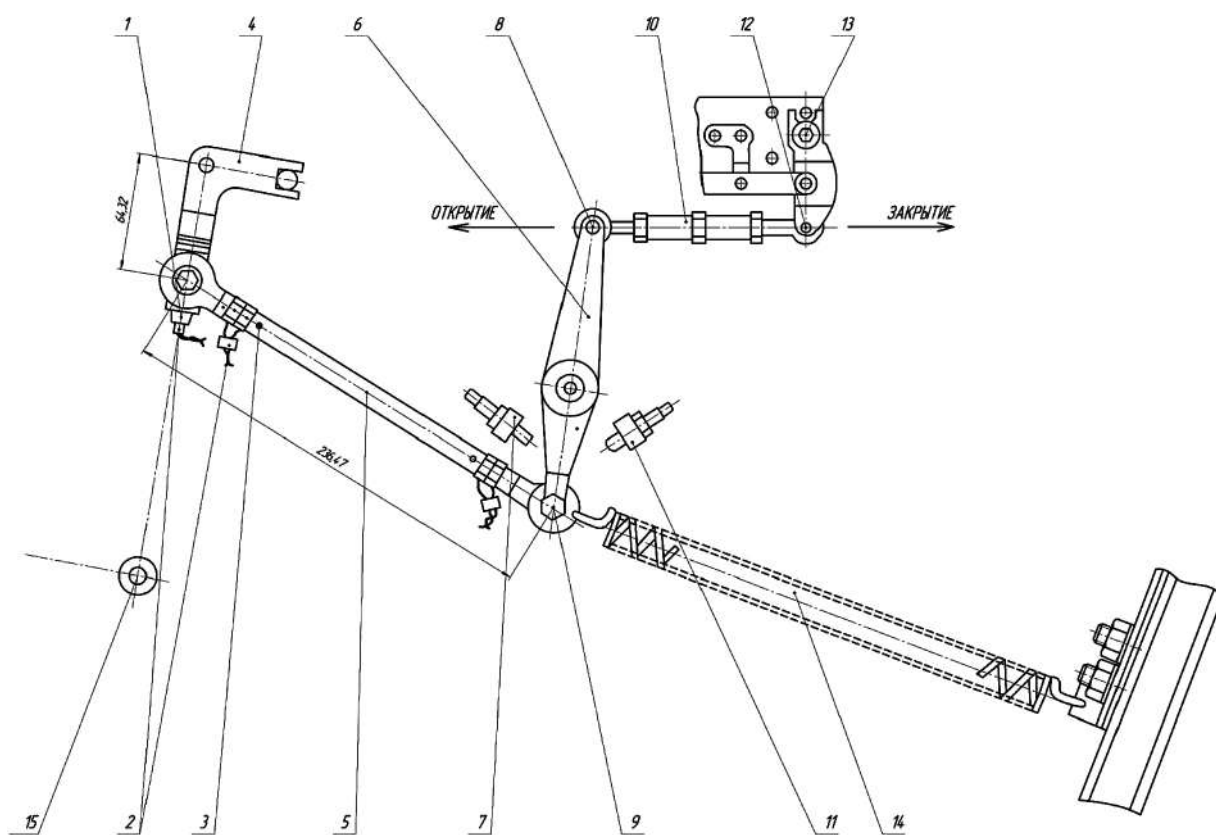
— отсутствие тарировочных работ;

— высокая точность построения фактической характеристики углов ВНА в электронном виде;

— оперативная корректировка характеристики углов ВНА с помощью программы;

— автономность аппаратуры (не нужна б/сеть вертолёта);

— всепогодность.



- 1 — регулировочный винт; 2 — пломба; 3 — контрольное отверстие; 4 — рычаг общего шага;  
 5 — тендер тяги; 6 — силовой рычаг насоса-регулятора; 7 — упор малый газ; 8 — метка Б; 9 — метка А;  
 10 — тяга силового рычага; 11 — упор «Взлет»; 12 — метка В;  
 13 — место установки ключа для поворота лопаток ВНА вручную; 14 — пружина; 15 — энкодер

**Рисунок 6.** Схема проведения регулировок ВНА

### Список литературы

1. Богданов Р.Л., Михеев Д.Д., Скулков Ю.С. Конструкция вертолетов: учебник для авиационных техникумов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.

2. Ефанов В.Н., Токарев В.П. Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы: учеб. пособие для сту-

дентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Приборостроение» и специальности «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы». М.: Машиностроение, 2010. 783 с.

3. Неретина В.В. Основы проектирования цифровых вычислительных устройств приборных комплексов: учеб. пособие по

дисциплине «Цифровые вычислительные устройства и микропроцессоры приборных комплексов». Уфа: УГАТУ, 2010. 145 с.

4. Хелд Г. Технологии передачи данных. СПб.: Питер, Изд. группа BHV, 2003. 720 с.

5. Михеев С.В. Вертолет Ка-32А: руководство по технической эксплуатации (8 книг). Ухта: ОАО «Камов», 1993. 3376 с.

### References

1. Bogdanov R.L., Miheev D.D., Skul'kov Ju.S. Konstrukcija vertoletov: uchebnik dlja aviacionnyh tehnikumov. M.: Mashinostroenie, 1990. 272 s.

2. Efanov V.N., Tokarev V.P. Aviacionnye pribory i izmeritel'no-vychislitel'nye komplekсы:

ucheb. posobie dlja studentov vuzov, obuchajushhihsja po napravleniju podgotovki «Priborostroenie» i special'nosti «Aviacionnye pribory i izmeritel'no-vychislitel'nye komplekсы». M.: Mashinostroenie, 2010. 783 s.

3. Neretina V.V. Osnovy proektirovanija cifrovых vychislitel'nyh ustrojstv pribornyh komplekсов: ucheb. posobie po discipline «Cifrovye vychislitel'nye ustrojstva i mikroprocessory pribornyh komplekсов». Ufa: UGATU, 2010. 145 s.

4. Held G. Tehnologii peredachi dannyh. SPb.: Piter, Izd. gruppa BHV, 2003. 720 s.

5. Miheev S.V. Vertolet Ka-32A. Rukovodstvo po tehnicheckoj jekspluatácii (8 knig). Ukhta: ОАО «Kamov», 1993. 3376 s.



**Балтин Р. Р.**  
**Baltin R. R.**

магистрант кафедры  
«Автоматизация  
технологических процессов  
и производств»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Краснов А. Н.**  
**Krasnov A. N.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Автоматизация  
технологических процессов  
и производств»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация



**Майский Р. А.**  
**Maiski R. A.**

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

УДК 681.5:621.396.13

## СИСТЕМА МОНИТОРИНГА УТЕЧЕК ГАЗА ЧЕРЕЗ ПРОДУВОЧНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

Одной из главных проблем, возникающих при транспортировке природного газа по магистральным газопроводам, является образование утечек, что негативно сказывается на экологической обстановке окружающей среды, способствует возникновению взрыво- и пожароопасных ситуаций, а также составляет весьма значительную часть финансовых потерь. В частности, согласно исследованиям ООО «Газпром ВНИИГАЗ», среднее значение утечек по ПАО «Газпром» составляет 0,3 м<sup>3</sup>/ч на 1 км трубопровода. Именно поэтому обнаружение удельных потерь метана как доминирующего компонента природного газа на сегодняшний день является актуальной задачей автоматизации газотранспортных систем.

В статье предложена концептуальная модель системы мониторинга утечек метана, построенная на базе перспективных технологий LPWAN, позволяющих передавать сигналы измерительной информации на расстояния в несколько десятков километров, используя частоты нелицензируемого частотного диапазона. Приведены существующие решения в области LPWAN, обозначены преимущества и недостатки технологии в целом.

Помимо выбора структуры системы мониторинга, а также технологии передачи измерительной информации очень важно спрогнозировать время ее автономной работы, позволяющее получить представление и рекомендации по обслуживанию и дальнейшей эксплуатации системы. Информация об автономной работе сети приводится производителями сетевых технологий довольно часто, однако на практике такие данные существенно варьируются в зависимости от аппаратной составляющей (узлов) сети.

Для получения верной информации о длительности автономной работы очень часто пользуются специальными формулами, позволяющими рассчитать энергопотребление узла сети. В статье рассмотрены наиболее часто используемые на практике формулы расчета энергии, потребляемой узлом, а также предложена формула расчета энергопотребления узла, учитывающая как технические параметры оборудования, входящего в состав сетей и влияющего на их энергоемкость, так и расписание передачи информации, а также обладающая прогностической составляющей.

**Ключевые слова:** продувочный трубопровод, беспроводные технологии, LPWAN, мониторинг удаленных объектов, утечки газа, сеть сбора информации, расчет энергопотребления, транспорт газа, передача данных на дальние расстояния, концептуальная модель системы мониторинга утечек газа.

## GAS LEAK MONITORING SYSTEM THROUGH PURGEABLE PIPELINES

One of the main problems that arise when transporting natural gas through main gas pipelines is the formation of leaks, which adversely affects the environmental situation of the environment, contributes to the occurrence of explosive and fire-hazardous situations, and also constitutes a significant part of financial losses. In particular, according to «Gazprom VNIIGAZ», the average leakage rate for Gazprom is 0.3 cubic meters per hour per kilometer of the pipeline. That is why the detection of specific losses of methane, as the dominant component of natural gas, today is quite an actual task of automation of gas transmission systems.

The article proposes a conceptual model of a methane leakage monitoring system based on advanced LPWAN technologies that allow the transmission of measurement information signals over distances of several tens of kilometers using frequencies of an unlicensed frequency range. Present solutions are presented in the field of LPWAN, the advantages and disadvantages of the technology as a whole are indicated.

In addition to choosing the structure of the monitoring system, as well as the technology for transmitting the measurement information, it is very important to predict the time of its autonomous work, which allows getting an idea and recommendations for servicing and further operation of the system. Manufacturers of wireless network technologies often provide indicative data on the autonomous operation of the network, but this information can vary significantly in practice, depending on the hardware component (nodes) of the network. To obtain the correct information about the duration of autonomous work, very often use special formulas that allow you to calculate the power consumption of a network node. The most frequently used formulas for calculating the energy consumed by a node are considered in the article, and a formula for calculating the energy consumption of a node is proposed. In addition to expanding the mathematical model of the network, the transmission schedule of information and technical parameters of network equipment affecting their energy intensity were taken into account.

**Key words:** purge pipeline, wireless technology, LPWAN, remote monitoring, gas leakage, information collection network, energy consumption calculation, gas transportation, long-distance data transmission, conceptual model of gas leak monitoring system.

Одной из главных проблем, возникающих при транспортировке природного газа по магистральным газопроводам, является образование утечек, что негативно сказывается на экологической обстановке окружающей среды, способствует возникновению взрыво- и пожароопасных ситуаций, а также составляет значительную часть финансовых потерь [1, 2]. В частности, согласно исследованиям ООО «Газпром ВНИИГАЗ», среднее значение утечек по ПАО «Газпром» составляет 0,3 м<sup>3</sup>/ч на 1 км трубопровода. Таким образом, для участка магистрального газопровода длиной, например, 200 км потери составят 60 м<sup>3</sup>/ч и 518,4 тыс. м<sup>3</sup> в год.

За последние годы был проведен ряд крупномасштабных исследований по обнаружению утечек метана как доминирующего компонента природного газа от газотранспортных объектов. В процессе исследований рассчитывались объемы утечек на линейной части магистральных газопроводов от арматуры и свечей свечных кранов в закрытом положе-

нии. Анализ полученных результатов показал, что в большинстве случаев основная доля потерь метана приходится на свечи продувочных трубопроводов и составляет порядка 70–80 % от суммарного объема всех утечек [3].

Таким образом, создание системы комплексного мониторинга и оперативного обнаружения утечек газа в продувочных трубопроводах является довольно перспективной задачей автоматизации газотранспортных систем.

При проектировании подобной системы необходимо, в первую очередь, учесть то, что средства обнаружения утечек ввиду большой протяженности трубопровода располагаются на достаточно обширной территории, что существенно сказывается на объеме подготовительных и монтажных работ, а также затрудняет обслуживание системы. Наиболее рациональным подходом к реализации системы мониторинга видится ее организация на базе энергоэкономных беспроводных

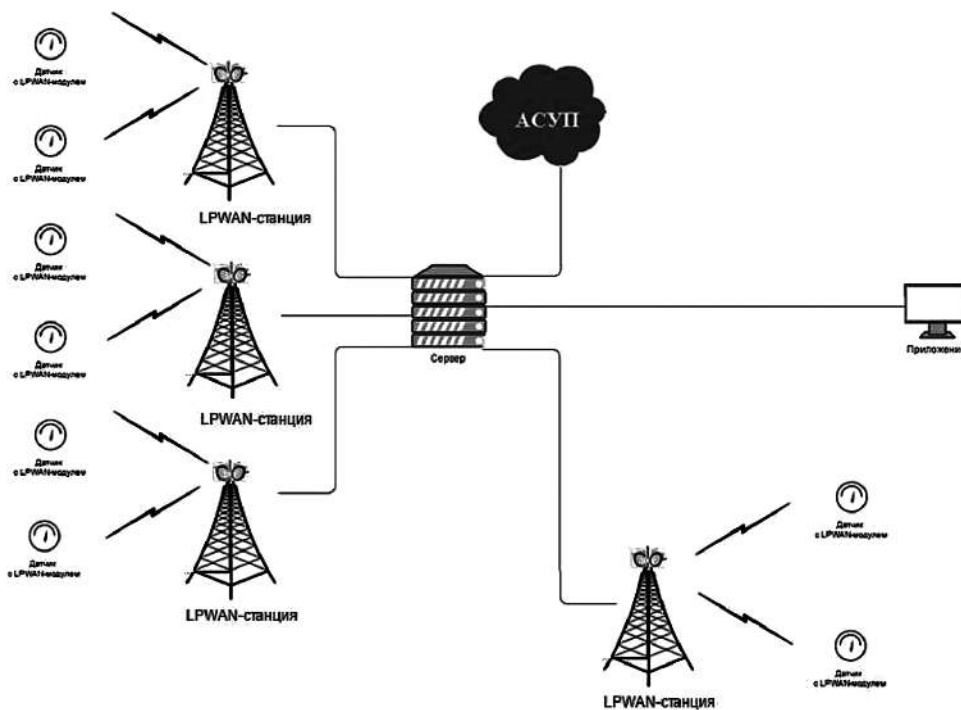


Рисунок 1. Структура системы мониторинга утечек газа со свечей продувочных трубопроводов

технологий и аппаратных средств с максимальным автономным временем работы. На рисунке 1 представлен упрощенный вариант такой системы.

Предлагаемая система состоит из автономных газовых сенсоров с возможностью подключения двух дополнительных измерительных каналов. Передача измерительной информации от датчиков на базовую станцию осуществляется по радиоканалу либо напрямую, либо ретрансляцией приборами из состава сети. На АРМ оператора производится отображение и архивация собранных данных, а также их отправка на верхний уровень АСУ ТП. Подобный подход позволяет расширить арсенал технических средств газового мониторинга для случаев отсутствия в зоне контроля систем электроснабжения и кабельного телеизмерения.

С целью энергосбережения в автономных сенсорах предполагается реализовать периодический режим измерения концентрации газов и передачи данных на диспетчерский пульт. Результатом этого будет повышение надежности работы устройства в составе беспроводной сети и увеличение времени автономной работы за счет включения в состав беспроводного датчика независимого питания для цифровой и аналоговой измерительной части, а также возможности полного

отключения питания измерительной части в «спящем» режиме работы.

В составе автономного преобразователя могут использоваться как обычные штыверные антенны, так и узконаправленные логопериодические или панельные антенны для обеспечения большей дальности связи.

Анализ беспроводных технологий передачи данных показал, что наиболее подходящим вариантом будет организация системы мониторинга на базе LPWAN-сети.

LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) представляет собой беспроводную технологию организации глобальных сетей с низким энергопотреблением. Традиционными областями применения LPWAN являются телеметрия и межмашинное взаимодействие. Архитектурой сети предусматривается также и наличие обратных каналов связи для управления устройствами. Для передачи информации применяются радиоканалы нелицензируемого спектра частот: 2,4 ГГц, 868/915 МГц, 433 МГц, 169 МГц.

К сильным сторонам LPWAN-технологии прежде всего следует отнести:

— дальность передачи информации более 10 км (в зависимости от условий окружающей среды и используемого протокола максимальное расстояние передачи может достигать 50 км);



— использование нелицензируемого частотного диапазона, что снимает необходимость получения частотного разрешения и платы за использование радиоканала;

— низкое энергопотребление сети, способное обеспечить автономную работу входящих в нее устройств на 5–10 лет;

— высокую масштабируемость сети на больших территориях;

— возможность управлять временем задержки соединения, что позволяет интегрировать в сеть устройства, требующие прогнозируемого времени отклика [4].

К недостаткам LPWAN обычно относят:

— довольно низкую скорость передачи данных, которая лежит в пределах от сотен бит/с до десятков кбит/с в зависимости от используемого протокола передачи информации;

— небольшое количество передаваемых сообщений в сутки (50–150 сообщений).

В настоящее время уже используются следующие решения для LPWAN: SIGFOX, RPMA, WAIoT, LoRaWAN, Стриж, среди которых наиболее динамично развивающимся предстает LoRaWAN — открытый стандарт, объединяющий протокол для организации высокочастотных (поддержка до 1000000 устройств) сетей и особый метод модуляции LoRa (LongRange), который основывается на технологии модуляции с расширенным спектром и вариации линейной частотной модуляции [5]. LoRaWAN позволяет осуществлять двунаправленную передачу информации на расстоянии до 15 км с адаптивной скоростью передачи данных 0,3–50 Кбит/с и возможностью выбора пользователем размера пакета данных.

Помимо выбора структуры системы мониторинга, а также технологии передачи измерительной информации очень важно спрогнозировать время ее автономной работы, позволяющее получить представление и рекомендации по обслуживанию и дальнейшей эксплуатации системы [6]. Информация об автономной работе сети приводится производителями сетевых технологий довольно часто, однако на практике такие данные существенно варьируются в зависимости от аппаратной составляющей (узлов) сети. Для получения верной информации о длительности автономной работы очень часто пользу-

ются специальными формулами, позволяющими рассчитать энергопотребление узла сети. На сегодняшний день наиболее используемыми на практике являются следующие соотношения.

Энергия, потребляемая мотом за один цикл с заданным количеством опросов:

$$i_i = \left\{ \tau \cdot n \cdot (4t_r + t_{mc} + t_m + t_c + 2 \cdot (t_l + t_t + t_p)) + (10R_{adr} + R_{ads} + 5 \cdot (R_s + R_{crc} + R_{ser})) \cdot C \right\} i_s + 2n \cdot (2t_r + t_l + t_p) \cdot i_r + 3n \cdot (2R_{adr} + R_s + R_{crc} + R_{ser}) \cdot C i_r + n \cdot (t_{mc} + t_c) \cdot i_{mc} + n \cdot t_m \cdot i_{adc} + 2n \cdot t_t \cdot i_t + n \cdot (4R_{adr} + R_{adc} + 2 \cdot (R_s + R_{crc} + R_{ser})) \cdot C i_t,$$

где  $i_i$  — ток, потребляемый мотом за 1 цикл;  
 $\tau$  — длительность цикла;  
 $n$  — количество запросов за цикл;  
 $t_{mc}$  — время включения микроконтроллера;  
 $t_t$  — время включения передатчика;  
 $t_r$  — время включения приемника;  
 $t_m$  — время измерения;  
 $t_p$  — время ожидания сигнала приемником;  
 $t_l$  — время прослушивания канала;  
 $t_c$  — время обработки информации микроконтроллером;

$i_s$  — ток, потребляемый в режиме сна;  
 $i_{mc}$  — ток, потребляемый микроконтроллером;

$i_t$  — ток, потребляемый передатчиком;  
 $i_r$  — ток, потребляемый приемником;  
 $i_{adc}$  — ток, потребляемый аналого-цифровым преобразователем;

$R_{adc}$  — количество символов результата измерения;

$R_{adr}$  — количество символов адреса;  
 $R_s$  — количество символов синхронизации;

$R_{ser}$  — количество служебных символов;  
 $R_{crc}$  — разрядность контрольной суммы;  
 $C$  — скорость передачи информации [7].

Энергия, потребляемая узлом сети за один цикл:

$$E_e = E_{slep} + E_{MCU} + E_{rcv} + E_{trans} + E_{ather},$$

где  $E_{slep}$  — энергия, потребляемая узлом в фазе сна;

$E_{MCU}$  — энергия, потребляемая узлом во время работы микроконтроллера или вычислительного ядра приемопередатчика при его отсутствии;

$E_{rcv}$  — энергия, потребляемая узлом во время приема;

$E_{trans}$  — энергия, потребляемая узлом во время передачи;

$E_{ather}$  — энергия, потребляемая узлом в других режимах (режим пробуждения и др.) [8].

Приведенные подходы к математическому описанию энергопотребления узла сети, несмотря на достойный охват составляющих процесса приемопередачи, все же оставляют возможность их улучшения за счет привнесения прогностической составляющей. Модифицированная формула была предложена в работе [9]:

$$e_i = T_1 \cdot e_s + n \cdot t_m \cdot (e_m + e_w - e_s) + n \cdot t_c \cdot (e_w - e_s) + n \cdot t_w \cdot (e_w - e_s) + n \cdot t_p \cdot (e_w + e_r - e_s) + ((2n - 1) \cdot t_r) \cdot (e_r + e_w - e_s) + ((2n - 1) \cdot t_i) \times (s_i + n \cdot (e_w - e_s)) + ((2n - 1) \cdot t_i) \times (z_i + e_w - e_s),$$

где  $t_m$  — время, затрачиваемое аналого-цифровым преобразователем для измерения всех необходимых параметров;

$t_c$  — время, затрачиваемое микропроцессором на обработку значений, полученных от аналого-цифрового преобразователя;

$t_w$  — время перехода микропроцессора из спящего режима в рабочий;

$t_p$  — временной интервал, отсчитываемый от момента включения приемника данных до начала передачи информации передатчиком;

$t_r$  — время, затрачиваемое радиомодулем на переход в режим приема;

$t_i$  — время, затрачиваемое радиомодулем на переход в режим передачи;

$e_s$  — ток, потребляемый в спящем режиме микропроцессором;

$e_m$  — ток, потребляемый аналого-цифровым преобразователем в режиме измерения;

$e_w$  — ток, потребляемый в рабочем режиме микропроцессором;

$e_r$  — ток, потребляемый радиомодулем в режиме приема;

$T_1$  — длительность цикла сбора данных (реальная);

$n$  — среднее ожидаемое количество попыток связи;

$s_i$  — сумма значений энергопотребления радиопередатчика  $i$ -го узла при передаче откликов во все узлы, передающие данные напрямую узлу  $i$  с учётом необходимых уровней мощности;

$z_i$  — энергопотребление радиопередатчика  $i$ -го узла при передаче пакетов сообщений измерительной информации с учётом требуемого уровня мощности.

Предлагаемый вариант формулы содержит переменные, введение которых было основано на расширении описания сетевого графа, обычно задаваемого множеством, состоящим из подмножеств вершин (узлов сети) и ребер (расстояний между ними), подмножеством минимальных мощностей передатчиков, при которых возможен бесперебойный обмен информацией между узлами. Данное введение позволило рассмотреть работу передающего радиомодуля в экономном режиме, подразумевающим переключение используемых уровней мощности (подобная функция имеется практически у всех современных радиомодулей). Также в предлагаемой формуле были учтены технические параметры оборудования сетей, влияющего на их энергоёмкость и расписание передачи информации.

### Вывод

Таким образом, предлагаемый вариант системы мониторинга утечек газа от свечей продувочных трубопроводов, реализованный на базе современных технологий LPWAN, позволит своевременно предупредить возникновение взрыво- и пожароопасных ситуаций и, как следствие, избежать значительных финансовых потерь, а применение формулы расчета энергопотребления узла сети с привнесённой прогностической составляющей предоставит возможность рассчитать время автономной работы как всей сети, так и ее элементов в частности, что может быть полезно при планировании обслуживания и эксплуатации системы.

### Список литературы

1. Гумеров А.Г., Шагиев Р.Г., Халлыев Н.Х. Аварийное истечение из наклонных участков трубопроводов сжиженных углеводородных газов // Проблемы сбора,

подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. Вып. 1 (87). С. 96–102.

2. Коркишко А.Н., Рахматуллин Ш.И., Карамышев В.Г. Локация утечек нефти, нефтепродуктов и нестабильных углеводо-

родных жидкостей на магистральных трубопроводах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. Вып. 2 (84). С. 142–147.

3. Акопова Г.С., Дорохова Е.В., Попов П.Б. Оценка объемов потерь метана с утечками от технологического оборудования газотранспортных объектов ОАО «Газпром» // Вести газовой науки. 2013. № 2(13). С. 63–67.

4. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-Range Communications in Unlicensed Bands: the Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios // IEEE Wireless Communications. 2016. № 23. P. 2–8.

5. Верхулевский К. LoRa – все, что вы хотели знать об этом // Компоненты и технологии. 2016. № 3(176). С. 90–98.

6. Майский Р.А., Хафизов Ф.М., Мухаметзянов И.З., Горлов С.Н. Мониторинг гидратообразования в системах добычи и транспорта природного газа в условиях холодных климатических зон // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. № 4. С. 109–114.

7. Зеленин А.Н., Власова А.В. Анализ энергоциклов узлов беспроводных сенсорных сетей // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. № 3. С. 13–17.

8. Галкин П.В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей // ScienceRise. 2014. № 2 (2). С. 55–61.

9. Павлова З.Х., Балтин Р.Р., Краснов А.Н., Майский Р.А. Об основных аспектах проектирования беспроводных сетей параметрического мониторинга удаленных объектов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12 (54). Ч. 3. С. 161–164.

### References

1. Gumerov A.G., Shagiev R.G., Khalilyev N.Kh. Outflow from ruptured Inclined Segments of Liquefied Hydrocarbon Gas Pipelines // Problemy sbora, podgotovki i

transporta nefli i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products, 2012, Issue 1 (87), Pp. 96–102. (in Russ.).

2. Korkishko A.N., Rakhmatullin Sh.I., Karamyshev V.G. Location of Oil, Products and Unstable Hydrocarbon Liquids Leakages from Main Pipelines // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefli i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products, 2011, Issue 2 (84), Pp. 142–147. (in Russ.).

3. Akopova G.S., Dorokhova E.V., Popov P.B. Assessment of Methane Losses with Leaks from Technological Equipment of Gazprom's Gas Transmission Facilities // Lead Gas Science. 2013. № 2 (13). P. 63–67.

4. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-Range Communications in Unlicensed Bands: the Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios // IEEE Wireless Communications. 2016. № 23. P. 2–8.

5. Verkhulevsky K. LoRa — Everything You Wanted to Know about This // Components & Technologies. 2016. № 3 (176). P. 90–98.

6. Maiski R.A., Khafizov F.M., Mukhametzyanov I.Z., Gorlov S.N. Monitoring Hydrate Formation in the Production System and Natural Gas Transport in Cold Climates // Neftegazovoe delo. 2015. Т. 13. № 4. P. 109–114.

7. Zelenin A.N., Vlasova A.V. Analysis of Energy Cycles of Wireless Sensor Network Nodes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2012. № 3. P. 13–17.

8. Galkin P.V. Analysis of Power Consumption of Wireless Sensor Network Nodes // ScienceRise. 2014. № 2 (2). P. 55–61.

9. Pavlova Z.X., Baltin R.R., Krasnov A.N., Maiski R.A. About the Main Aspects of Design of Wireless Network Parametric Monitoring Remote Objects // International Research Journal. 2016. № 12 (54). Part 3. P. 161–164.



**Мукаев Р. Ю.**  
**Muksayev R. Yu.**

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



**Федотова Ю. А.**  
**Fedotova Yu. A.**

старший преподаватель кафедры  
«Информационно-измерительная техника»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация

УДК 621.374.5

## РАСЧЕТ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ВОЛНОВОДЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В данной статье авторами ставится задача изучения влияния различных факторов на скорость ультразвуковых волн в волноводе.

Приведено решение дифференциальных уравнений, которые описывают распространение продольных и поперечных волн вдоль магнитострикционного волновода. Полученные зависимости дают возможность произвести расчеты механических напряжений, возникающих в магнитострикционном волноводе ленточного типа.

Для выявления закономерностей изменения скорости от обобщенного параметра  $H_f V_2$  ( $H$  — толщина волновода,  $f$  — частота,  $V_2$  — скорость поперечных ультразвуковых волн в материале волновода, которая зависит от модуля Юнга) полученная зависимость была записана в относительных единицах. Полученное трансцендентное уравнение было решено методом наименьших квадратов только для нулевой моды.

Нулевая мода имеет в выбранном диапазоне частот максимальное значение механического напряжения. Вызванное механическими напряжениями продольное переменное магнитное поле наводит максимальную ЭДС в распределенной по длине волновода катушке. Эта катушка располагается на волноводе и при наличии подвижного постоянного магнита позволяет регистрировать сигналы продольных волн.

Таким образом, электронный блок измеряет интервал времени между моментом возбуждения сигнала сосредоточенной катушкой возбуждения и моментом приема сигнала распределенной приемной катушкой. Этот измеренный интервал времени  $t$  имеет значение, которое прямо пропорционально расстоянию  $x$  между сосредоточенной катушкой и постоянным магнитом, жестко соединенным с объектом, перемещение которого контролируется:  $t = x/V$ , где  $V$  — скорость ультразвуковых волн в волноводе.

Скорость ультразвуковых волн зависит от многих параметров, таких как частота, толщина ленточного волновода, свойства материала волновода (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), температура и т. д.

Авторами впервые была получена уточненная аппроксимирующая зависимость дисперсии продольных ультразвуковых волн нулевой моды от обобщенного параметра. Полученные зависимости были аппроксимированы с погрешностью менее 0,01 % при  $H_f V_2 < 0,3$  для нулевой моды колебаний ультразвуковой волны.

**Ключевые слова:** ультразвуковые волны, механическое напряжение, нулевая мода, дисперсия, магнитострикционный волновод, распределенная катушка, сосредоточенная катушка, аппроксимирующая зависимость.

## ESTIMATION OF ULTRASOUND WAVES VELOCITY IN A WAVEGUIDE OF A MAGNETOSTRICTIVE DISPLACEMENT SENSOR

This paper studies factors influencing the velocity of ultrasound waves in a waveguide.

The solution of differential equations which describe longitudinal and transverse waves propagation along the magnetostrictive waveguide is given. The obtained dependences provide opportunities to calculate a mechanical stress in the magnetostrictive waveguide of a tape shape.

The expression is given as nondimensional to reveal the pattern of velocity changes on a combined parameter  $H_f V_2$  ( $H$  — waveguide thickness,  $f$  — frequency,  $V_2$  — velocity of the transverse ultrasound waves in a waveguide material which depends on Young's modulus). The obtained transcendental equation was solved by least squares method for a zero mode only.

The zero mode has a maximum value of the mechanical stress in the chosen frequency band. Longitudinal alternating magnetic field, which is produced by the mechanical stress, generates maximum electromotive force in a coil distributed along the waveguide length. The coil is located on the waveguide and, having a permanent magnet, allows registering signals of the longitudinal waves.

Thus, an electronic unit measures time interval between the time of signal excitation by the lumped coil and the time of signal reception by the distributed coil. This time interval  $t$  is directly proportional to a distance  $x$  between the lumped coil and the permanent magnet which is rigidly connected with an object being controlled:  $t=x/V$ , where  $V$  — ultrasound waves velocity in the waveguide.

Ultrasound waves velocity depends on many parameters such as frequency, tape shaped waveguide thickness, waveguide material properties (Young's modulus, Poisson's constant), temperature and etc.

The authors get a corrected approximating longitudinal ultrasound waves dispersion dependence on the combined parameter for first time. The obtained equations are approximated with 0.01 % error at  $H_f V_2 < 0,3$  for the ultrasound waves zero mode.

**Key words:** ultrasound waves, mechanical stress, zero mode, dispersion, magnetostrictive waveguide, distributed coil, lumped coil, approximating dependence.

В настоящее время широко ведутся работы по разработке преобразователей параметров движения, в которых используются новые физические явления и эффекты. Магнито-стрикционные датчики перемещений являются сравнительно новым типом устройств, выпускаемых промышленностью. Эти датчики при соответствующем выборе материалов позволяют измерять параметры движения в диапазоне температур от минус 150 °С до 400 °С. Диапазон измеряемых перемещений достигает 10000 мм, нелинейность статической характеристики не превышает 0,1 %.

По мнению авторов, наиболее целесообразно, в частности, применение магнито-стрикционных датчиков для измерения перемещений в герметичных резервуарах. Для этой области применения магнито-стрикционные датчики перемещений содержат магнит, соединенный с контролируемым объектом внутри герметичного резервуара, магнито-стрикционный волновод с обмотками, кото-

рые располагаются снаружи, и электронную схему обработки информационного сигнала [1, 2].

Электронный блок измеряет интервал времени между моментом возбуждения сигнала сосредоточенной катушкой возбуждения и моментом приема сигнала распределенной приемной катушкой. Этот измеренный интервал времени  $t$  имеет значение, которое прямо пропорционально расстоянию  $x$  между сосредоточенной катушкой и постоянным магнитом, жестко соединенным с объектом, перемещение которого контролируется:  $t = x/V$ , где  $V$  — скорость ультразвуковых волн в волноводе. Перемещение магнита пропорционально времени прохождения ультразвуковых волн, возбуждаемых одной обмоткой и принимаемых другой. Для возбуждения и приёма волн используется прямой и обратный магнито-стрикционный эффекты. Одна из обмоток выполняется распределенной вдоль всей длины перемещения магнита.

Другим вариантом может быть применение волновода с двумя катушками, одна из которых механически соединена с подвижным объектом, перемещение которого контролируется [3].

В данной работе получены новые уточненные соотношения для расчета скорости волн, что позволяет определить чувствительность преобразователя с учетом геометрических размеров волновода, несущей частоты ультразвуковых волн и модуля упругости материала волновода.

Выявление закономерностей изменения скорости было проведено только для нулевой моды. Нулевая мода имеет в выбранном диапазоне частот максимальное значение механического напряжения. Вызванное механическими напряжениями продольное переменное магнитное поле наводит максимальную ЭДС в распределенной по длине волновода катушке и позволяет регистрировать сигналы продольных волн [4].

В общем виде задача определения фазовой скорости волн была решена для распространения ультразвуковых волн в волноводе в виде пластины [5, 6] без учета магнитоэлектрических свойств материала пластины.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: волна является гармонической, толщина ленточного волновода на порядок превышает его толщину [5], коэффициент Пуассона  $\nu$  материала волновода от внешних условий не зависит.

Дифференциальные уравнения, описывающие волны в волноводе, можно записать в виде [7]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} + K_1^2 U &= 0 \\ \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} + K_2^2 W &= 0 \end{aligned} \right\},$$

где  $U$  и  $W$  — механические смещения для продольных и сдвиговых волн в волноводе по осям координат;

$$K_1 = 2\pi f \sqrt{\frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)}} \quad \text{и} \quad K_2 = 2\pi f \sqrt{\frac{2\rho(1+\nu)}{E}} \quad \text{—}$$

константы для продольных и поперечных волн;

$$\rho \text{ — плотность материала волновода;}$$

$f$  — частота;

$E$  — модуль Юнга;

$\nu$  — коэффициент Пуассона.

Механические напряжения в пластине по координатам  $x, y, z$  определяются в виде [7]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz} &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) + \frac{E}{(1+\nu)} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial X \partial Z} \right) \\ \sigma_{xz} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \left( 2 \frac{\partial^2 U}{\partial X \partial Z} + \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \\ \sigma_{xx} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) + \frac{E}{(1+\nu)} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Решение уравнений будем искать в виде:

$$\frac{d^2 F_1(Z)}{dZ^2} - (K^2 - K_1^2) F_1(Z) = 0;$$

$$\frac{d^2 F_2(Z)}{dZ^2} - (K^2 - K_2^2) F_2(Z) = 0;$$

$$U = F_1(Z) e^{j(kx - \omega t)}; \quad W = F_2(Z) e^{j(kx - \omega t)},$$

где  $K$  — волновое число Лэмба,  $K^2 > K_2^2 > K_1^2$ ,  $\omega = 2\pi f$ . Волны в волноводе движутся со скоростями продольных и поперечных волн.

Выразим  $U$  и  $W$  в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U &= C_1 \operatorname{ch}(\gamma_1 Z) e^{j(kx - \omega t)} + C_2 \operatorname{sh}(\gamma_1 Z) e^{j(kx - \omega t)}; \\ W &= C_3 \operatorname{sh}(\gamma_2 Z) e^{j(kx - \omega t)} + C_4 \operatorname{ch}(\gamma_2 Z) e^{j(kx - \omega t)}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4$  — постоянные;  $\gamma_1 = \sqrt{K^2 - K_1^2}$ ,  $\gamma_2 = \sqrt{K^2 - K_2^2}$ .

Напряжения  $\sigma_{xz}$  и  $\sigma_{zz}$  на поверхностях волновода ленточного типа толщиной  $H$  равны нулю.

Уравнения (1) и (2) позволяют получить систему уравнений для определения констант  $C_1, C_2, C_3, C_4$ :

$$\left. \begin{aligned} C_1(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{ch}(\gamma_1 h) + C_2(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{sh}(\gamma_1 h) + \\ + 2C_3 j K \gamma_2 \operatorname{sh}(\gamma_2 h) + 2C_4 j K \gamma_2 \operatorname{ch}(\gamma_2 h) &= 0 \\ C_1(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{ch}(\gamma_1 h) - C_2(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{sh}(\gamma_1 h) - \\ - 2C_3 j K \gamma_2 \operatorname{sh}(\gamma_2 h) + 2C_4 j K \gamma_2 \operatorname{ch}(\gamma_2 h) &= 0 \\ 2C_1 j K \gamma_1 \operatorname{sh}(\gamma_1 h) + 2C_2 j K \operatorname{ch}(\gamma_1 h) - \\ - C_3(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{ch}(\gamma_2 h) - C_4(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{sh}(\gamma_2 h) &= 0 \\ - 2C_1 j K \gamma_1 \operatorname{sh}(\gamma_1 h) + 2C_2 j K \gamma_1 \operatorname{ch}(\gamma_1 h) - \\ - C_3(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{ch}(\gamma_2 h) + C_4(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{sh}(\gamma_2 h) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $h$  — половина толщины волновода.

Новая система уравнений (3) будет иметь решение при условиях:

$$\left. \begin{aligned} C_1(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{ch}(\gamma_1 h) + 2C_4 j K \gamma_2 \operatorname{ch}(\gamma_2 h) &= 0 \\ 2C_1 j K \gamma_1 \operatorname{sh}(\gamma_1 h) - C_4(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{sh}(\gamma_2 h) &= 0 \end{aligned} \right\}; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} C_2(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{sh}(\gamma_1 h) + 2C_3 j K \operatorname{sh}(\gamma_2 h) &= 0 \\ 2C_2 j K \gamma_1 \operatorname{ch}(\gamma_1 h) - C_3(K^2 + \gamma_2^2) \operatorname{ch}(\gamma_2 h) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Решение уравнений (4) и (5) может быть получено при приравнении к нулю их определителей. Получим уравнения:

$$(K^2 + \gamma_2^2) ch(\gamma_1 h) sh(\gamma_2 h) - 4K^2 \gamma_1 \gamma_2 sh(\gamma_1 h) ch(\gamma_2 h) = 0; \quad (6)$$

$$(K^2 + \gamma_2^2)^2 sh(\gamma_1 h) ch(\gamma_2 h) - 4K^2 \gamma_1 \gamma_2 ch(\gamma_1 h) sh(\gamma_2 h) = 0. \quad (7)$$

Из записанных уравнений вычисляются  $C_1, C_2, C_3, C_4$ . После подстановки  $C_3$  и  $C_4$  в уравнения (2) определим  $U$  и  $W$ :

$$U = C_1 ch(\gamma_{1s} Z) e^{j(K_s X - \omega t)} + C_2 sh(\gamma_{1a} Z) e^{j(K_a X - \omega t)}; \\ W = \frac{2jK_s \gamma_{1s} sh(\gamma_{1s} h)}{(K_s^2 + \gamma_{2s}^2) sh(\gamma_{2s} h)} C_1 sh(\gamma_{2s} Z) e^{j(K_s X - \omega t)} + \\ + \frac{2jK_a \gamma_{1a} ch(\gamma_{1a} h)}{(K_a^2 + \gamma_{2a}^2) ch(\gamma_{2a} h)} C_2 ch(\gamma_{1a} Z) e^{j(K_a X - \omega t)}, \quad (8)$$

где  $K_s, K_a$  — волновые числа  $K$ , полученные из уравнений (6) и (7) и удовлетворяющие условиям:

$$\gamma_{1s} = \sqrt{K_s^2 - K_1^2}; \quad \gamma_{2s} = \sqrt{K_s^2 - K_2^2}; \\ \gamma_{1a} = \sqrt{K_a^2 - K_1^2}; \quad \gamma_{2a} = \sqrt{K_a^2 - K_2^2}.$$

Механические деформации  $\delta_X$  и  $\delta_Z$  по осям  $X$  и  $Z$  могут быть выражены из уравнений для твердого деформированного тела:

$$\delta_X = \frac{\partial U}{\partial X} - \frac{\partial W}{\partial Z}; \\ \delta_Z = \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{\partial W}{\partial X}. \quad (9)$$

Используя найденные значения  $U$  и  $W$  получим:

$$\delta_X = \delta_{XS} + \delta_{Xa}; \\ \delta_Z = \delta_{ZS} + \delta_{Za}.$$

$$\delta_{XS} = C_s K_s \left[ \frac{ch(\gamma_{1s} Z)}{sh(\gamma_{1s} h)} - \frac{2\gamma_{1s} \gamma_{2s}}{K_s^2 + \gamma_{2s}^2} \frac{ch(\gamma_{2s} Z)}{sh(\gamma_{2s} h)} e^{j(K_s X - \omega t - \frac{\pi}{2})} \right]; \\ \delta_{ZS} = -C_s \gamma_{1s} \left[ \frac{sh(\gamma_{1s} Z)}{sh(\gamma_{1s} h)} - \frac{2K_s^2}{K_s^2 + \gamma_{2s}^2} \frac{sh(\gamma_{2s} Z)}{sh(\gamma_{2s} h)} e^{j(K_s X - \omega t)} \right]; \quad (10)$$

$$\delta_{Xa} = C_a K_a \left[ \frac{sh(\gamma_{1a} Z)}{ch(\gamma_{1a} h)} - \frac{2\gamma_{1a} \gamma_{2a}}{K_a^2 + \gamma_{2a}^2} \frac{sh(\gamma_{2a} Z)}{ch(\gamma_{2a} h)} e^{j(K_a X - \omega t - \frac{\pi}{2})} \right]; \\ \delta_{Za} = -C_a \gamma_{1a} \left[ \frac{ch(\gamma_{1a} Z)}{ch(\gamma_{1a} h)} - \frac{2K_a^2}{K_a^2 + \gamma_{2a}^2} \frac{ch(\gamma_{2a} Z)}{ch(\gamma_{2a} h)} e^{j(K_a X - \omega t)} \right]; \quad (11)$$

где  $C_s$  и  $C_a$  — постоянные двух групп волн, которые соответствуют исходным уравнениям и граничным условиям для них. Волны можно условно назвать продольными (симметричными с индексом  $S$ ) и изгибными (антисимметричными). В симметричных

волнах деформация симметрична относительно плоскости  $Z = 0$ , т. е. вверху и внизу ленты смещения  $\delta_{XS}$  однонаправлены, а смещения  $\delta_{ZS}$  — разнонаправлены. В антисимметричных волнах вверху и внизу ленты деформации  $\delta_{Xa}$  имеют разные знаки, а деформации  $\delta_{Za}$  — одинаковые.

Магнитострикционные датчики реагируют только на деформацию  $\delta_{XS}$  так как она приводит к наибольшему изменению магнитного потока в волноводе по оси  $X$  из-за одинаковости деформации (вверху и внизу) ленты. Приведенные зависимости дают возможность произвести расчеты деформаций ленты.

Удобно производить расчеты в относительных единицах. Уравнение (6) запишем в виде [7]:

$$\frac{th(Kh\sqrt{1-V^2/V_1^2})}{th(Kh\sqrt{1-V^2/V_2^2})} = -\frac{(2-V^2/V_2^2)^2}{4\sqrt{(1-V^2/V_1^2)(1-V^2/V_2^2)}}, \quad (12)$$

где  $V_1 = \omega/K_1$  и  $V_2 = \omega/K_2$  — скорости распространения продольных и поперечных волн при  $\omega \rightarrow 0$ ;

$V$  — фазовая скорость волны.

Так как  $V_1 > V > V_2$ ,  $th(jx) = j th(x)$  и  $tg(x) = -j th(x)$ , уравнение (12) можно записать в виде:

$$\left(2 - \frac{V^2}{V_2^2}\right) tg\left(Kh\sqrt{\frac{V^2}{V_2^2} - 1}\right) = 4\sqrt{\left(\frac{V^2}{V_2^2} - 1\right)\left(1 - \frac{V^2}{V_1^2}\right)} th\left(Kh\sqrt{1 - \frac{V^2}{V_1^2}}\right). \quad (13)$$

Уравнение (13) не имеет аналитического решения.

Авторами получено новое уточненное аппроксимирующее уравнение с погрешностью менее 0,01 % при условии  $Hf V_2 < 0,3$ . Полученное трансцендентное уравнение было решено методом наименьших квадратов только для нулевой моды.

Относительная фазовая скорость  $V$  в волноводе получена в виде:

$$\frac{V}{V_{nr}} = B_0 + B_1 \left(\frac{Hf}{V_2}\right) + B_2 \left(\frac{Hf}{V_2}\right)^2 + B_3 \left(\frac{Hf}{V_2}\right)^3 + B_4 \left(\frac{Hf}{V_2}\right)^4, \quad (14)$$

где  $V_{nr} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1+v)(1-v)}}$ ;  $V_2 = V_{nr} \sqrt{\frac{1-v}{2}}$ .

Коэффициенты при  $v = 0,3$  получены равными:  $B_0 = 0,9999$ ,  $B_1 = 0,0014$ ,  $B_2 = -0,1226$ ,  $B_3 = 0,084$ ,  $B_4 = -0,3077$ . Безразмерная величина  $Hf V_2$  позволяет использовать полученное уравнение при разных значениях толщины волновода  $H$ , частоты  $f$  и модуля

упругости  $E$ . Изменение фазовой скорости в зависимости от безразмерной величины  $HfV_2$  называется дисперсионной кривой. Фазовая скорость обратно пропорциональна чувствительности магнитострикционного датчика перемещения.

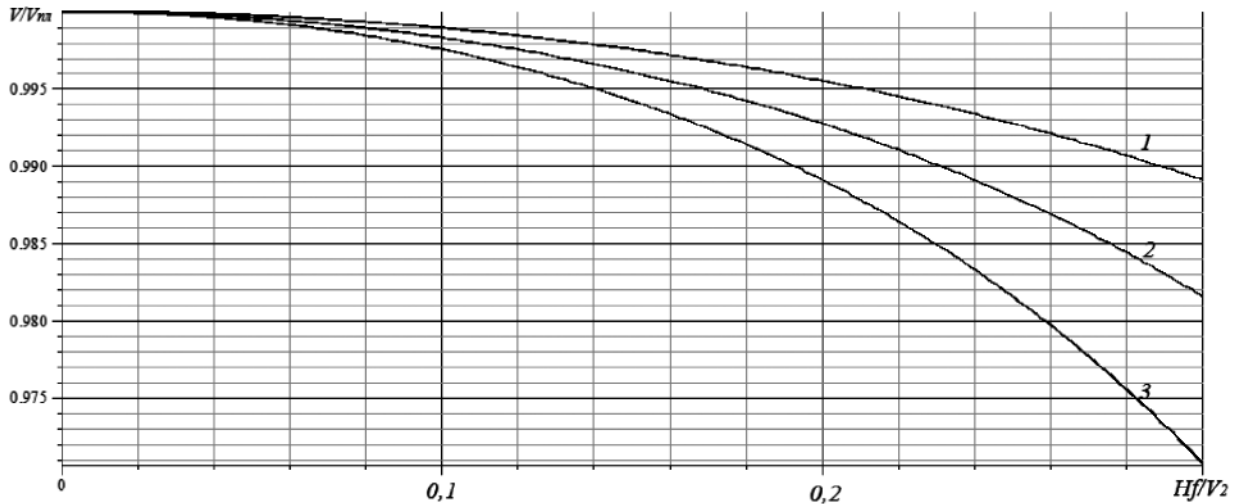
В результате решения уравнения (14) установлено, что при изменении частоты излучаемых колебаний в диапазоне до 2 МГц значения относительной фазовой скорости  $V/V_{пл}$  изменяются от 1 до 0,98 для никелевого волновода толщиной 0,2 мм.

С увеличением толщины пластины фазовые скорости симметричной и антисимметричной продольных волн стремятся к фазовой скорости волны Рэлея и затухают по экспоненциальному закону с глубиной [6]. На рисунке 1 изображены дисперсионные кривые при разных значениях толщины  $H$  волновода. При увеличении толщины волновода в два раза, погрешность возрастает на 1,8 %.

На рисунке 2 показаны дисперсионные кривые при изменении модуля упругости никеля марки НП2Т на  $\pm 10\%$ . Кривая 2 построена при значении модуля упругости  $E = 2,15 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, кривые 1 и 3 соответственно при значениях  $-10\%$  и  $+10\%$  от значения модуля упругости  $E$ . Причиной изменения модуля упругости  $E$  могут стать увеличение и последующее уменьшение внешнего магнитного поля, которое приводит к добавочной деформации, связанной с магнитострикцией. Это явление особенно сильно проявляется в материалах с высокой магнитострикцией [4].

### Выводы

Существенное влияние на дисперсию скорости волны в волноводе оказывает изменение модуля упругости под воздействием на него различных факторов, в частности толщины волновода и значения модуля упругости, которые необходимо учитывать при проектировании магнитострикционных датчиков перемещения.



1) при  $H = 0,2$  мм; 2) при  $H = 0,25$  мм; 3) при  $H = 0,3$  мм

Рисунок 1. Дисперсионные кривые, полученные в зависимости от толщины волновода

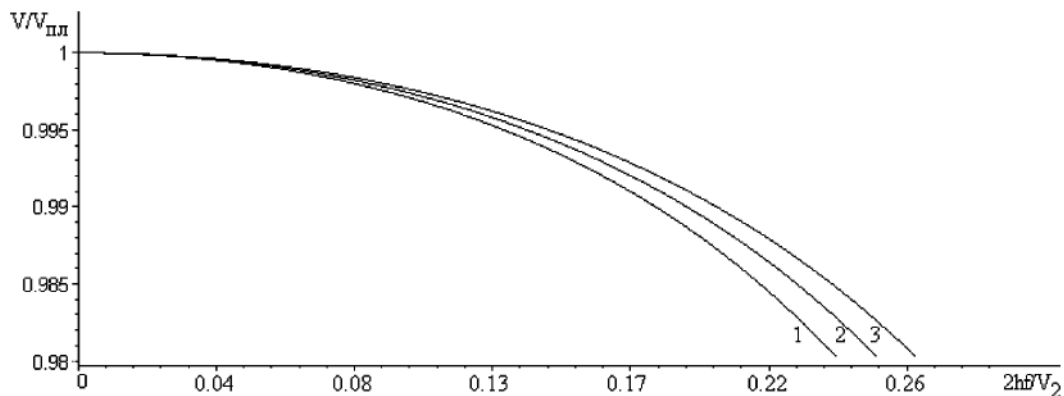


Рисунок 2. Дисперсионные кривые в зависимости от значения модуля упругости  $E$



**Список литературы**

1. А.с. 1803852 СССР, МПК G 01 N 27/90. Магнитострикционный преобразователь параметров движения / В.Х. Ясовеев, Р.Ю. Мукаев, Е.С. Березовская, А.А. Маркин, О.А. Измерлиев. 4948714; Заявл. 22.04.1991; Опубл. 23.03.1993. Б.И. 11.
2. Ясовеев В.Х., Мукаев Р.Ю. Математическая модель магнитострикционного преобразователя параметров движения с ленточным волноводом // Измерительные преобразователи и информационные технологии. Уфа: Гилем, 1996. 239 с.
3. Пат. 3259222 РФ, МПК G 01 B 17/00. Способ измерения линейных перемещений и устройство для его реализации / Р.Ю. Мукаев, Ю.А. Федотова. Заявл. 16.07.2007, Опубл. 20.06.2009. Бюл. 17.
4. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Гл. ред. И.П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
5. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
6. Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. М.: Изд-во «Мир», 1966. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Ч. А. 592 с.
7. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев: Наук. думка, 1981. 284 с.

**References**

1. A.s. 1803852 SSSR, MPK G 01 N 27/90. Magnitostriktsionnyi preobrazovatel' parametrov dvizheniya / V.Kh. Yasoveev, R.Yu. Mukaev, E.S. Berezovskaya, A.A. Markin, O.A. Izmerliev. 4948714; Zayavl. 22.04.1991; Opubl. 23.03.1993. B.I. 11.
2. Jasoveev V.H., Mukaev R.Ju. Matematicheskaja model' magnitostriktsionnogo preobrazovatelja parametrov dvizhenija s lentochnym volnovodom // Izmeritel'nye preobrazovateli i informacionnye tehnologii. Ufa: Gilem, 1996. 239 s.
3. Pat. 3259222 RF, MPK G 01 B 17/00. Sposob izmerenija lineinykh peremeshchenii i ustroistvo dlya ego realizatsii / R.Yu. Mukaev, Yu.A. Fedotova. Zayavl. 16.07.2007, Opubl. 20.06.2009. Byul. 17.
4. Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija / Gl. red. I.P. Goljamina. M.: Sovetskaja jenciklopedija, 1979. 400 s.
5. Viktorov I.A. Fizicheskie osnovy primenenija ul'trazvukovyh voln Rjeleja i Ljemba v tehnikе. M.: Nauka, 1966. 168 s.
6. Fizicheskaja akustika / Pod red. U. Mjezona. M.: Izd-vo «Mir», 1966. T. 1: Metody i pribory ul'trazvukovyh issledovanij. Ch. A. 592 s.
7. Grinchenko V.T., Meleshko V.V. Garmonicheskie kolebanija i volny v uprugih telah. Kiev: Nauk. dumka, 1981. 284 s.



**Зикий А. Н.**  
**Zikiy A. N.**

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



**Андреанов А. В.**  
**Andrianov A. V.**

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



**Зламан П. Н.**  
**Zlaman P. N.**

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

УДК 621.396

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА СМЕСИТЕЛЯ ПО КОМБИНАЦИОННЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ

Смеситель является одним из важнейших узлов радиоприемного устройства. Часто именно смеситель определяет частотный и динамический диапазон приемника, а в ряде случаев и его чувствительность.

По смесителям имеется большое количество книг, еще больше статей, изобретений, диссертаций, однако в связи с повышением требований к смесителям, появлением новой элементной базы, их исследование является актуальным.

К смесителю предъявляются следующие требования:

- диапазон рабочих частот от 0,5 до 3 ГГц;
- динамический диапазон по комбинационным составляющим не менее 40 дБ;
- коэффициент передачи не менее минус 10–12 дБ;
- волновое сопротивление входов и выходов 50 Ом.

Целью работы является измерение динамического диапазона смесителя по комбинационным составляющим.

Проведено экспериментальное исследование смесителя на микросхеме ADE42MH при входных сигналах 0,5–1 ГГц и 2,5–3 ГГц. Промежуточная частота при этом располагалась в диапазоне частот 1,5–2 ГГц. Показано, что динамический диапазон по комбинационным составляющим достигает величины не менее 40–45 дБ. Исследование проведено для двух фиксированных частот гетеродина, а именно 2,5 и 4,5 ГГц. Результаты исследования могут быть полезны при проектировании широкополосных конверторов в дециметровом диапазоне волн.

Количественные результаты для наглядности подтверждаются семью фотографиями спектра комбинационных частот на выходе смесителя. Статья расширяет представление о линейке смесителей фирмы Mini Circuits и может быть полезна для радиоинженеров при проектировании приемо-передающей аппаратуры, а также при учебном проектировании в

высших учебных заведениях соответствующего профиля. Исследованный смеситель позволил создать двухканальный конвертор с высокими электрическими параметрами. Ранее эта задача решалась только путем двойного преобразования частоты по схеме инфрадина. Смеситель с большим динамическим диапазоном по комбинационным составляющим позволил существенно упростить и удешевить конвертор. Только гетеродин сантиметрового диапазона с диэлектрическим резонатором стоит около 100 тыс. руб.

**Ключевые слова:** смеситель кольцевой, динамический диапазон, комбинационные составляющие, конвертор, спектр выходного сигнала смесителя.

## THE STUDY OF THE DYNAMIC RANGE OF THE MIXER ON COMBINATIONAL COMPONENTS

The mixer is one of the most important components of radio receiver. Often, it is the mixer determines the frequency and dynamic range of the receiver, and in some cases its sensitivity.

There are a large number of books, more articles, patents, theses about mixers, however, in connection with increase of requirements to the mixer, the appearance of new element base, the study of mixers is relevant.

The mixer has the following requirements:

- the range of operating frequencies from 0,5 to 3,0 GHz;
- dynamic range on combinational components is of not less than 40 dB;
- transfer ratio is of not less than minus 10...12 dB;
- impedance inputs and outputs of 50 Ohms.

The aim of this work is the measurement of the dynamic range of the mixer on combinational components.

Experimental investigation of the mixer on the chip ADE42MH when input signals of 0,5–1 GHz and 2,5–3 GHz is carried out. Intermediate frequency located in the frequency range of 1,5–2 GHz. It is shown that the dynamic range on combinational components reaches a value not less than 40–45 dB. The study was conducted for two fixed frequencies of the local oscillator, namely 2,5 and 4,5 GHz. The results of the study may be useful in the design of broadband convertors in the UHF band.

Quantitative results for clarity, confirmed by seventh photographs of the spectrum of combinational frequencies at the mixer output. The article expands the idea of the line of Mini Circuits mixers and can be useful to radio engineers for designing the receiving and transmitting equipment, as well as in educational design in higher educational institutions of the corresponding profile. Investigated mixer has allowed the creating of a two-channel converter with high electrical parameters. Earlier this problem was solved only by double frequency conversion by infradyne scheme. Mixer with large dynamic range on combinational components has allowed significantly simplify and reduce the cost of the converter. Just the local oscillator of centimeter range with dielectric resonator costs about 100 thousand rubles.

**Key words:** ring mixer, dynamic range, combinational components, converter, spectrum of mixer output signal.

При проектировании двухканального конвертора понадобился смеситель с динамическим диапазоном по комбинационным составляющим не менее 40 дБ. Такие конверторы могут использоваться при радиомониторинге [1] совместно с АОИПС [2, 3]. Упрощенная схема конвертора показана на рисунке 1.

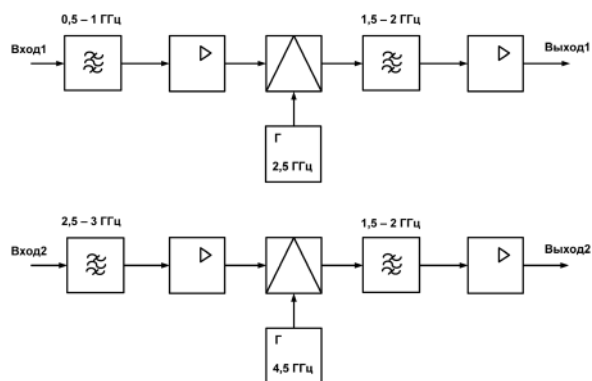


Рисунок 1. Упрощенная функциональная схема конвертора

При выборе технического решения оказались полезными обзорные работы по смесителям [4–7], а также предыдущий опыт авторов [8, 9].

Целью настоящей работы является измерение динамического диапазона смесителя по комбинационным составляющим.

Объектом исследования является смеситель на микросхеме ADE42MH, фото которого приведено на рисунке 2. Эксперимент проводился на измерительной установке, структурная схема которой приведена на рисунке 3.

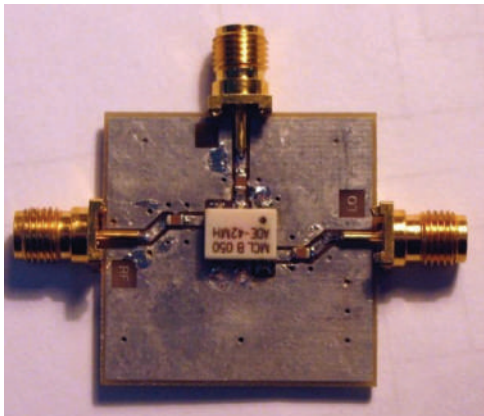


Рисунок 2. Фото смесителя

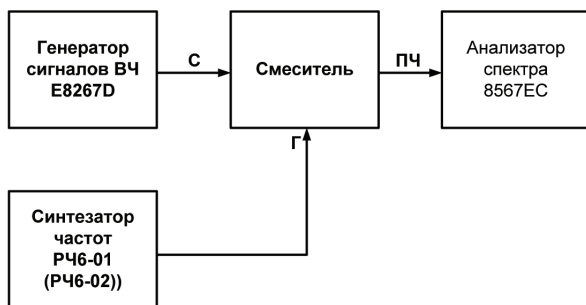


Рисунок 3. Структурная схема измерительной установки

В первом эксперименте спектр комбинационных частот измерялся при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 0,9$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 2,5$  ГГц. Фото спектра выходного сигнала показано на рисунке 4.

Во втором эксперименте спектр комбинационных частот измерялся при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 0,5$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 2,5$  ГГц. Фото спектра выходного сигнала приведено на рисунке 5.

В третьем эксперименте спектр комбинационных частот измерялся при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 0,75$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 2,5$  ГГц. Фото спектра выходного сигнала можно видеть на рисунке 6.

В четвертом эксперименте спектр комбинационных частот измерялся при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 1$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 2,5$  ГГц. Рисунок 7 иллюстрирует спектр выходного сигнала.

В пятом эксперименте наблюдался спектр комбинационных частот при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 2,5$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 4,5$  ГГц, который показан на рисунке 8.

В шестом эксперименте спектр комбинационных частот измерялся при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 2,75$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 4,5$  ГГц, который можно видеть на рисунке 9.

В седьмом эксперименте спектр комбинационных частот изучался при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 3$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 4,5$  ГГц. Рисунок 10 отображает этот спектр.

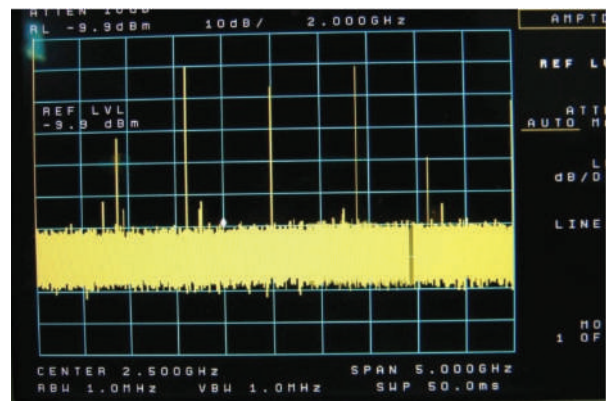


Рисунок 4. Спектр сигналов на выходе смесителя при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 0,9$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 2,5$  ГГц

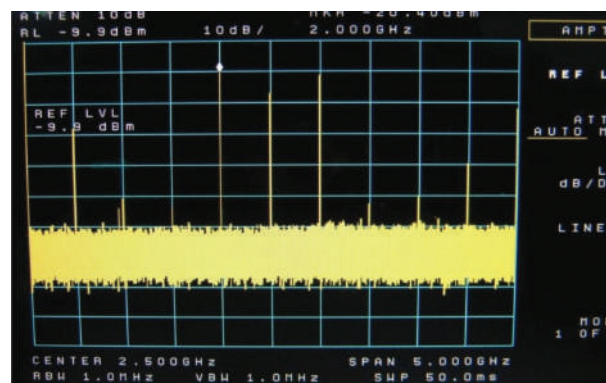


Рисунок 5. Спектр сигналов на выходе смесителя при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 0,5$  ГГц,  $P_2 = 10$  дБм,  $f_2 = 2,5$  ГГц

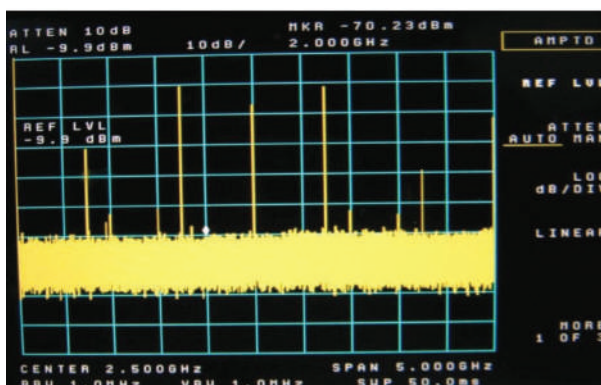


Рисунок 6. Спектр сигналов на выходе смесителя при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 0,75$  ГГц,  $P_z = 10$  дБм,  $f_z = 2,5$  ГГц

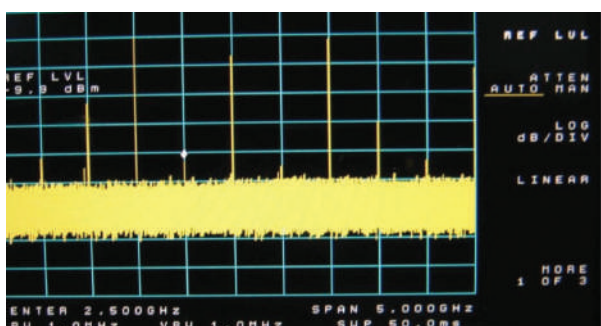


Рисунок 7. Спектр сигналов на выходе смесителя при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 1$  ГГц,  $P_z = 10$  дБм,  $f_z = 2,5$  ГГц

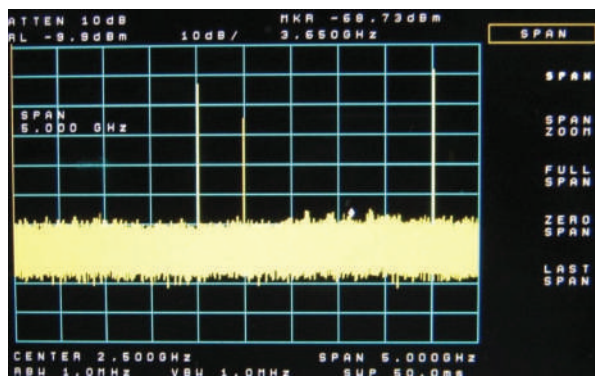


Рисунок 8. Спектр сигналов на выходе смесителя при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 2,5$  ГГц,  $P_z = 10$  дБм,  $f_z = 4,5$  ГГц

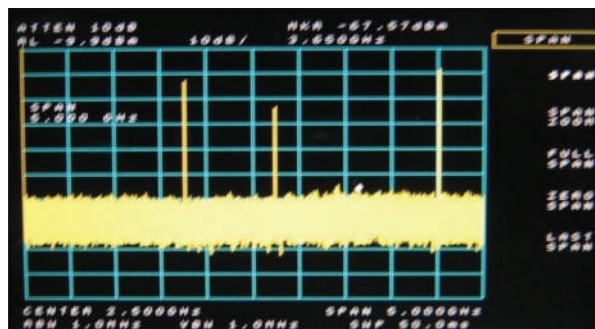


Рисунок 9. Спектр сигналов на выходе смесителя при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 2,75$  ГГц,  $P_z = 10$  дБм,  $f_z = 4,5$  ГГц

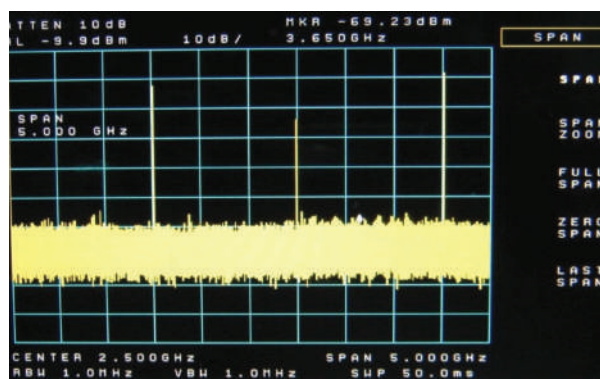


Рисунок 10. Спектр сигналов на выходе смесителя при  $P_c = -10$  дБм,  $f_c = 3$  ГГц,  $P_z = 10$  дБм,  $f_z = 4,5$  ГГц

Рисунки 4–10 позволяют сформулировать количественно подавление комбинационных частот в полосе промежуточных частот 1,5–2,0 ГГц. Результаты измерений отражены в таблице 1.

### Выводы

Смеситель преобразует входной сигнал в полосах частот 0,5–1,0 ГГц и 2,5–3,0 ГГц в промежуточную частоту 1,5–2,0 ГГц с динамическим диапазоном по комбинационным составляющим 40–45 дБ.

Таблица 1. Результаты испытаний смесителя

№	$f_c$ , ГГц	$P_c$ , дБм	$f_z$ , ГГц	$P_z$ , дБм	$f_{nc}$ , ГГц	Динамический диапазон, дБ	Гетеродин	Номер рисунка
1	0,9	-10	2,5	10	1,6	> 40	РЧ6-01	4
2	0,5	-10	2,5	10	2	> 45	РЧ6-01	5
3	0,75	-10	2,5	10	1,75	> 45	РЧ6-01	6
4	1	-10	2,5	10	1,5	> 40	РЧ6-01	7
5	2,5	-10	4,5	10	2	> 45	РЧ6-02	8
6	2,75	-10	4,5	10	1,75	> 45	РЧ6-02	9
7	3	-10	4,5	10	1,5	> 40	РЧ6-02	10

### Список литературы

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг. Задачи, методы, средства. 2-е изд. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 624 с.
2. Шибяев С.С., Помазанов А.В., Раздобудько В.В. Акустооптические измерители параметров радиосигналов. Ростов-на-Дону, Изд-во Южного федерального университета, 2014. 233 с.
3. Шибяев С.С., Помазанов А.В., Вольфовский Б.Н. Акустооптические процессоры. Алгоритмы и погрешности измерения: монография. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2015. 212 с.
4. Maas S.A. Microwave Mixers. 2nd ed. Artech House, 1992.
5. Лисицын А.А., Родионов А.Д. Широкополосные смесители СВЧ диапазона. Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИ «Электроника», 1988. Вып. 20 (1413). 37 с.
6. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / Под ред. А.М. Кудрявцева. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
7. Микроэлектронные устройства СВЧ. Киев: Техника, 1984. 184 с.
8. Зикий А.Н., Зламан П.Н., Булгакова О.И., Пленкин А.П. Смеситель с большим динамическим диапазоном // Вопросы специальной радиоэлектроники. Сер. Общие вопросы радиоэлектроники. 2013. № 2. С. 118–124.
9. Зикий А.Н., Пленкин А.П. Смеситель дециметрового диапазона на комбинации линии передачи // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3.
10. Frequency mixer ADE42MH. Mini-Circuits/DataSheet/Minicircuits.com.
- Methods, Means]. 2-e izd. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2010. 624 p.
2. Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Razdabud'ko V.V. Akustoopticheskie izmeriteli parametrov radiosignalov [Acoustooptic Meter of Radio Signal Parameters]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Uzhnogo federal'nogo universiteta, 2014. 233 p.
3. Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Vol'fovskiy B.N. Akustoopticheskie processory. Algoriyami i pogreshnosti izmerenya: monografiya. [Acoustooptic Processors. Algorithms and Measurement Errors: Monograph]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Uzhnogo federal'nogo universiteta, 2015. 212 p.
4. Maas S.A. Microwave Mixers. 2nd ed. Artech House, 1992.
5. Lisisin A.A., Rodionov A.D. Shirokopolosnie smesiteli SVCH diapazona. Obzory po elektronnoy tehnikе [Wideband SHF mixers. Review of electronic tech]. M.: SNII «Electronic», 1988. Vyp. 20 (1413). 37 p.
6. Radioizmeritel'nyya apparatura SVCH i KVCH diapazonov. Uzlovaya i elementnaya bazy [Radio equipment, SHF and EHF. Nodal and Elemental Bases]. Pod red. A.M. Kudryavseva. M.: Radiotekhnika, 2006. 208 p.
7. Mikroelektronnie ustroystva SVCH [Microelectronic Microwave Device]. Kiev: Tehnika, 1984. 204 p.
8. Zikiy A.N., Zlaman P.N., Bulgakova J.I., Plionkin A.P. Smesitel's bol'shim dinamicheskim diapazonom [Mixer with Wide Dynamic Range]. Voprosi spetsial'noy radioelektroniki. Ser. Obschie voprosi radioelektroniki. 2013. № 2. P. 118–124.
9. Zikiy A.N., Plionkin A.P. Smesitel' desimetrovogo diapazona na kombinatsii linii peredachi [UHF Mixer on a combination of transmission lines]. Inzhenerniy vestnik Dona, 2016, № 3.
10. Frequency mixer ADE42MH. Mini-Circuits/DataSheet/Minicircuits.com.

### References

1. Rembovskiy A.M., Ashihmin A.V., Koz'min V.A. Radiomonitoring. Zadachi, metody, sredstva [Radiomonitoring. Tasks,
2. Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Razdabud'ko V.V. Akustoopticheskie izmeriteli parametrov radiosignalov [Acoustooptic Meter of Radio Signal Parameters]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Uzhnogo federal'nogo universiteta, 2014. 233 p.
3. Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Vol'fovskiy B.N. Akustoopticheskie processory. Algoriyami i pogreshnosti izmerenya: monografiya. [Acoustooptic Processors. Algorithms and Measurement Errors: Monograph]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Uzhnogo federal'nogo universiteta, 2015. 212 p.
4. Maas S.A. Microwave Mixers. 2nd ed. Artech House, 1992.
5. Lisisin A.A., Rodionov A.D. Shirokopolosnie smesiteli SVCH diapazona. Obzory po elektronnoy tehnikе [Wideband SHF mixers. Review of electronic tech]. M.: SNII «Electronic», 1988. Vyp. 20 (1413). 37 p.
6. Radioizmeritel'nyya apparatura SVCH i KVCH diapazonov. Uzlovaya i elementnaya bazy [Radio equipment, SHF and EHF. Nodal and Elemental Bases]. Pod red. A.M. Kudryavseva. M.: Radiotekhnika, 2006. 208 p.
7. Mikroelektronnie ustroystva SVCH [Microelectronic Microwave Device]. Kiev: Tehnika, 1984. 204 p.
8. Zikiy A.N., Zlaman P.N., Bulgakova J.I., Plionkin A.P. Smesitel's bol'shim dinamicheskim diapazonom [Mixer with Wide Dynamic Range]. Voprosi spetsial'noy radioelektroniki. Ser. Obschie voprosi radioelektroniki. 2013. № 2. P. 118–124.
9. Zikiy A.N., Plionkin A.P. Smesitel' desimetrovogo diapazona na kombinatsii linii peredachi [UHF Mixer on a combination of transmission lines]. Inzhenerniy vestnik Dona, 2016, № 3.
10. Frequency mixer ADE42MH. Mini-Circuits/DataSheet/Minicircuits.com.



**Мухамадиев А. А.**  
**Mukhamadiev A. A.**

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



**Тарасенко Л. С.**  
**Tarasenko L. S.**

*магистрант кафедры «Информационно-  
измерительная техника», ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный авиационный  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация*

УДК 621.38:669

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЗЛА ФОТОПРИЕМНИКА АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА

Фотоприемник обеспечивает преобразование теплового излучения в выходной электрический сигнал. Учитывая, что от фотоприемника и его функционирования в значительной мере зависит качество работы акустооптического пирометра, задача его проектирования представляется весьма актуальной.

В результате проведенного анализа и исходя из конструкции акустооптического пирометра был выбран фотодиод на основе InGaAs фирмы Hamamatsu G5852-11. Также была выявлена необходимость обеспечения термостатирования приемника излучения. Для решения данной задачи наибольшее распространение получило встраивание в конструкцию фотодиода элементов Пельтье и датчика температуры, позволяющих обеспечить заданный температурный режим. Для обеспечения эффективного теплообмена с окружающей средой используется радиатор, в который вставляется фотодиод.

Авторами была разработана структурная схема информационно-измерительной системы контроля температуры фотодиода с целью обеспечения его термостатирования. Для управления термостатированием был выбран ПИД-регулятор. Проведено моделирование ПИД-регулятора в программе MathLab Simulink. Получена зависимость отношения измеренной температуры и заданной температуры ко времени. Приведено описание работы контроллера температуры, обеспечивающего термостатирование фотодиода. Описаны структура и принцип работы импульсного стабилизатора, являющегося ключевым элементом контроллера температуры.

**Ключевые слова:** фотодиод, термостатирование, элемент Пельтье, моделирование, ПИД-регулятор, контроллер температуры.

## TECHNIQUE FOR DESIGNING A PHOTODETECTOR ASSEMBLY OF AN ACOUSTOOPTIC PYROMETER

The photodetector provides conversion of thermal radiation into an output electrical signal. Considering that, the quality of the acoustooptic pyrometer depends on the photodetector and its functioning to a large extent, the task of designing it is very actual.

As a result of the analysis and based on the construction of an acoustooptic pyrometer, an InGaAs photodiode was selected from Hamamatsu G5852-11. The necessity of providing thermostating of the radiation receiver was also revealed. To solve this problem, the most widespread is the integration in the construction of the photodiode of Peltier elements and the temperature sen-

sor, which allow to provide a given temperature regime. To ensure effective heat exchange with the environment, a radiator is used, into which a photodiode is inserted.

The authors developed a structural diagram of the information-measuring system for monitoring the temperature of the photodiode in order to ensure its thermostating. To control the thermostating, a PID controller has been selected. The simulation of the PID controller in the MathLab Simulink program was carried out. The dependence of the ratio of the measured temperature and the given temperature to time is obtained. The description of the operation of a temperature controller providing temperature control of a photodiode is given. The structure and operating principle of a pulse stabilizer, which is a key element of a temperature controller, is described.

**Key words:** photodiode, thermostating, Peltier element, simulation, PID controller, temperature controller.

В соответствии с разработанной конструкцией акустооптического пирометра (АОП), рассмотренной в работах [1–10], одной из важнейших частей устройства является измерительный блок. Первичным элементом измерительного блока, воспринимающим входной сигнал в виде теплового излучения, предварительно прошедшего через коллиматор и акустооптический монохроматор, является фотоприемник, обеспечивающий его преобразование в выходной электрический сигнал. Учитывая, что от фотоприемника и его функционирования в значительной мере зависит качество работы АОП, задача его проектирования представляется весьма актуальной.

Несмотря на большое разнообразие фотоприемников наибольшее распространение в пирометрии получили фотодиоды, позволяющие обеспечить качественный прием излучения и его последующее преобразование в электрический сигнал (рисунок 1).

Учитывая необходимость согласования с оптическим блоком АОП, работающим в диапазоне от 1–2 мкм, выбирается фотодиод на основе InGaAs. Также следует отметить, что в фотодиодах из InGaAs достигаются боль-

шие значения показателя поглощения света, чем в фотодиодах из Ge, а плотность темнового тока в фотодиодах из Ge превышает на несколько порядков плотность темнового тока, выполненных из InGaAs.

В ходе проведенного анализа различных исследований в области использования фотодиодов было выявлено, что наибольшее влияние на их характеристики оказывает температура, в связи с чем для нивелирования данного негативного воздействия необходимо обеспечить термостатирование приемника излучения. На сегодняшний день для решения данной задачи наибольшее распространение получило встраивание в конструкцию фотодиода элементов Пельтье и датчика температуры, позволяющих обеспечить заданный температурный режим.

Несмотря на большой выбор производителей авторы посчитали, что наиболее подходящим является фотодиод фирмы Hamamatsu G5852-11 (рисунок 2).

Для обеспечения эффективного теплообмена с окружающей средой необходимо использование радиатора, в который будет вставлен фотодиод. Производителем фотодиода предлагается радиатор с геометрическими

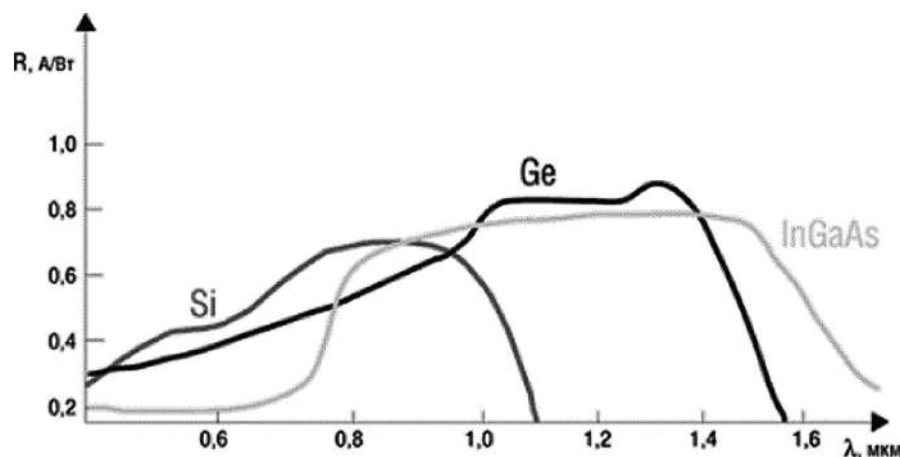


Рисунок 1. Спектральные характеристики фотодиодов в зависимости от материала





Рисунок 2. Фотография фотодиода

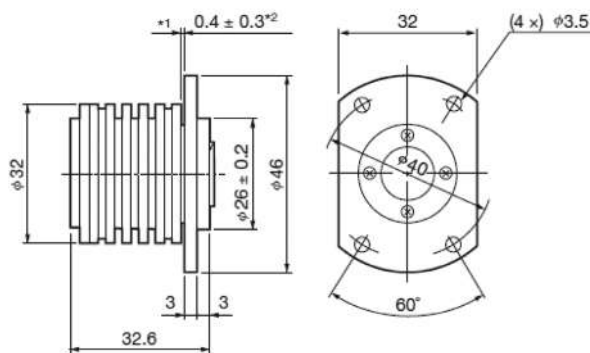


Рисунок 3. Чертеж радиатора фотодиода



Рисунок 4. Фотография радиатора фотодиода

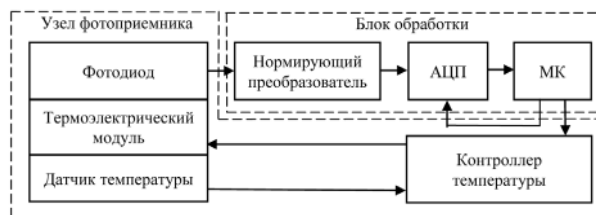


Рисунок 5. Структурная схема узла фотоприемника и блока обработки

параметрами, соответствующими размерам и выводам фотодиода (рисунок 3). Внешний вид радиатора показан на рисунке 4.

Однако при проектировании радиатора учитывался определенный уровень тепловыделения фотодиода, что на практике зачастую невыполнимо, и присутствует постоянное изменение его температуры. Для обеспечения заложенных характеристик фотодиода необходим соответствующий тепловой режим работы. Постоянную температуру фотодиода можно обеспечить путем компенсации тепловыделений, а именно увеличением холодопроизводительности элементов Пельтье. Термоэлектрический модуль поддерживает постоянную температуру во время работы, что позволяет ее точно измерять с улучшенным отношением сигнал / шум. Таким образом, необходима разработка информационно-измерительной системы контроля температуры фотодиода с целью обеспечения его термостатирования. Для реализации подобной системы авторами предлагается следующая структура (рисунок 5).

Для обеспечения термостатирования фотодиода необходимо обеспечение соответствующего управления, т. е. надо выбрать правильный тип регулятора. На сегодня известны следующие типы регуляторов: пропорциональный (П-регулятор), интегральный

(И-регулятор), пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-регулятор) и пропорционально-дифференциальный (ПД-регулятор). Сразу следует отметить, что широко применяемое двухпозиционное регулирование температуры не рекомендуется, так как оно ведет к перегрузке элементов Пельтье, деградации термоэлектрического модуля и значительному сокращению его срока службы. Для стабилизации температуры надо регулировать электрическую мощность на элементе Пельтье, т. е. произведение тока через модуль на напряжение на нем. Анализ литературы в данной области показывает, что недопустимо применение широтно-импульсной модуляции по причине 5 % пульсаций, поэтому необходим импульсный регулятор мощности с фильтром на выходе.

Таким образом, необходимо использовать ПИД-регулятор. Формирование управляющего сигнала можно описать следующей формулой

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt},$$

где  $k_p$ ,  $k_i$  и  $k_d$  — коэффициенты передачи соответственно для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих выходного сигнала.

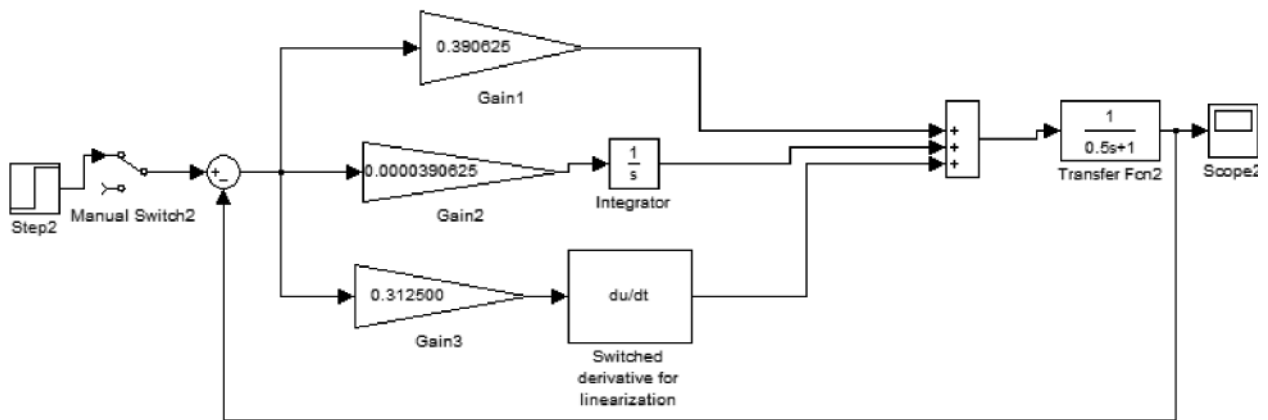


Рисунок 6. Схема ПИД-регулятора в MathLab

Моделирование ПИД-регулятора осуществим в программе MathLab Simulink (рисунок 6). Для моделирования выберем следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} k_n &= 0,39062500; \\ k_u &= 0,0000390625; \\ k_d &= 0,312500; \\ T_d &= 0,5. \end{aligned}$$

Полученный график (рисунок 7) показывает термостабилизацию температуры фотоприемника. По оси  $x$  — время в секундах, по оси  $y$  — отношение  $T_{изм}/T_{зад}$ , где  $T_{изм}$  — измеренная температура (полученная с датчика температуры),  $T_{зад}$  — заданная температура (значение температуры, до которой необходимо термостабилизировать фотоприемник).

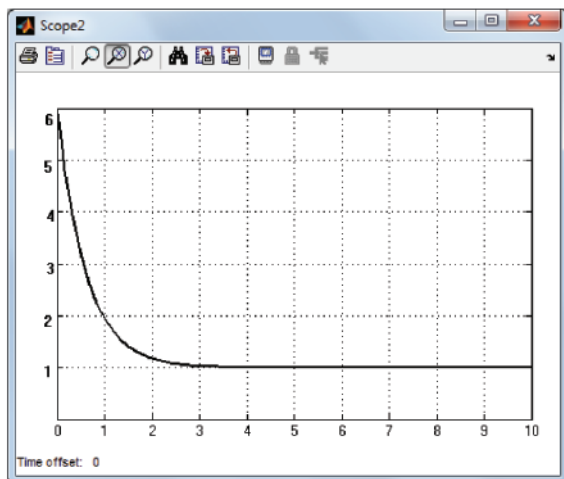


Рисунок 7. График выходного значения

Контроллер работает по принципу широтно-импульсной модуляции выходного напряжения, что обеспечивает бесступенчатую

регулировку выходного напряжения на термоэлектрическом модуле. В конструкции контроллера предусмотрен сглаживающий фильтр, обеспечивающий работу элемента при оптимальных настройках (исключает ускоренную деградацию элемента и локальные отказы).

Более подробно разберем структуру и принцип работы импульсного стабилизатора, являющегося ключевым элементом контроллера температуры (рисунок 8).

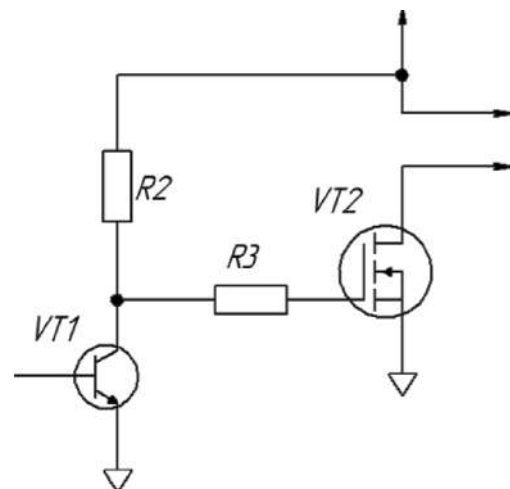


Рисунок 8. Схема импульсного стабилизатора

Биполярный транзистор  $VT1$  выступает в роли драйвера. Драйвер используется для управления затвором полевого транзистора  $VT2$ . Резистор  $R2$  предназначен для ограничения тока коллектора, а также для предотвращения перегрузки порта микроконтроллера. Резистор  $R3$  необходим в данной схеме для того, чтобы не сжечь затвор полевого транзистора  $VT2$  в момент включения.

Когда с микроконтроллера приходит значение «0», транзистор  $VT1$  открывается, ток течет через резистор  $R2$  на землю. Когда с микроконтроллера приходит значение «1», транзистор  $VT1$  закрыт, ток потечет через транзисторы  $R2$  и  $R3$ , транзистор  $VT2$  откроется.

### Выводы

Таким образом, методика проектирования узла фотоприемника акустооптического пирометра будет включать следующие пункты:

- выбор фотодиода с учетом оптических характеристик спроектированных и выбранных ранее элементов оптики и параметров падающего излучения;
- выбор типа охлаждения (естественное или принудительное) фотодиода, исходя из необходимых точностных характеристик устройства;
- подбор или проектирование радиатора для отвода тепла от фотодиода;
- проектирование информационно-измерительной системы контроля температуры фотодиода.

### Список литературы

1. Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. Принципы построения оптических преобразователей температуры // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2009. № 2 (6). С. 21–26.
2. Фаррахов Р.Г., Ураксеев М.А., Мухамадиев А.А. Оптико-электронные преобразователи температуры для систем контроля технологическими процессами: науч. издание. Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2010. 105 с.
3. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г., Ураксеев М.А. Акустооптические приборы информационно-измерительных систем экологического мониторинга: науч. издание. Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2009. 119 с.
4. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г. Математическая модель акустооптического пирометра // Датчики и системы. 2012. № 2. С. 28–30.
5. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г. Статическая характеристика, чувствительность и разрешающая способность акустооптического пирометра // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 41–43.
6. Мухамадиев А.А., Фаррахов Р.Г. Акустооптический преобразователь температуры // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 1. С. 2–28.
7. Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. Универсальный пирометр для измерения высоких температур // Датчики и системы. 2010. № 11. С. 23–25.

8. Фаррахов Р.Г. Математическая модель оптического преобразователя температуры с волоконным световодом // Приборы. 2010. № 4. С. 11–14.
9. Фаррахов Р.Г., Мухамадиев А.А. Оптико-электронный преобразователь температуры для систем контроля и управления // Датчики и системы. 2010. № 10. С. 39–41.
10. Пат. 2399892 Российская Федерация, МПК 8 G 01 J 15/10. Оптико-электронный преобразователь температуры / Р.Г. Фаррахов, А.А. Мухамадиев (РФ). 2009122755/28, заявл. 15.06.2009; опубл. 20.09.10.

### References

1. Farrahov R.G., Muhamadiev A.A. Principy postroenija opticheskikh preobrazovatelej temperatury // Prikaspijskij zhurnal: Upravlenie i vysokie tehnologii. 2009. № 2 (6). S. 21–26.
2. Farrahov R.G., Urakseev M.A., Muhamadiev A.A. Optiko-jelektronnye preobrazovately temperatury dlja sistem kontrolja tehnologicheskimi processami: nauch. izdanie. Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2010. 105 s.
3. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G., Urakseev M.A. Akustoopticheskie pribory informacionno-izmeritel'nyh sistem jekologicheskogo monitoringa: nauch. izdanie. Ufa: Ufimskaja gosudarstvennaja akademija jekonomiki i servisa, 2009. 119 s.
4. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G. Matematicheskaja model' akustoopticheskogo

- pirometra // Datchiki i sistemy. 2012. № 2. S. 28–30.
5. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G. Statischeckaja harakteristika, chuvstvitel'nost' i razreshajushhajasposobnost'akustooptičeskogo pirometra // Datchiki i sistemy. 2011. № 11. S. 41–43.
6. Muhamadiev A.A., Farrahov R.G. Akustooptičeskij preobrazovatel' temperatury // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2011. № 1. S. 26–28.
7. Farrahov R.G., Muhamadiev A.A. Universal'nyj piometr dlja izmerenija vysokih temperatur // Datchiki i sistemy. 2010. № 11. S. 23–25.
8. Farrahov R.G. Matematičeskaja model' optičeskogo preobrazovatelja temperatury s volokonnym svetovodom // Pribory. 2010. № 4. S. 11–14.
9. Farrahov R.G., Muhamadiev A.A. Optičeskij preobrazovatel' temperatury dlja sistem kontrolja i upravlenija // Datchiki i sistemy. 2010. № 10. S. 39–41.
10. Pat. 2399892 Rossijskaja Federacija, MPK 8 G 01 J 15/10. Optičeskij preobrazovatel' temperatury / R.G. Farrahov, A.A. Muhamadiev (RF). 2009122755/28, zajavl. 15.06.2009; opubl. 20.09.10.



**Абдрахманов В. Х.**  
**Abdrakhmanov V. Kh.**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Инфокоммуникационные  
технологии  
и наноэлектроника»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация



**Важдаетов К. В.**  
**Vazhdaev K. V.**

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



**Салихов Р. Б.**  
**Salikhov R. B.**

доктор физико-  
математических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой  
«Инфокоммуникационные  
технологии  
и наноэлектроника»,  
ФГБОУ ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация

УДК 681.518.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Исследование возможности применения сетевых технологий в агропромышленном комплексе с разработкой конкретных технических решений в настоящее время является весьма актуальной задачей. В информационно-измерительных технологиях интернета вещей используются различные типы датчиков и преобразователей, в том числе акустооптические датчики.

Основные цели исследования следующие:

- в сфере производства молочной продукции — исследование возможностей повышения качества молочной продукции с помощью современных сетевых электронных технологий учета молока, исследование возможностей контроля по сети и мониторинга работы автоматов промывки, предназначенных для управления процессом промывки доильной аппаратуры;
- исследование возможностей мониторинга и удаленного управления температурным режимом, климатом и теплотреблением жилых зданий;
- исследование возможностей удаленной диагностики состояния пчелосемей по звукам, издаваемым пчелиным ульем;
- исследование возможностей мониторинга и удаленного управления устройствами автоматизации малых тепличных и малых птицеводческих фермерских хозяйств с помощью современных сетевых электронных технологий.

**Ключевые слова:** интернет вещей (IoT), Wi-Fi модуль ESP8266, среда разработки Arduino IDE, LPWAN-технологии, электронные технологии учета молока, автоматы промывки доильной аппаратуры, энергоресурсосбережение, автоматизация зданий, управление теплотреблением, Ethernet контроллер, MAC, PHY, стек протоколов TCP/IP, мониторинг состояния

пчелосемей, алгоритмы искусственных нейронных сетей, алгоритмы быстрого преобразования Фурье (FFT), Arduino Due, автоматизация малых тепличных фермерских хозяйств.

## STUDY OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF INFORMATION-MEASURING TECHNOLOGIES AND THE INTERNET OF THINGS IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Research into the possibility of using network technologies in the agro-industrial complex with the development of specific technical solutions is currently a very urgent task. The article considers and justifies the following main research objectives:

- in the sphere of dairy products — researching the possibilities of improving the quality of dairy products with the help of modern electronic milk accounting technologies, researching the possibilities of monitoring the network and monitoring the operation of rinse machines designed to control the washing process of milking equipment;
- research of monitoring capabilities and remote control of temperature, climate and heat consumption of residential buildings;
- investigation of the possibilities of remote diagnostics of the state of beekeeping by sounds produced by a bee hive;
- research of monitoring and remote control capabilities of automation devices for small greenhouse and small poultry farms using modern network electronic technologies.

**Key words:** internet of Things (IoT), Wi-Fi module ESP8266, development environment Arduino IDE, LPWAN technologies, electronic milk accounting technologies, milking machine washing machines, energy saving, building automation, heat management, Ethernet controller, MAC, PHY, TCP/IP protocol stack, bee-seed monitoring, algorithms for artificial neural networks, FFT algorithms, Arduino Due, Automation of small greenhouse farms.

### *1. Актуальность научной проблемы исследования*

Исследование возможности применения сетевых технологий в агропромышленном комплексе с разработкой конкретных технических решений в настоящее время является весьма актуальной задачей. В информационно-измерительных технологиях интернета вещей используются различные типы датчиков и преобразователей, в том числе акустооптические датчики [1-3].

Применение интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT) [4] в сельском хозяйстве решает несколько главных задач, среди которых сокращение операционных расходов и себестоимости выращивания продукции, ресурсосбережение, повышение урожайности, выявление проблемных зон земельных участков и т. д. Для решения этих задач используются беспилотники, сети интернета вещей, спутниковые технологии, самоуправляемая спецтехника и различные телематические сервисы. «Минсельхоз, Минпромторг и Минкомсвязи Российской Федерации получили поручение разработать план мероприятий по внедрению интернета вещей в агропромышленный комплекс», — пишут «Ведомости» со ссылкой на протокол совеща-

ния у вице-преьера Аркадия Дворковича [5]. Ведомства должны подготовить предложения по обеспечению доступа в интернет на землях сельхозназначения в Воронежской области, Ставропольском и Краснодарском краях. Они также должны разработать порядок строительства объектов связи на этих землях. Источники издания при этом не уточнили, в какие сроки и за чей счет могут быть внедрены новые технологии. Концепция интернета вещей предполагает создание вычислительной сети из физических объектов («вещей»), которые могут самостоятельно обмениваться данными друг с другом и с внешней средой. Автоматизация с помощью современных сетевых электронных технологий особенно актуальна для развития малого предпринимательства в сельском хозяйстве, т. е. малых фермерских хозяйств. Это обусловлено тем, что в малых фермерских хозяйствах часто не хватает рабочих рук — при малых объемах производства невыгодно нанимать много работников, а стандартные решения в области автоматизации обычно ориентированы на крупные производства или требуют больших вложений. Между тем, для решения проблем повышения качества и экологичности продукции необходимо развивать

именно малые фермерские хозяйства, которые могут выпускать продукцию малыми партиями с большей гарантией качества и экологичности, и соответственно доверие покупателей к ним больше.

Качество молочной продукции — широко обсуждаемая проблема в средствах массовой информации. Молоко часто неконтролируемо разбавляется, а необходимая жирность обеспечивается добавлением какого-либо дешевого масла (пальмового например). Для решения этой проблемы необходимы и административные меры, и техническое переоснащение молочного производства. Если контролировать в реальном времени с использованием сетевых технологий поступающее из доильного оборудования количество молока, то решение этой проблемы облегчается. Кроме того, на качество молока может оказывать влияние качество промывки доильного оборудования. Для контроля качества промывки мы предлагаем ввести логгирование (журналирование) проводимых автоматом промывки операций (дата и время промывки, длительность промывки, длительность ополаскивания, объем воды для ополаскивания, дозировка моющих средств, температура моющего раствора) с выдачей результата через сеть.

Проблема тепло- и энергосбережения при использовании централизованного отопления особенно актуальна. Это связано со множеством факторов, например с тем, что различные жилые помещения имеют различные показатели по сохранению тепла, кроме того, температура в помещении зависит от температуры батарей отопления, их количества на единицу площади и др. В результате зачастую, когда в одних помещениях холодно, в других же может быть слишком жарко, и часто бывает, что люди открывают форточки при включенном отоплении. Теплосчетчики в России в многоквартирных жилых домах не стоят в каждой квартире, как в странах Западной и Восточной Европы, а ставятся обычно по одному на подъезд, дом, поэтому проблема теплосбережения отдельно взятого гражданина мало беспокоит, но в масштабах страны необходимо эту проблему решать хотя бы в помещениях образовательных

учреждений: школах, вузах, детских садах. Разрабатываемые системы мониторинга и удаленного управления теплоснабжением предлагается внедрять именно там.

Развитие сетевых технологий в пчеловодстве является перспективным направлением. Предлагаемая к реализации автоматизированная система мониторинга состояния пчелосемей обеспечит поддержание оптимальных параметров биологических процессов, что позволит ускорить ее развитие и обеспечит заметное снижение трудозатрат на обслуживание пасек.

Развитие сетевых технологий в тепличном хозяйстве особенно актуально для развития малого бизнеса, малых фермерских хозяйств, поскольку если в больших хозяйствах есть достаточное количество персонала, обслуживающего теплицы, и уровень автоматизации выше, то в малых хозяйствах может не хватать рабочих рук, и много ручного труда.

Автоматизация с помощью современных сетевых электронных технологий особенно актуальна для малых птицеводческих фермерских хозяйств, поскольку большие хозяйства отличаются высоким уровнем автоматизации (этим занимаются специализированные фирмы с большим опытом работы в этой отрасли), и работающего рабочего персонала там также достаточно.

## *2. Предлагаемые методы и подходы к решению задач исследований*

Рассмотрим основные предлагаемые технические решения. На рисунке 1 приведен Wi-Fi модуль ESP8266 [6], который широко используется в технологиях интернета вещей (IoT) и «Умный дом» ввиду своей известности среди разработчиков на платформе Arduino и дешевизны (около 2–3 USD с доставкой от китайских производителей).

Модуль может использоваться в качестве Wi-Fi-шилда для Arduino либо как самостоятельное микроконтроллерное устройство. Как и плата, Arduino модуль ESP8266 имеет свои программируемые выводы (GPIO), которые можно использовать для управления внешними устройствами, получения данных с различных датчиков. Программирование Wi-Fi модуля на базе микросхемы ESP8266 возможно с использованием среды разработки

Arduino IDE, если загрузить туда программу «ESP8266» [7]. Это позволит писать программы (sketch) с помощью известных для контроллера Arduino функций и библиотек и запускать их прямо на ESP8266, без внешней платы Arduino. Программа «ESP8266» поставляется с библиотеками, которые позволяют через интерфейс Wi-Fi с помощью протоколов IP, TCP, UDP обмениваться данными с WEB, SSDP, mDNS и DNS серверами, использовать flash-память для создания файловой системы, обеспечить работу с SD картами, сервоприводами, работать с периферийными устройствами по шинам SPI и I2C.

Под модуль ESP8266 имеется множество разработанного, свободно распространяемого программного обеспечения, например для управления устройствами со смартфонов на базе iOS и Android можно использовать облачный сервис Blynk [8]. На рисунке 2 приведена панель инструментов Widget Box облачного сервиса Blynk и пример окна iOS или Android-приложения.

Сеть Wi-Fi достаточно широко распространена, т. к. любой смартфон может служить точкой доступа к сети Wi-Fi, и кроме того широко распространены роутеры сети Ethernet с подключением по Wi-Fi, и редко когда в сельском поселении нет мобильной связи или сети Интернет. Но есть удаленные населенные пункты, где такое подключение невозможно, также зачастую летняя дойка (в случае необходимости мониторинга доильного оборудования) или пасека

достаточно удалены от сельского поселения, и там нет мобильной связи или сети Интернет. Кроме того, может быть необходимо автономное питание (например, для использования в улье или для использования радиомодуля в составе датчика влажности почвы в полевых условиях). Дальность же сети Wi-Fi невелика — не более десятков метров и сам модуль достаточно много потребляет, т. к. технология рассчитана на малые расстояния и высокие скорости передачи. В таких случаях оптимальным решением будет использовать технологию LPWAN [9] ввиду ее следующих преимуществ:

- большая дальность передачи радиосигнала по сравнению с другими беспроводными технологиями [10], используемыми для телеметрии GPRS или ZigBee, достигает 10–15 км;
- низкое энергопотребление у конечных устройств благодаря минимальным затратам энергии на передачу небольшого пакета данных;
- высокая проникающая способность радиосигнала в городской застройке при использовании частот субгигагерцового диапазона;
- высокая масштабируемость сети на больших территориях;
- отсутствие необходимости получения частотного разрешения и платы за радиочастотный спектр вследствие использования нелицензируемых частот (ISM band).

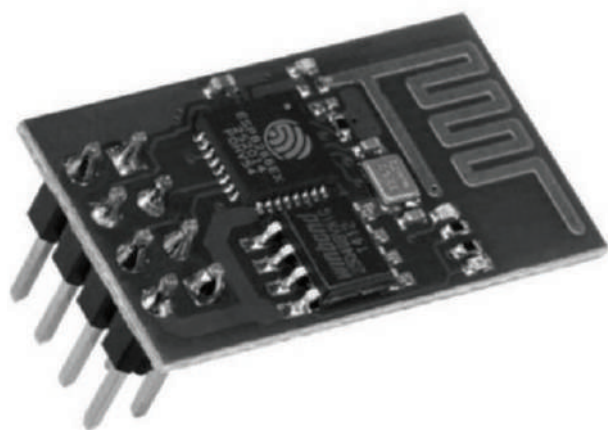


Рисунок 1. Wi-Fi-модуль ESP8266



Рисунок 2. Панель инструментов Widget Box облачного сервиса Blynk и пример окна iOS или Android-приложения



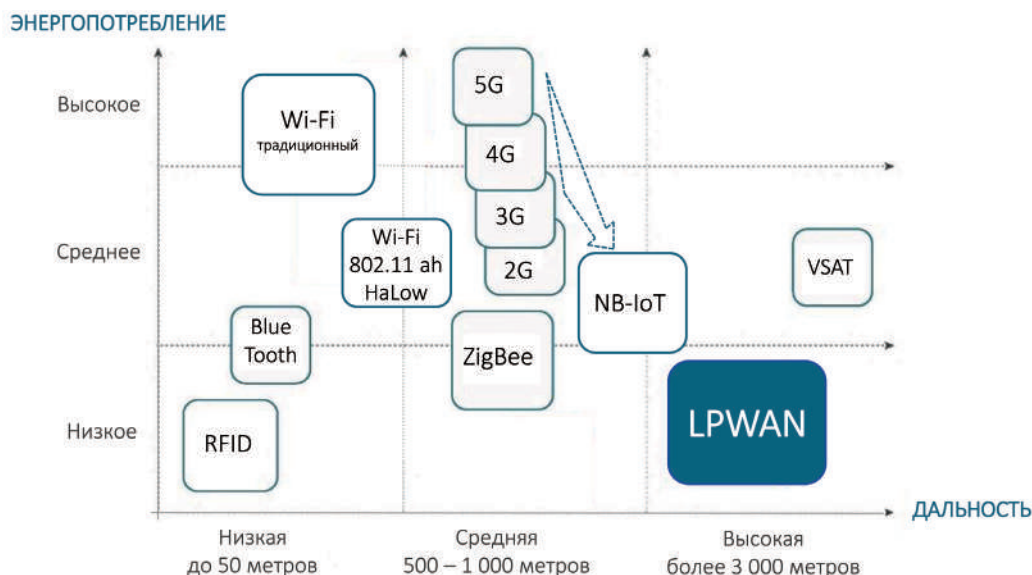


Рисунок 3. Позиционирование сегмента LPWAN сервисов

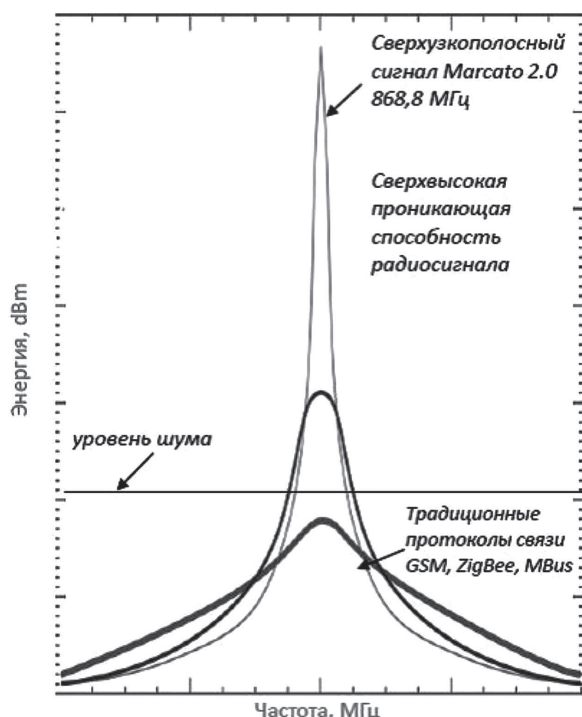


Рисунок 4. Сверхузкополосный сигнал Marcato 2.0 868,8МГц

На рисунке 3 приведена сравнительная характеристика существующих беспроводных технологий передачи данных.

Динамично развивается российская телекоммуникационная компания «СТРИЖ Телематика» — разработчик автоматизированных решений на базе собственной LPWAN технологии [11]. Компания имеет собствен-

ное производство радиомодулей и базовых станций, занимается построением национальной LPWAN сети для подключения различных энергоэффективных устройств, приборов и датчиков. В основе беспроводного LPWAN-протокола энергоэффективной связи Marcato 2.0 (рисунок 4), разработанного «СТРИЖ Телематика», лежит передача радиосигнала с применением узкополосного метода в нелицензируемой полосе частот 868 МГц. Протокол позволяет передавать небольшие пакеты данных на дальние расстояния.

На рисунке 5 приведены разработанные «СТРИЖ Телематика» встраиваемый радиомодуль (модем) LPWAN и универсальный радиомодем Тиффани с батарейным питанием (продолжительность автономной работы до 40 лет) [11]. Максимальная дальность передачи — до 50 км, минимальная скорость передачи — от 10 бит/с (bps), причем чем меньше скорость, тем больше дальность, минимальная стоимость радиомодуля не более 2 USD. Конечно, стоимость решения с помощью LPWAN технологии будет больше и, прежде всего, из-за необходимости развертывания сети с монтажом базовых станций вместо использования имеющей сети сотовой связи или сети Интернет.



**Рисунок 5.** Встраиваемый радиомодуль (модем) LPWAN и универсальный радиомодем Тиффани от «СТРИЖ Телематика»

*Предлагается разработка и внедрение сетевых технологий в агропромышленном комплексе, которые позволили бы решить следующие основные задачи.*

— Автоматизация и мониторинг доильного оборудования. Дистанционный контроль по сети и мониторинг количества (а возможно и качества) подоенного доильным оборудованием молока, что позволит предотвратить его неконтролируемое разбавление производителем. Для этого производится модернизация блока учета молока, стандартно применяемого в составе доильного оборудования на фермах и летних дойках – дополнительно вводится модуль для подключения к сети (например Wi-Fi модуль [6] (рисунок 1) или радиомодуль (модем) [11] технологии LPWAN [9]), разрабатывается специальное программное обеспечение. Обычно блок учета молока при доении в молокопровод имеет возможность подключения нескольких каналов от порционных датчиков молока, стандартный двухстрочный ЖК-дисплей, возможность сброса показаний от RFID-считывателя. Есть возможность реализовать это устройство на базе платформы Arduino, используя имеющиеся стандартные модули, и добавив Wi-Fi модуль ESP8266, например, реализовать мониторинг показаний по сети. При этом можно обойтись (хотя бы на стадии макетного образца) без трудоемких процессов разработки принципиальной схемы, разводки печатной платы, сборки макета, а разработка и отладка собственного программного обеспечения упрощается за счет использования среды разработки Arduino IDE, широко

известной в сети и с большим количеством библиотек. Также возможны реализация дистанционного контроля по сети и мониторинг работы автоматов промывки, предназначенных для управления процессом промывки доильной аппаратуры. Для этого производится их модернизация – дополнительно вводится модуль для подключения к сети (например Wi-Fi модуль [6] (рисунок 1) или радиомодуль (модем) [9] технологии LPWAN [11]), разрабатывается специальное программное обеспечение, причем есть возможность реализовать большинство блоков этого устройства также на базе платформы Arduino

— Исследование возможностей мониторинга и удаленного управления температурным режимом, климатом и теплопотреблением жилых зданий [12, 13]. В целях повышения энергосбережения (в жилых помещениях) или в технологических целях (например в теплицах) часто необходимо поддерживать требуемый температурный или климатический режим в помещении. Обычно в таких устройствах имеются индикация параметров (температуры, влажности) и интерфейс пользователя в виде небольшого графического либо алфавитно-цифрового дисплея и какой-то функциональной клавиатуры, ручки регулятора температуры или влажности. Также бывает необходимо дистанционно отслеживать параметры или управлять устройством дистанционно, например менять температурный режим, программу функционирования по дням недели.

Реализация такого собственного проекта с разработкой принципиальной схемы, разводкой печатной платы, сборкой, написанием под это устройство собственного программного обеспечения, его отладкой требует достаточно больших трудозатрат. Хорошим решением в такой ситуации может быть использование отладочной платы PIC WEB-EK [14] для контроллера PIC18F97J60. Контроллер PIC18F97J60 от компании Microchip Technology Inc., специализированный, со встроенным 10Base-T Ethernet-контроллером и интегрированным MAC и PHY. Физический уровень реализован в самом контроллере, т. е. развязывающий трансформатор подключается сразу на кон-

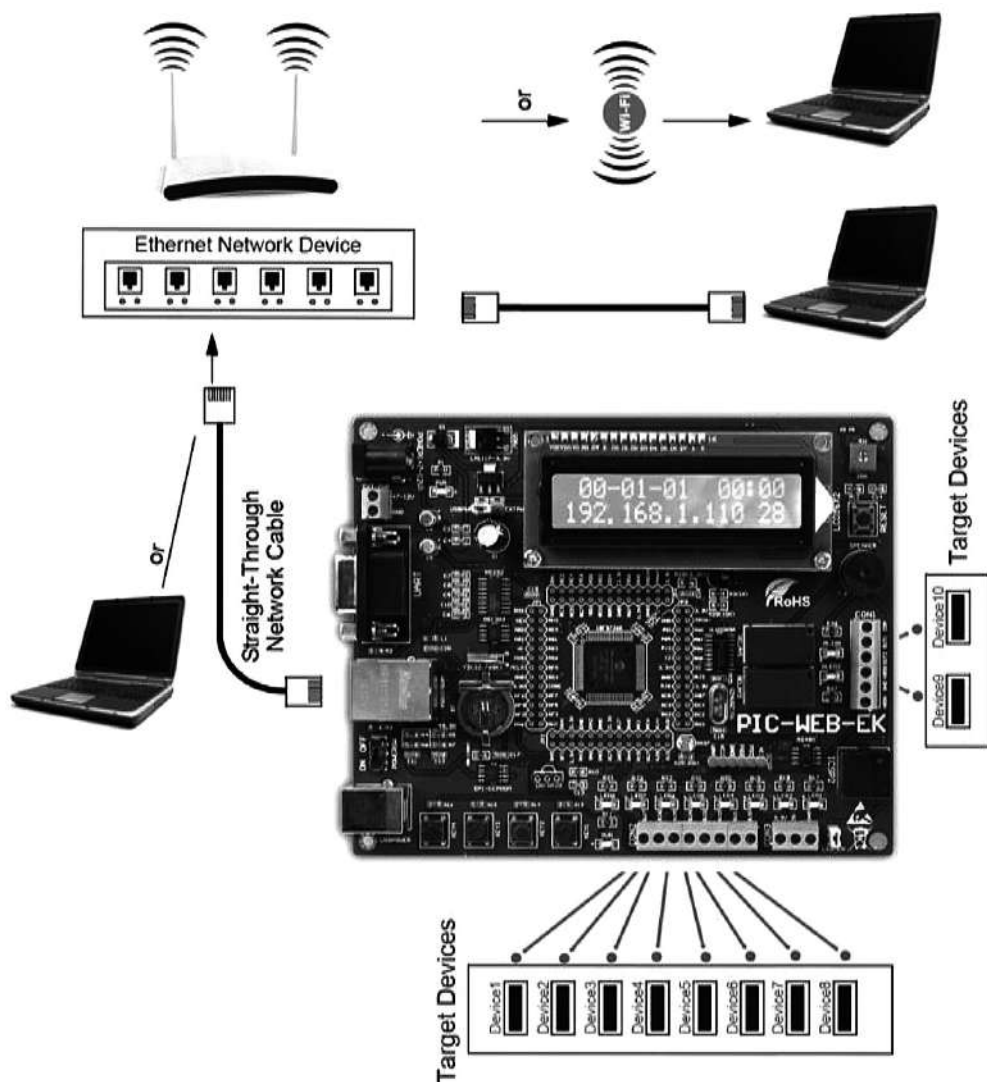


Рисунок 6. Типовая схема подключения PIC WEB-EK для контроллера PIC18F97J6

троллер. Фактически на одном только разьеме, кварцевом осцилляторе и микроконтроллере, а также при минимальной обвязке возможно реализовать, например, самодостаточный веб-сервер, пригодный для многих применений в области автоматизации. Отладочная плата PIC WEB-EK может быть использована для удаленного мониторинга и управления через сеть Ethernet, поставляемые с платой исходные файлы демонстрируют ее возможности: мониторинг и управление 8-ю цифровыми выходами, управление 2-мя выходами реле, снятие показаний термодатчика (рисунок 6).

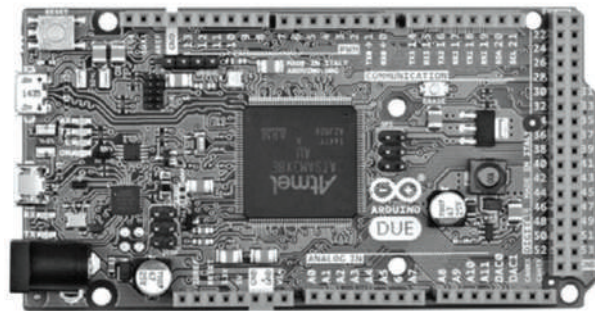
Большие функциональные возможности в сочетании с относительно низкой ценой (PIC WEB-EK от китайского производителя) позволяют реализовать на этой плате разнообразные устройства, исключая или сводя к минимуму ее схемную доработку. Модификация устройства под требования конкретного применения может состоять только в перепрограммировании устройства, что легко осуществляется через имеющийся разъем внутрисхемного программирования ICSP с помощью практически любых программаторов или отладчиков PIC-контроллеров, например, внутрисхемный отладчик PICKIT2 или PICKIT3.

— Автоматизация в пчеловодстве помогла бы решить сразу несколько проблем. Рассмотрим основные, относительно легко технически решаемые проблемы. Диагностика состояния пчелосемей по звукам, издаваемым пчелиным ульем. В летний период необходимо и возможно определить различные этапы в жизни улья: спокойное состояние, вентиляция, пение матки, выход роя, облет пчел и др. Особо важным является возможность распознать пение матки и выход

Рассмотрим основные, относительно легко технически решаемые проблемы. Диагностика состояния пчелосемей по звукам, издаваемым пчелиным ульем. В летний период необходимо и возможно определить различные этапы в жизни улья: спокойное состояние, вентиляция, пение матки, выход роя, облет пчел и др. Особо важным является возможность распознать пение матки и выход

роя, т. к. в период роения велика вероятность потерь пчел, и пчеловоды в этот период вынуждены, не отлучаясь, постоянно визуально следить за пасекой. Кроме того, многие опытные пчеловоды проводят различные мероприятия для устранения роения (делают так называемые отводки и др.), что может быть довольно трудозатратно. В период зимовки также по звукам можно определить состояние пчелосемьи, например, определить ситуации недостатка корма, болезни пчел, нарушения температурного режима в зимовнике, повышенной влажности и др., требующие вмешательства пчеловода. Для мониторинга состояния пчелосемьи, кроме звуковых сигналов улья, также целесообразно снятие температуры в улье, т.к. повышенная температура при зимовке сигнализирует о беспокойстве пчел. Имеет значение влажность в улье — изменение влажности может быть тревожным сигналом. После проведенного анализа состояния проблемы мы предлагаем достаточно бюджетное решение с использованием платформы Arduino, с подключением Wi-Fi модуля ESP8266 [6], микрофонного модуля [15], Micro SD-карты [16] (необходимой для хранения сэмплов), датчика температуры. Для распознавания предлагается использовать алгоритмы искусственных нейронных сетей (ИНС) — нейросетей (neuronet)) [17], причем предварительно провести разложение частотного спектра, для чего использовать алгоритмы быстрого преобразования Фурье (FFT), имеются, например, библиотеки 8-битного преобразования [18]. Таким образом, предлагаем реализовать мониторинг звуков пчелосемьи и температуры в улье. Предлагается периодически небольшими кусками делать выборки сигнала с микрофонного модуля, оцифровывать с помощью платы Arduino и только в случае обнаружения изменения состояния пчелосемьи (например зафиксировалось пение матки) включать Wi-Fi модуль. Это позволит свести к минимуму энергопотребление устройства, что особенно важно ввиду использования автономного питания. Поскольку требуются большие объемы ОЗУ для выборок (частота дискретизации для звукового сигнала 48 кГц, предлагается более

высокочастотные составляющие части спектра для упрощения не анализировать) и высокая скорость обработки, предлагается использовать Arduino Due [19] на базе 32-битного МК ARM Cortex-M3 86 МГц, 512K flash + 96K RAM (рисунок 7). Клоны Arduino Due от китайских производителей могут стоить относительно недорого — от 15 USD.



**Рисунок 7.** Arduino Due на базе 32-битного МК ARM Cortex-M3

— Предлагается также автоматизация тепличного хозяйства, мониторинг и удаленное управление устройствами автоматизации малых тепличных фермерских хозяйств с помощью современных сетевых электронных технологий.

Обычно устройства автоматизации в теплицах выполняют следующие функции:

— мониторинг климатических параметров теплицы, т. е. оперативное получение всей необходимой информации о климатических параметрах теплицы: температура и влажность воздуха, температура и влажность почвы, освещенность теплицы;

— реализация возможности управления теплицей: полив, обогрев, вентиляция растений, регулирование освещенности растений.

Функция мониторинга по сети необходима для того, чтобы убедиться, что все климатические параметры теплицы в норме, проверить, есть ли вода в системе водоснабжения, не выключалось ли электричество (необходимо продумать переход на резервное питание от аккумулятора или источника бесперебойного питания) и т. п., возможно удаленное управление по сети.

Предлагается автоматизация малых птицеводческих фермерских хозяйств с помощью современных сетевых электронных технологий. Исследование возможностей монито-

ринга и удаленного управления устройствами автоматизации малых птицеводческих фермерских хозяйств с помощью современных сетевых электронных технологий.

Обычно устройства автоматизации малых птицеводческих фермерских хозяйств выполняют следующие функции: измерение и поддержание климатических параметров в помещении: температуры и влажности воздуха, а также уровня содержания паров аммиака. Для регулирования и контроля этих параметров используется обычно регуляция скорости вращения двигателя вытяжной вентиляции и, возможно еще, коммутация электронагревателей. Функция мониторинга по сети необходима для того, чтобы убедиться, что все климатические параметры помещения в норме, не выключалось ли электричество, а также возможно удаленное управление параметрами климата по сети.

*3. Ожидаемые результаты исследований и разработок:*

- проверка реализуемости идеи контроля качества молочной продукции с использованием сетевых технологий;

- апробирование энерго- и теплосберегающих технологий, использующих сеть Интернет;

- экспериментальная проверка возможности удаленной диагностики состояния пчелосемей по звукам, издаваемым пчелиным ульем;

- апробирование современных сетевых электронных технологий для автоматизации малых тепличных фермерских

хозяйств и малых птицеводческих фермерских хозяйств.

### **Выводы**

Предлагаются потенциальные возможности использования результатов исследования при решении прикладных задач в регионе:

- реализация проекта повысит конкурентоспособность агропромышленного производства в Республике Башкортостан и будет способствовать продвижению в других регионах РФ республиканских брендов продуктов питания на основе сельскохозяйственного сырья, производимого в республике;

- появится возможность контроля качества молочной продукции с использованием сетевых технологий;

- повышение энерго- и теплосбережения за счет оптимизации отопления муниципальных образовательных учреждений: школ, вузов, детских садов;

- повышение продуктивности пчеловодных хозяйств в республике;

- развитие малых тепличных фермерских хозяйств и малых птицеводческих фермерских хозяйств в республике;

- потенциальная возможность развития студенческих инициатив через инновационные проекты в области интернета вещей в агросекторе на базе существующих или вновь созданных технопарков и бизнес-инкубаторов в рамках совместных проектов ведущих вузов республики. Предполагается активное привлечение студентов в исследования при реализации проекта.

### **Список литературы**

1. Ураксеев М.А., Важаев К.В. Акустооптические датчики физических величин. Уфа: Уфимск. гос. акад. эконом. и сервиса, 2008. 111 с.

2. Важаев К.В., Губайдуллин А.Г. Волоконно-оптические датчики на акустооптическом эффекте // Приборы и системы управления, контроль, диагностика. 2011. № 2. С. 36–40.

3. Важаев К.В. Акустооптические устройства и их применение в приборах и информационно-измерительных системах // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 1. С. 148–151.

4. Интернет\_вещей [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет\\_вещей](https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет_вещей).

5. Сельскому хозяйству необходим интернет вещей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2016/12/14/669472-selskomu-hozyaistvu-internet-veschei>.

6. ESP8266 Module WIFI for Arduino [Online]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/ESP8266-Receive-AP-STA-Hot-Wireless-Send-Transceiver-Module-WIFI-For-Ardui>№

7. Arduino IDE для ESP8266: краткий обзор реализованных в настоящее время

функций [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://esp8266.ru/arduino-ide-esp8266/#func>.

8. Platform with iOs and Android apps to control Arduino, ESP8266, Raspberry Pi and similar microcontroller boards over the Internet [Electronic Resource]. Available at: <https://github.com/blynkkk/blynk-server>.

9. LPWAN [Electronic Resource]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/LPWAN>.

10. Важддаев К.В., Абдрахманов В.Х., Салихов Р.Б. Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы 2016. № 2, Т. 12. С. 70–75.

11. LPWAN-технология «СТРИЖ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://strij.tech/tehnologiya-strizh>.

12. Salikhov R.B., Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V. System of Monitoring and Remote Control of Temperature Conditions, Climate and Heat Consumption // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE – 2016): XIII International scientific-technical conference, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, October 3–6, 2016. 2016. Vol. 1. Part 3. P. 171–174.

13. Абдрахманов В.Х., Важддаев К.В., Салихов Р.Б. Информационно-измерительная система дистанционного контроля параметров микроклимата // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 3, Т. 12. С. 91–99.

14. PIC Ethernet Development Board PIC-WEB-EK [Electronic Resource]. Available at: <http://www.logifind.com/pic-dspic-pic32-pic24/development-boards/pic-ethernet-development-board-pic-web-ek-for-pic18f97j60-952.html>.

15. Microphone Sensor AVR PIC High Sensitivity Sound Detection Module for Arduino [Electronic Resource]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/201414878181>.

16. Micro SD Storage Board [Electronic Resource]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/Micro-SD-Storage-Board-Micro-SD-TF-Card-Memory-Shield-Module-SPI-For-Arduino-UR>.

17. Искусственные нейронные сети [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://robocraft.ru/blog/algorithm/558.html>.

18. Modified 8bit FFT [Electronic Resource]. Available at: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=38153.msg282965#msg282965>.

19. Arduino Due. [Electronic Resource]. Available at: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>.

## References

1. Urakseev M.A., Vazhdaev K.V. Akustoopticheskie datchiki fizicheskikh velichin. Ufa: Ufimsk. gos. akad. jekonom. i servisa, 2008. 111 s.

2. Vazhdaev K.V., Gubajdullin A.G. Volokonno-opticheskie datchiki na akustoopticheskom jeffekte // Pribory i sistemy upravlenija, kontrol', diagnostika. 2011. № 2. S. 36–40.

3. Vazhdaev K.V. Akustoopticheskie ustrojstva i ih primenenie v priborah i informacionno-izmeritel'nyh sistemah // Neftegazovoe delo. 2012. T. 10. № 1. S. 148–151.

4. Internet\_veshhej [Electronic Resource]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Internet\\_veshhej](https://ru.wikipedia.org/wiki/Internet_veshhej).

5. Sel'skomu hozjajstvu neobhodim internet veshhej [Electronic Resource]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2016/12/14/669472-selskomu-hozyaistvu-internet-veschei>.

6. ESP8266 Module WIFI for Arduino [Electronic Resource]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/ESP8266-Receive-AP-STA-Hot-Wireless-Send-Transceiver-Module-WIFI-For-Arduino>

7. Arduino IDE dlja ESP8266: kratkij obzor realizovannyh v nastojashhee vremja funkcij [Electronic Resource]. Available at: <https://esp8266.ru/arduino-ide-esp8266/#func>.

8. Platform with iOs and Android apps to control Arduino, ESP8266, Raspberry Pi and similar microcontroller boards over the Internet [Electronic Resource]. Available at: <https://github.com/blynkkk/blynk-server>.

9. LPWAN [Electronic Resource]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/LPWAN>.

10. Vazhdaev K.V., Abdrakhmanov V.H., Salihov R.B. Intellektual'naja sistema zhilyh zon na osnove informacionno-izmeritel'nyh sistem upravlenija // Jelektrotehnicheskie i informa-

cionnye komplekсы i sistemy. 2016. № 2. T. 12. S. 70–75.

11. LPWAN-tehnologija «STRIZh» [Electronic Resource]. Available at: <https://strij.tech/tehnologiya-strizh>.

12. Salikhov R.B., Abdrakhmanov V.Kh., Vazhdaev K.V. System of Monitoring and Remote Control of Temperature Conditions, Climate and Heat Consumption // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE – 2016): XIII International scientific-technical conference, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, October 3-6, 2016. 2016. Vol. 1. Part 3. P. 171–174.

13. Abdrakhmanov V.H., Vazhdaev K.V., Salihov R.B. Informacionno-izmeritel'naja sistema distancionnogo kontrolja parametrov mikroklimata // Jelektrotehničeskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2016. № 3, T. 12. S. 91–99.

14. PIC Ethernet Development Board PIC-WEB-EK [Electronic Resource]. Available at:

<http://www.logifind.com/pic-dspic-pic32-pic24/development-boards/pic-ethernet-development-board-pic-web-ek-for-pic18f97j60-952.html>.

15. Microphone Sensor AVR PIC High Sensitivity Sound Detection Module For Arduino [Electronic Resource]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/201414878181>.

16. Micro SD Storage Board [Electronic Resource]. Available at: <http://www.ebay.com/itm/Micro-SD-Storage-Board-Mciro-SD-TF-Card-Memory-Shield-Module-SPI-For-Arduino-UR>.

17. Iskusstvennye nejronnye seti [Electronic Resource]. Available at: <http://robocraft.ru/blog/algorithm/558.html>.

18. Modified 8bit FFT [Electronic Resource]. Available at: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=38153.msg282965#msg282965>.

19. Arduino Due [Electronic Resource]. Available at: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>.



**Матанцев А. Б.**  
**Matantsev A. B.**  
аспирант кафедры  
«Информационно-  
измерительная техника»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация



**Ясовеев В. Х.**  
**Yasoveev V. Kh.**  
доктор технических наук,  
профессор, заведующий  
кафедрой «Информационно-  
измерительная техника»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный  
технический университет»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация



**Уразбахтина Ю. О.**  
**Urazbakhitina Yu. O.**  
кандидат технических наук,  
доцент, декан факультета  
авионики, энергетики  
и инфокоммуникаций,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный  
авиационный технический  
университет»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация

УДК 615.47-114:616-07-08

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ МНОГОСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ ГАЗОАНАЛИЗА

*Helicobacter pylori* (*H. pylori*) — спиралевидная грамотрицательная бактерия, которая инфицирует различные области желудка и двенадцатиперстной кишки. Многие случаи язв желудка и двенадцатиперстной кишки, гастритов, дуоденитов, и, возможно, некоторые случаи лимфом желудка и рака желудка этиологически связаны с инфекцией *Helicobacter pylori*. В процессе своей жизнедеятельности бактерия расщепляет слизь, которая защищает желудок, и на эти оголенные участки попадает агрессивный желудочный сок с содержанием пищеварительных ферментов. Кроме того, бактерия выделяет особые токсины, которые способны вызвать иммунное воспаление и отторжение слизистой желудка. В некоторых случаях *H. pylori*, наоборот, провоцирует снижение выработки желудком соляной кислоты, что тоже вредно, и приводит к атрофическому гастриту с поражением функции пищеварительной системы. Поэтому весьма актуальным является построение измерительной системы для экспресс-диагностики хеликобактерной инфекции, которая позволит выявлять наличие инфицирования вышеназванной бактерией на ранних стадиях развития заболеваний.

В статье описана система экспресс-диагностики хеликобактериоза, принцип работы которой основан на факте выделения бактерией уреазы. При химической реакции уреазы и принимаемой пациентом мочевины образуется газообразный аммиак, который попадает в выдыхаемый воздух. По разности концентраций аммиака до и после приёма мочевины можно судить о поражении слизистой оболочки желудка штаммом *Helicobacter pylori*. Данный метод исследования прост в реализации, и кроме того исключает возможность заражения через медицинский инструмент, поскольку для проведения исследования не требуется взятие биопробы. Использование нескольких датчиков для дыхательной диагностики позволяет повысить точность измерения и тем самым снизить количество ложноположительных и ложноотрицательных результатов исследования. Проведен анализ возможности применения искусственной нейронной сети для ввода измерений от многосенсорной системы. Рассчитаны погрешности и показаны преимущества применения нейросети. Рассмотренная система предлагается к использованию в лечебных, лечебно-профилактических учреждениях, а также на дому. Система может применяться для экспресс-диагностики



хеликобактериоза, для периодического контроля эффективности назначенного лечения, а также для самостоятельной диагностики пациентом.

**Ключевые слова:** *Helicobacter pylori*, диагностика, уреазы, измерительная система.

## USAGE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR ERROR REDUCTION OF MULTI-SENSOR GAS ANALYSIS SYSTEMS

*Helicobacter pylori* (*H. pylori*) is a spiral gram-negative bacterium which infects different areas of stomach and duodenum. A lot of stomach and duodenum ulcer and gastritis cases are etiologically connected to *H. pylori* infection, such as probably some cases of stomach lymphoma and stomach cancer. During its lifetime, the bacterium dissolves mucus that protects stomach, so aggressive gastric juice with enzymes gets to these unprotected areas. Moreover, the bacterium produces special toxins, which are capable of causing immune inflammation and abruption of stomach mucosa. In some cases *H. pylori* may otherwise cause recession of gastric acid production, which is also harmful and leads to atrophic gastritis with digestive system lesion. This is why development of express diagnosis measurement system is important, as the system allows to detect presence of *H. pylori* infection at early stages. This article describes system of express diagnosis of *H. pylori* infection based on measurement of concentration of urease produced by the bacterium. As a result of chemical reaction between urease and urea taken by patient, a gaseous ammonia is produced, which gets into air exhaled. By comparing the difference of ammonia concentration before and after urea adoption one can confirm stomach mucosa lesion caused by *H. pylori*. This method is simple in realization and excludes the possibility of contamination through medical instruments, because bioprobe is not needed. Usage of several gas sensors for urea breath diagnosis allows to increase measurement accuracy and therefore to lower the number of false-positive and false-negative results of diagnosis. Analysis of possible usage of artificial neural network for multi-sensor system signal input is conducted. Errors of such method are calculated and advantages of neural network usage are shown. The system reviewed is proposed to be applied at hospitals, health care facilities and for home use. It can be used for express diagnosis of *H. pylori* infection, for periodical control of prescribed treatment effectiveness and for self-diagnosis by patient.

**Key words:** *Helicobacter pylori*, diagnosis, urease, measurement system.

*Helicobacter pylori* (*H. pylori*) — спиралевидная грамотрицательная бактерия, которая инфицирует различные области желудка и двенадцатиперстной кишки. Многие случаи язв желудка и двенадцатиперстной кишки, гастритов, дуоденитов, и, возможно, некоторые случаи лимфом желудка и рака желудка этиологически связаны с инфекцией *Helicobacter pylori*. Поэтому весьма актуальным является построение измерительной системы для экспресс-диагностики хеликобактерной инфекции, которая позволит выявлять наличие инфицирования вышеназванной бактерией на ранних стадиях развития заболеваний [1, 2]. Авторами предлагается неинвазивная система экспресс-диагностики хеликобактериоза с помощью уреазных дыхательных тестов, основанных на определении концентрации аммиака в выдыхаемом воздухе. Данные методы предполагают приём пациен-

том мочевины нормального изотопного состава и последующее измерение концентрации аммиака с помощью газоанализатора с датчиками полупроводникового типа. К достоинствам метода можно отнести невысокую стоимость обследования, скорость получения результатов, высокую чувствительность (96%), значительно меньшую по сравнению с системами, содержащими в своем составе масс-спектрографы, стоимость оборудования.

Полупроводниковые датчики газа дешевы, обладают высокой чувствительностью (до 50 объемных миллионных долей в объемном соотношении), что делает их достаточно перспективными для применения в системах неинвазивной дыхательной диагностики. Однако такие датчики имеют также и недостатки, главным из которых является наличие перекрестной чувствительности. Это означает, что датчик чувствителен не только к

газу, на который рассчитан, но также и к другим, хотя и меньшей чувствительностью. Явление перекрёстной чувствительности на примере датчика TGS826 фирмы Figaro проиллюстрировано на рисунке 1. Здесь  $R_S$  — сопротивление датчика при воздействии газа;  $R_0$  — сопротивление датчика в чистом воздухе. Концентрация газа выражена в м.д.

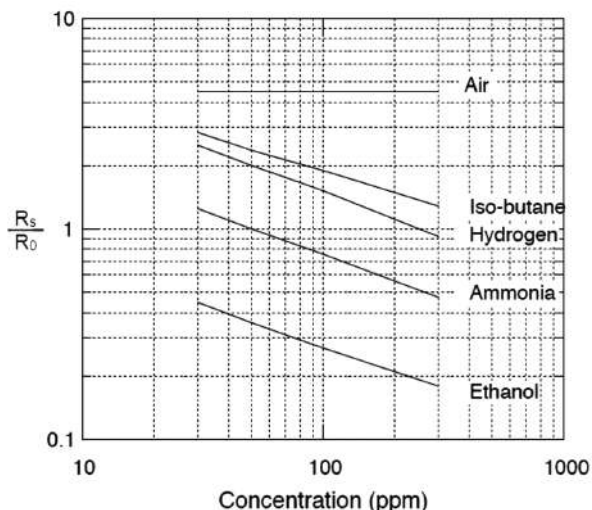


Рисунок 1. Перекрёстная чувствительность датчика TGS826

Как видно из рисунка 1, датчик чувствителен в том числе и к этанолу. Это означает, что в условиях поликлиники или больницы, где в составе дезинфицирующих веществ зачастую используются спирты, возможно искажение показаний датчика, и как следствие постановка ошибочного диагноза.

Одним из возможных решений проблемы перекрёстной чувствительности является создание многосенсорной системы. Предлагаемая

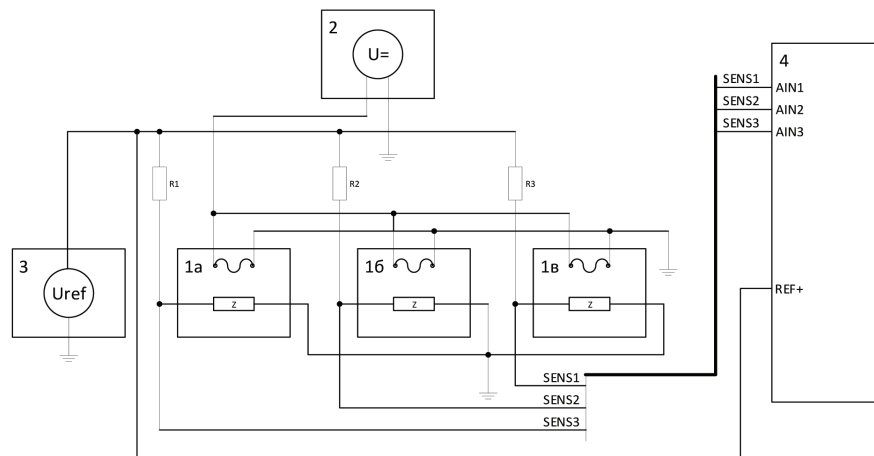
система объединяет в себе достоинства датчиков полупроводникового типа и устойчивость искусственной нейросети к случайным возмущениям, а также возможность работы в загрязнённой газовой среде.

Структурная схема измерительного канала с применением нескольких датчиков приведена на рисунке 2.

В измерительный канал помимо датчика, чувствительного к аммиаку, устанавливаются датчики, чувствительные к газам, которые также влияют на показания основного датчика (TGS2620, чувствительный к летучим органическим растворителям; MQ3, чувствительный к алкоголю, бензину, метану). Однако эти вспомогательные датчики обладают большей чувствительностью к примесным газам. При измерении оцениваются показания всех датчиков, и показания основного корректируются с учётом показаний вспомогательных. Работа с датчиками как источниками сигнала о концентрации различных газов осуществляется с помощью искусственной нейросети [3–9].

В таблице 1 приведено распределение весов синапсов датчиков газа в соответствии с их чувствительностью к газам.

Дальнейшее обучение и работа нейросети производятся непосредственно в тех условиях, в которых предполагается проводить исследования. Другими словами, нейросеть постепенно обучается отсекал именно те примесные газы, которые присутствуют в конкретном диагностическом кабинете. Важно учитывать, что при ощутимой смене условий



1 — полупроводниковые датчики: 1а — TGS2444; 1б — TGS2620; 1в — MQ-3; 2 — источник питания нагревательного элемента датчика; 3 — источник опорного напряжения для чувствительного элемента датчика; 4 — многоканальный АЦП

Рисунок 2. Измерительный канал с применением нескольких датчиков

**Таблица 1.** Веса синапсов искусственных нейронов

Газ \ Датчик	TGS2444	TGS826	MQ-3	MQ307A	MQ136	MQ-8	TGS2620	TGS2611	TGS821
NH <sub>3</sub>	0,04	0,002							
NH <sub>4</sub>					0,032				
Этанол	0,012	0,003	0,2			0,41	0,67	0,18	0,19
H <sub>2</sub>	0,012	0,0015		0,03		0,77	0,23	0,27	0,57
H <sub>2</sub> S	0,01				0,07				
Пропан			0,88			0,19			
Бутан		0,0012					0,11	0,35	
Гексан			0,74						
Бензин			0,32						
CO			0,52	0,006	0,02	0,15	0,32		0,26
CH <sub>4</sub>			0,9			0,1	0,24	0,85	0,02

**Таблица 2.** Соответствие понятий нормализованным величинам

Качественное понятие	Нормализованная величина
Очень значительное изменение	1,00
Значительное изменение	0,75
Среднее изменение	0,50
Небольшое изменение	0,25
Незначительное изменение	0

**Таблица 3.** Соответствие диапазонов изменения концентрации газов нормализованным величинам

Характеристика	0	0,25	0,5	0,75	1
Концентрация					
$\Delta C[NH_3]$ , м.д.	[0; 100)	[100; 500)	[500; 1000)	[1000; 2000)	$\geq 2000$
$\Delta C[CO_2]$ , м.д.	[0; 250)	[250; 700)	[700; 1500)	[1500; 3000)	$\geq 3000$
$\Delta C[C_2H_5OH]$ , м.д.	[0; 50)	[50; 150)	[150; 250)	[250; 500)	$\geq 500$
$\Delta LPG$ , м.д.	[0; 30)	[30; 50)	[50; 70)	[70; 100)	$\geq 100$
$\Delta RH$ , %	[0; 3)	[3; 10)	[10; 30)	[30; 40)	$\geq 40$
$\Delta t^\circ$ , °C	[0; 2)	[2; 5)	[5; 7)	[7; 10)	$\geq 10$

уже обученная нейросеть может выдавать некорректные данные. Поэтому при значительном изменении рекомендуется заново запрограммировать нейросеть начальными значениями. При этом значения, сформированные нейросетью в процессе обучения, можно считывать из микроконтроллера и затем использовать для программирования устройства, помещаемого в данные условия.

Проведена нормализация входных сигналов нейросети: в соответствии с диапазонами изменения входных величин приведены качественные понятия, описанные в таблице 2.

Экспертная оценка характеристик датчиков приведена в таблице 3.

Функция активации нейронной сети (рисунок 3) задаётся в виде кусочной функции:

$$\begin{cases} 0, S < 0 \\ S, 0 \geq S > 1. \\ 1, S \geq 1 \end{cases}$$

На графике (рисунок 3) по оси абсцисс отложена сумма экспертных оценок характеристик сигнала в соответствии с таблицей 3 (усл. ед.); по оси ординат указана величина выходного сигнала (от 0 % до 100 % от максимального значения). Для проведения измерений выбрана кусочная функция с коэффициентом  $S = 1$ . Нейросеть должна различать дыхание и с помощью скорректированных показаний определять степень инфицирован-



**Рисунок 3.** Функция активации нейросети

ности *Helicobacter pylori*. Обучающую выборку составляют с учетом возможного состояния газовой смеси. Примесными газами могут быть пары этанола, озон (образуется при кварцевании) и др.

Для каждого датчика производителем предусматривается определённое напряжение питания. При этом, как правило, не указывается требуемая точность напряжения. Между тем, поскольку датчик по сути своей является резистивным делителем, любой дрейф напряжения питания при воздействии газа вызовет отклонение в показаниях датчика, поэтому важно обеспечить точный, насколько это возможно, уровень напряжения питания. Прямое применение источников опорного напряжения в данном случае невозможно, поскольку их максимальный ток обычно не превышает 10 мА. Следовательно, необходим буферный элемент. Схема питания нагревательных элементов датчиков изображена на рисунке 4.

Здесь D1 — источник опорного напряжения с дополнительной подстройкой выхода (потенциометр R5), например, AD586 от Analog Devices; D2 — мощный ОУ, включенный по схеме повторителя напряжения, например, ОРА547 от Texas Instruments. Резистор R6 установлен для компенсации входного сопротивления операционного усилителя. Максимальный выходной ток ОУ должен быть не менее требуемого для нормальной работы датчиков. Приведённый в примере ОРА547 способен постоянно выдавать ток не менее 500 мА. Также он оснащён

специальными выводами ILIM (для ограничения максимального выходного тока) и E/S (для включения и отключения выходных каскадов ОУ).

В промышленности полупроводниковые датчики обычно устанавливаются в помещениях, где выбросы газа нежелательны, и могут привести к опасной ситуации. Соответственно, воздушную среду в таких помещениях стараются поддерживать постоянной, и изменение концентрации газа маловероятно. Важно понимать, что в отличие от промышленного применения исследование дыхания пациента требует подготовки датчика газа перед проведением каждого измерения, поскольку для каждого пациента характеристики выдыхаемого воздуха индивидуальны.

Так, например, поток выдыхаемого воздуха нестационарен в отличие от воздуха в помещениях. Для демонстрации влияния такой нестационарности на датчик газа проведём следующий опыт. В нём датчик будет расположен напротив носа по направлению потока выдыхаемого воздуха. Расположение сенсора и полученная осциллограмма показаны на рисунке 5. Как видно из осциллограммы, потоки воздуха вызывают отклонение в показаниях датчика. Также видна общая тенденция к повышению показаний. Следовательно, при разработке медицинской измерительной системы с применением датчика газа следует принять меры для снижения скорости тока газа у поверхности датчика.

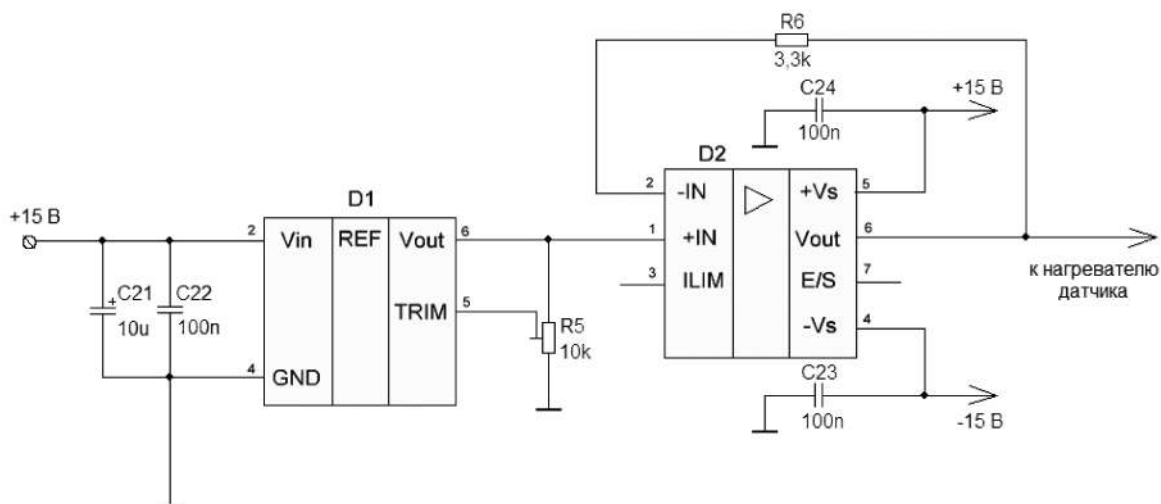
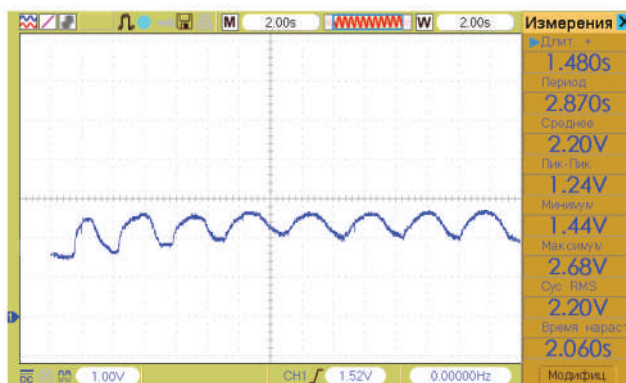
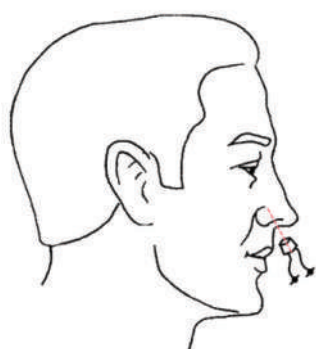


Рисунок 4. Источник опорного напряжения для питания нагревательных элементов датчиков



а) б)

а) расположение датчика; б) осциллограмма показаний датчика

**Рисунок 5.** Проведение опыта для выявления воздействия движущихся потоков газа на датчик

Для исследования влияния перекрестной чувствительности было проведено компьютерное моделирование показаний датчиков на базе данных, приведенных в документации на данные датчики (чувствительность к основному и примесным газам, перечень газов, к которым перекрестно чувствителен датчик).

Исходными данными для моделирования являются зависимости показаний датчиков от концентрации газов, к которым он чувствителен. Для возможности построения непрерывной характеристики данные из документации аппроксимированы с применением пакета Mathematica.

**Таблица 4.** Аппроксимация уравнений чувствительности

Датчик	Графики выходной величины	Уравнения чувствительности
TGS2444		$NH_3: \frac{R_s}{R_0} = 0,030 + \frac{0,813}{x^3} - \frac{1,594}{x^2} + \frac{1,551}{x};$ $H_2S: \frac{R_s}{R_0} = 0,420 + \frac{0,006}{x^3} - \frac{0,083}{x^2} + \frac{0,298}{x};$ $C_2H_5OH: \frac{R_s}{R_0} = 0,489 + \frac{4,389}{x^3} - \frac{6,905}{x^2} + \frac{2,957}{x};$ $H_2: \frac{R_s}{R_0} = 0,361 + \frac{10,956}{x^3} - \frac{16,256}{x^2} + \frac{5,909}{x}.$
TGS2620		$C_2H_5OH: \frac{R_s}{R_0} = 0,026 + \frac{743962,065}{x^3} - \frac{24673,712}{x^2} + \frac{369,607}{x};$ $H_2: \frac{R_s}{R_0} = 0,173 + \frac{539798,890}{x^3} - \frac{19787,738}{x^2} + \frac{316,187}{x};$ $C_4H_{10}: \frac{R_s}{R_0} = 0,257 + \frac{213291,287}{x^3} - \frac{6099,734}{x^2} + \frac{273,837}{x};$ $CO: \frac{R_s}{R_0} = 0,372 + \frac{1338114,890}{x^3} - \frac{43223,370}{x^2} + \frac{660,672}{x};$ $CH_4: \frac{R_s}{R_0} = \frac{2949367,204}{x^3} - \frac{110843,080}{x^2} + \frac{1762,862}{x}$
MQ-135		$C_2H_5OH: \frac{R_s}{R_0} = 0,030 + \frac{850411,017}{x^3} - \frac{22715,565}{x^2} + \frac{407,171}{x};$ $NO_2: \frac{R_s}{R_0} = 0,114 + \frac{26748,770}{x^3} - \frac{2747,356}{x^2} + \frac{101,123}{x};$ $CO: \frac{R_s}{R_0} = 0,225 + \frac{11114,513}{x^3} - \frac{2873,030}{x^2} + \frac{50,089}{x}.$
MQ-136		$CO: \frac{R_s}{R_0} = 1,342 + \frac{9064,327}{x^3} - \frac{983,918}{x^2} + \frac{6,827}{x};$ $NH_4: \frac{R_s}{R_0} = 0,603 + \frac{3070,175}{x^3} - \frac{107,456}{x^2} + \frac{6,827}{x};$ $H_2S: \frac{R_s}{R_0} = 0,096 + \frac{37280,702}{x^3} - \frac{4838,158}{x^2} + \frac{124,048}{x}.$

Создадим матрицу исходных концентраций вышеперечисленных газов. Чтобы исследовать реакцию системы в разных условиях, используем набор значений концентраций газов, сгенерированный случайным образом (таблица 5).

В качестве электрической аналогии датчик можно рассматривать как изменяющуюся проводимость. Если разбить график чувствительности датчика на количество фрагментов, стремящееся к бесконечности, то форма каждого отдельного фрагмента будет приближаться к линейной. Таким образом, в окрестности каждой точки графика чувствительности датчик можно рассматривать как несколько резисторов, включенных параллельно. На рисунке 6, а приведен пример разбиения графика функции чувствительности датчика на малые отрезки, а на рисунке 6, б — эквивалентная электрическая схема дат-

чика на малом отрезке графика, в которой каждый из резисторов отражает чувствительность датчика к одному из газов.

Для каждого газа выходная характеристика датчика выражается в виде  $\gamma = R_s/R_0$ , где  $\gamma$  — выходная характеристика датчика;  $R_s$  — сопротивление датчика при воздействии газа, Ом;  $R_0$  — сопротивление датчика в чистом воздухе, Ом.

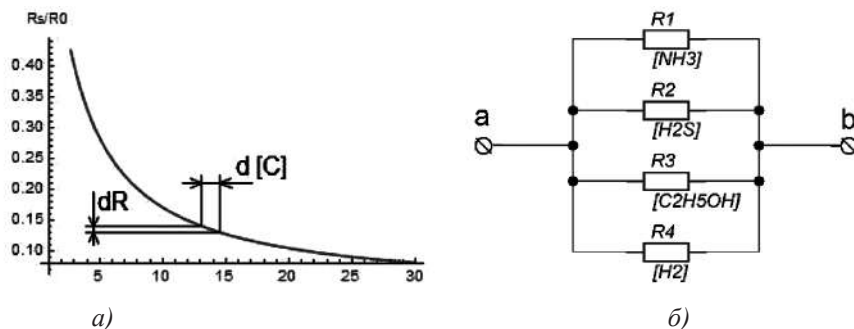
Тогда при воздействии на датчик нескольких газов в соответствии с приведенной выше эквивалентной схемой, проведя преобразования, можно записать:

$$\gamma = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} + \frac{1}{\gamma_3} + \frac{1}{\gamma_4}} \quad (1)$$

Составим сводную таблицу выходных характеристик (таблица 6). В графах для газов, к которым данный датчик нечувствителен, укажем 0.

Таблица 5. Исходные концентрации газов

NH <sub>3</sub> , ppm	H <sub>2</sub> S, ppm	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH, ppm	H <sub>2</sub> , ppm	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , ppm	CO, ppm	CH <sub>4</sub> , ppm	NO <sub>2</sub> , ppm	NH <sub>4</sub> , ppm
123,955	89,836	45,436	72,556	16,689	53,976	79,740	5,021	36,533
7,000	28,496	118,331	2,215	24,432	91,717	6,125	54,9415	4,906
53,670	134,192	131,915	11,785	70,765	86,604	67,390	23,098	73,523
88,542	128,263	137,053	148,641	122,538	114,594	10,376	101,394	3,599
102,578	67,072	22,411	133,018	124,412	114,086	65,690	142,038	113,555
29,803	92,865	45,912	132,115	5,316	92,641	61,957	101,929	43,815
56,182	35,659	6,461	67,386	16,465	81,618	65,772	113,017	9,446
136,041	84,925	129,972	14,343	28,149	60,895	99,087	143,951	6,797



а) деление функции чувствительности датчика на отрезки; б) эквивалентная электрическая схема чувствительного элемента датчика

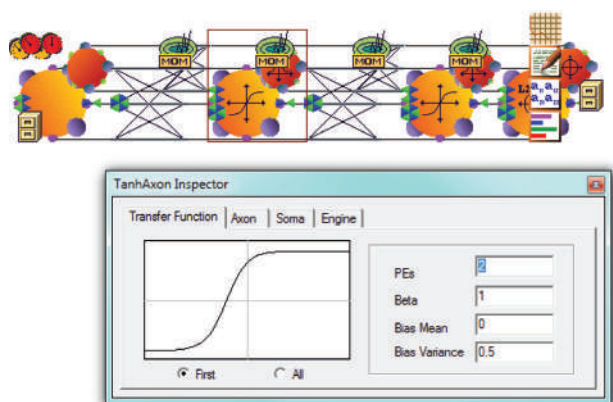
Рисунок 6. График функции чувствительности датчика и эквивалентная электрическая схема чувствительного элемента датчика

Таблица 6. Сводная таблица выходных характеристик датчиков

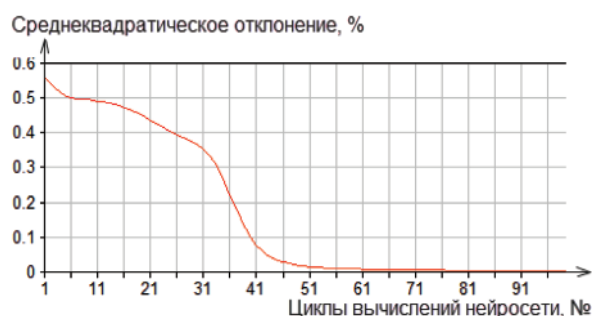
Хар-ка Датчик	$\gamma_{NH_3}$	$\gamma_{H_2S}$	$\gamma_{C_2H_5OH}$	$\gamma_{H_2}$	$\gamma_{C_4H_{10}}$	$\gamma_{CO}$	$\gamma_{CH_4}$	$\gamma_{NO_2}$	$\gamma_{NH_4}$
TGS2444	$\gamma_{TGS2444}^{NH_3}$	$\gamma_{TGS2444}^{H_2S}$	$\gamma_{TGS2444}^{C_2H_5OH}$	$\gamma_{TGS2444}^{H_2}$	0	0	0	0	0
TGS2620	0	0	$\gamma_{TGS2620}^{C_2H_5OH}$	$\gamma_{TGS2620}^{H_2}$	$\gamma_{TGS2620}^{C_4H_{10}}$	$\gamma_{TGS2620}^{CO}$	$\gamma_{TGS2620}^{CH_4}$	0	0
MQ-135	0	0	$\gamma_{MQ-135}^{C_2H_5OH}$	0	0	$\gamma_{MQ-135}^{CO}$	0	$\gamma_{MQ-135}^{NO_2}$	0
MQ-136	0	$\gamma_{MQ-136}^{H_2S}$	0	0	0	$\gamma_{MQ-136}^{CO}$	0	0	$\gamma_{MQ-136}^{NH_4}$

**Таблица 7.** Результирующие выходные характеристики

NH <sub>3</sub> , ppm	TGS2444	TGS2620	MQ-135	MQ-136
123,955	0,036	0,588	0,173	0,447
7,000	0,033	0,921	0,518	0,361
53,670	0,037	1,366	1,184	0,404
88,542	0,038	0,599	0,334	0,426
102,578	0,093	0,810	0,316	0,345
79,789	0,044	1,026	1,302	0,386
107,123	0,040	1,383	1,336	0,393
63,544	0,034	1,027	0,225	0,585
15,789	0,058	0,826	0,483	0,391
29,803	0,034	0,768	0,195	0,347
56,182	0,034	1,277	1,076	0,530
136,041	0,050	0,831	0,195	0,349



**Рисунок 7.** Изменение свойств активационной функции нейросети



**Рисунок 8.** График среднеквадратического отклонения выходного сигнала от ожидаемого

Используя таблицу концентраций газов (таблица 5) и формулу чувствительности датчиков, составим таблицу результирующих выходных характеристик датчиков (таблица 7).

Измеренные показания датчиков переносят в файл редактора Excel, который затем указывают в программе как источник данных для обучения. Кроме показаний датчиков в файле также должны содержаться ожидаемые показания системы, на которые будет ориентироваться нейросеть.

Изменение свойств активационной функции нейросети представлено на рисунке 7. Активационные функции сети отмечены в рабочей области соответствующими значками, а задать параметры этих функций можно в свойствах компонента.

Для наглядного отображения эффективности работы нейросети можно вывести график, показывающий среднеквадратическое отклонение выходного сигнала от ожи-

даемого (рисунок 8). Сравнение полученного результата с желаемым дано на рисунке 9.

Согласно полученным данным, максимальная погрешность при обработке данных с помощью нейросети составит 20 % (для наихудшего случая) при погрешности датчика, связанной с перекрестной чувствительностью, равной 37 %.

Таким образом, применение нескольких датчиков и нейросетевой обработки данных позволяет уменьшить погрешность измерения на 17 %.

**Выводы**

В данной статье разработана модель чувствительности полупроводниковых датчиков газа, а также предложена методика корректировки показаний этих датчиков с применением нейросетевых технологий, что позволяет снизить погрешности измерения до 17 %.

Предложенный способ позволит производить неинвазивную диагностику бактериаль-

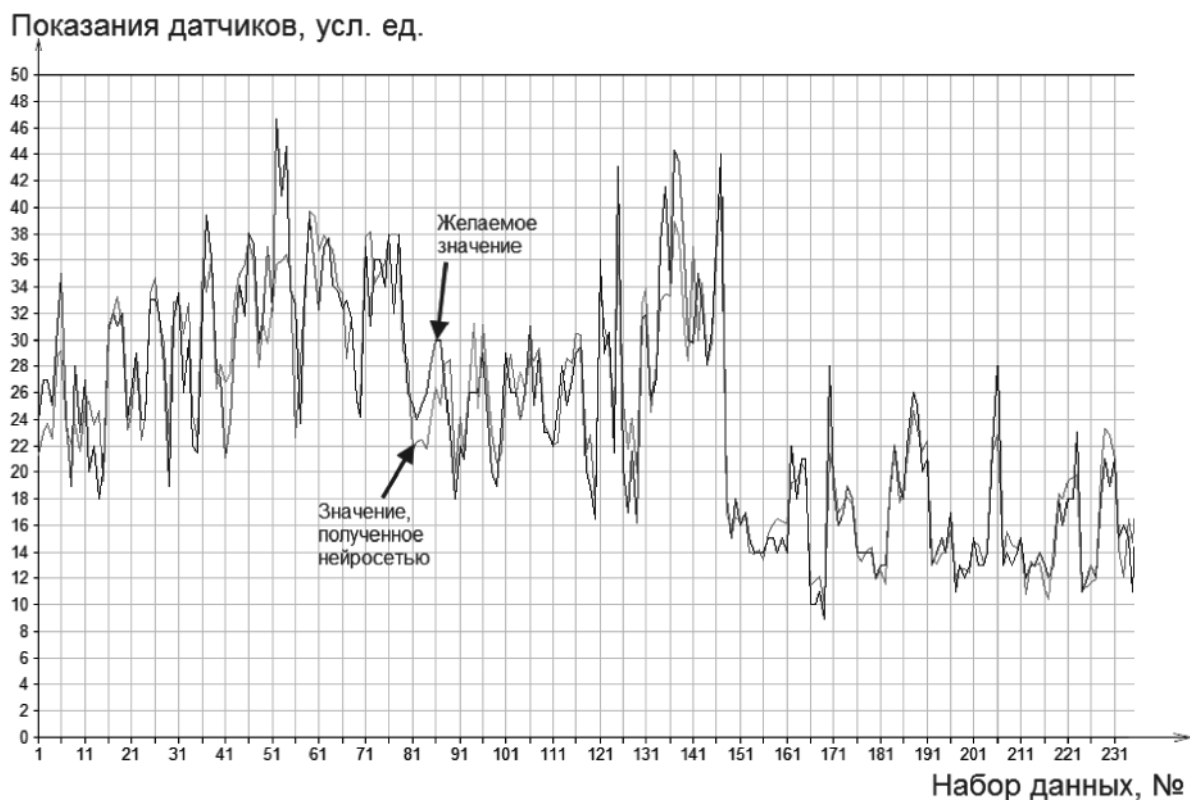


Рисунок 9. Сравнение полученного результата с желаемым

ного заражения, что исключит возможность заражения через медицинский инструмент. Разрабатываемая система может быть выполнена мобильной и использоваться как в амбулаторных условиях, так и на дому. Система может быть оборудована USB-портом, а также беспроводными интерфейсами, что позволит собирать статистику проводимых исследований с помощью компьютера, в том числе дистанционно.

Предлагаемая система позволяет не только диагностировать возможную причину развития заболеваний желудочно-кишечного тракта, но и снизить стоимость такой диагностики, а также упростить процедуру диаг-

ностирования. Новизна заключается в коррекции показаний основного датчика по показаниям вспомогательных. Данное решение позволяет повысить точность определения концентрации аммиака в условиях воздействия на датчики газовой смеси с неизвестными концентрациями примесных газов. Нейронная сеть может быть обучена для работы в заданных условиях и подстроена под локальную атмосферу.

Рекомендуется применение разрабатываемой системы в лечебно-профилактических учреждениях, а также при амбулаторном наблюдении пациентов.

### Список литературы

1. Методы диагностики хеликобактериоза / Под ред. А.В. Козлова, В.П. Новиковой. СПб.: Диалектика, 2008. 88 с.
2. Корниенко Е.А., Милейко В.Е., Самокиш В.А. и др. Неинвазивные методы диагностики инфекции, вызванной *Helicobacter pylori* // Педиатрия. 1999. № 1. С. 37–41.
3. Матанцев А.Б., Уразбахтина Ю.О., Ясовеев В.Х. Система неинвазивной диагно-

стики хеликобактериоза // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 1 (62). С. 69–73.

4. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. М.: Высшая школа, 2002. 184 с. ISBN 5-06-004094-1.

5. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. М.: КНОРУС, 2013. 800 с.

6. Сайт компании Figaro [Электронный ресурс]. URL: <http://www.figarosensor.com>.



7. Матанцев А.Б., Уразбахтина Ю.О., Ясовеев В.Х. Система диагностики хеликобактерной инфекции // *Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине: 5-я Международ. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 14–15 нояб. 2013)*. СПб.: СПбГПУ, 2013. С. 142–143.

8. Турута Е.Ф. Активные SMD-компоненты. СПб.: Наука и техника, 2006. 544 с.

9. Матанцев А.Б., Уразбахтина Ю.О., Ясовеев В.Х. Методы повышения точности уреазной дыхательной диагностики *Helicobacter pylori* // *Вестник новых медицинских технологий*. Тула: Изд-во ТулГУ, Т. 22, № 3, 2015. С. 86-92. DOI 10.12737 / ISSN 1609-2163.

### References

1. *Metody diagnostiki helikobakterioza / pod red. A.V. Kozlova, V.P. Novikovoij*. SPb.: Dialektika, 2008. 88 s.

2. Kornienko E.A., Milejko V.E., Samokish V.A. i dr. Neinvazivnye metody diagnostiki infekcii, vyzvannoj *Helicobacter pylori* // *Pediatrics*. 1999. № 1, S. 37–41.

3. Matancev A.B., Urazbahtina Ju.O., Jasoveev V.H. Sistema neinvazivnoj diagnostiki

helikobakterioza // *Vestnik UGATU*. 2014. T. 18, № 1 (62). S. 69–73.

4. Terehov V.A., Efimov D.V., Tjukin I.Ju. *Nejrosetevye sistemy upravlenija*. M.: Vysshaja shkola, 2002. 184 s. ISBN 5-06-004094-1.

5. Gusev V.G., Gusev Ju.M. *Jelektronika i mikroprocessornaja tehnika*. M.: KNORUS, 2013. 800 s.

6. Sajt kompanii Figaro [Jelektronnyj resurs] URL: <http://www.figarosensor.com>.

7. Matancev A.B., Urazbahtina Ju.O., Jasoveev V.H. Sistema diagnostiki helikobakternoj infekcii // *Vysokie tehnologii, fundamental'nye i prikladnye issledovanija v fiziologii i medicine: 5-ja Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 14–15 nojab. 2013)*. SPb.: SPbGPU, 2013. S. 142–143.

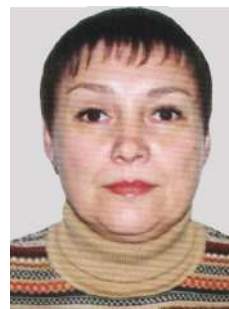
8. Turuta E.F. *Aktivnye SMD-komponenty*. SPb.: Nauka i tehnika, 2006. 544 s.

9. Matancev A.B., Urazbahtina Ju.O., Jasoveev V.H. Metody povyshenija tochnosti ureaznoj dyhatel'noj diagnostiki *Helicobacter pylori* // *Vestnik novyh medicinskih tehnologij*. Tula: Izd-vo TulGU, 2015. T. 22, № 3. S. 86–92. DOI 10.12737 / ISSN 1609-2163.



**Доланчи С. М.**  
**Dolapchi S. M.**

*старший преподаватель кафедры  
«Информационные, математические  
и естественнонаучные дисциплины»,  
ЧОУ ВО «Южно-Уральский институт  
управления и экономики»,  
г. Коркино, Российская Федерация*



**Денисова О. А.**  
**Denisova O. A.**

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

УДК 538.911

## ГЛОБУЛЫ И ИХ ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ

В статье рассмотрены вопросы образования глобул в силикатных стеклах, взаимосвязи фазовых переходов с изменениями в структурах стекла, соответствующих каждой фазе. Кварцевое стекло состоит из тетраэдров кварца  $\text{SiO}_4$ , которые могут иметь пять типов в зависимости от количества мостиковых и концевых связей. Благодаря этим связям образуются особые микроструктуры-глобулы. Эксперимент проводился методом комбинационного рассеяния света с использованием полупроводникового лазера (длина волны 472,85 нм). Определены частота колебаний каждого вида кристалла и его энергия. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными, опубликованными ранее другими авторами. Энергия связи тетраэдров совпадает с расчётными значениями, проведенными по формуле Планка. Получены экспериментальные данные размеров глобул при различных скоростях охлаждения расплава. Обнаружено, что с увеличением содержания натрия спектр комбинационного рассеяния сдвигается вправо, что объясняется высокой активностью натрия, препятствующего образованию силоксановых связей. В момент образования силоксановых связей происходит полимеризация с формированием линейных и кольцевых структур, что ведёт к упрочнению поверхности изделий из кварцевого стекла. Наибольшей прочности стекло достигает при отжиге в диапазоне температур 950–1080 °С. Размер глобул влияет на качество обрабатываемой поверхности, так как при механической обработке происходит разрыв связей между глобулами. Кварцевое ультрафиолетовое стекло (КУ-1), прозрачное в ультрафиолетовой и видимой частях спектра, обладает высокой упругостью 73 ГПа и используется для производства механических резонаторов. Кварцевое стекло отличается хорошей прозрачностью в видимой области спектра и низким пропусканием в ультрафиолете. Обладает упругостью на два порядка меньше, чем стекло КУ-1. Используется в оптике и при производстве оптоволоконного кабеля. Целью данной работы является получение качественной поверхности изделий из кварцевого стекла, пригодных для создания высокочастотных механических генераторов, используемых в гироскопических системах летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** силоксановая связь, кремнийкислородные тетраэдры, глобулы, натрий, кварц, тридимит, прочность, упругость, отжиг, расплав, тетраэдр.

## GLOBULES AND THEIR INTERNAL STRUCTURE

The issue of the formation of globules in silicate glasses, the interrelation of phase transitions with changes in glass structures corresponding to each phase is considered in the article. Quartz glass consists of  $\text{SiO}_4$  quartz tetrahedra, which can be of five types, depending on the number of bridging

and terminal bonds. Due to these connections, special microstructures are formed-globules. The experiment was carried out by Raman scattering using a semiconductor laser (wavelength 472,85 nm). The frequency of oscillation of each type of crystal and its energy are determined. The experimental results are in good agreement with the data published by other authors. The binding energy of tetrahedra coincides with the calculated values calculated using Planck's formula. Experimental data on the size of globules are obtained at different cooling rates of the melt. As the sodium content increases, the Raman spectrum shifts to the right, which is explained by the high sodium activity that prevents the formation of siloxane bonds. At the time of the formation of siloxane bonds, polymerization occurs, with the formation of linear and annular structures, which leads to the hardening of the surface of quartz glass products. The glass reaches its highest strength during annealing in the temperature range 950–1080 °C. The size of the globules affects the quality of the surface being treated, since during machining the bonds between the globules break. Quartz ultraviolet glass (KU-1), transparent in the ultraviolet and visible part of the spectrum, has a high elasticity of 73 GPa, it is used for the production of mechanical resonators. Quartz glass differs good transparency in the visible spectrum and low transmission in the ultraviolet. It has an elasticity of two orders of magnitude less than that of KU-1 glass. Used in optics and in the production of fiber optic cables. The purpose of this work is to obtain a qualitative surface of quartz glass products, suitable for creating high-quality mechanical generators used in gyroscopic systems of aircraft.

**Key words:** siloxane bond, silica oxide tetrahedra, globules, sodium, quartz, tridymite, strength, elasticity, annealing, melt, tetrahedron.

### Введение

Огромную роль в силикатных стёклах играет силоксановая связь, основу которой составляют особенности соединения кремния и кислорода. Стекло КУ-1 (кварцевое ультрафиолетовое с содержанием натрия менее 1 %) получают из стекла КВ (кварцевое видимое), которое проходит все фазы от  $\alpha$ ,  $\beta$ -кварца и  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -тридимита до расплава с последующим удалением натрия. Стёкла КУ-1 пропускают ультрафиолетовое излучение, КВ — нет.

Стекло кварцевое ультрафиолетовое КУ-1 обладает высокой прочностью и упругостью, что делает его незаменимым материалом для производства высокочастотных механических резонаторов в гироскопических системах автопилотов различных летательных аппаратов, системах автоматики, а стекло кварцевое видимое КВ используется в оптике и оптоволоконной связи.

Основу прочной поверхности составляют кремнекислородные тетраэдры, которые объединяются в различные массивы, называемые глобулами. Чем меньше размер глобул, тем прочнее поверхность, так как между ними образуется большее количество силоксановых связей. Размер глобул обеспечивает технология отжига.

Целью данной работы является экспериментальное изучение механизма, лежащего в основе образования глобул, их внутреннего строения, а также физических условий их образования.

*Объекты и методика экспериментального исследования*

Для исследования привлекался комплекс приборов Ntegra Spectra в конфигурации Upright производства компании NT-MDT, являющейся платформой для объединения приборов различного назначения. Наша конфигурация состоит из спектрометра комбинационного рассеяния Nanofinder 30, конфокального микроскопа и сканирующей системы. Спектрометр укомплектован двумя лазерами для возбуждения рассеяния: *He-Ne* с длиной волны 632,8 нм и полупроводниковый с длиной волны 472,85 нм. Последний лазер использовался для проведения измерений наших образцов. Фокусировка излучения производилась объективом с числовой апертурой 0,9.

Стекло КУ-1 получают из расплава стекла КВ, в процессе охлаждения образуются диоксид кремния —  $\text{SiO}_2$ , выполняющий роль динамических структур, а при температуре 1300 °C и ниже начинают образовываться кремнийкислородные тетраэдры —  $\text{SiO}_4$ , выполняющие роль структурных

единиц. По количеству мостиковых связей различают пять видов  $Q^n$ , где  $n$  — число мостиковых атомов кислорода ( $n = 0 \div 4$ ). В процессе соединения тетраэдров между собой начинает образовываться силиксановая поверхность. Наибольшей прочности она достигает при температурах 950–1080 °C.

В диапазоне 950–1080 °C происходит процесс дегидратации, а при последующем понижении температуры образуется кристобалит, имеющий кубическую сингонию (рисунок 1).

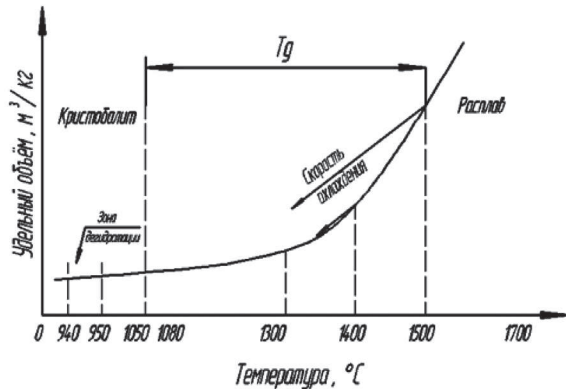
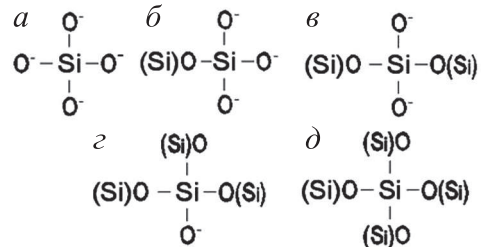


Рисунок 1. График области отрицательного температурного расширения

Тетраэдрическую структуру глобул и концентрацию тетраэдров определяют методами комбинационного рассеяния (КР) света и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [1].

Результаты и их обсуждение

По соотношению числа мостиковых  $(Si-O)_m$  и концевых  $(Si-O)_k$  связей атомов кислорода выделяют пять тетраэдров по их структуре (рисунок 2):  $Q^4$ ,  $Q^3$ ,  $Q^2$ ,  $Q^1$ ,  $Q^0$  [1, 2]. Наличие тетраэдров  $Q^4$  не просматривается даже методом ЯМР, что указывает на их низкую частоту колебаний.



- а)  $SiO_4^4$  с частотой 800  $cm^{-1}$ ; б)  $SiO_3^3$  с частотой 880  $cm^{-1}$ ;
- в)  $SiO_2^2$  с частотой 1060  $cm^{-1}$ ; г)  $SiO_3^1$  с частотой 1200  $cm^{-1}$ ; д)  $SiO_4^0$  с частотой 0  $cm^{-1}$

Рисунок 2. Структурные единицы силикатов внутри глобул — центры стеклования [1, 2]

Тетраэдры отличаются длиной связей Si-O мостиковых и концевых связей, с внешними Si-O-Si и внутренними O-Si-O углами.

По частоте колебаний спектра комбинационного рассеяния тетраэдры определяются:  $Q^0$  — 800  $cm^{-1}$ ,  $Q^1$  — 880  $cm^{-1}$ ,  $Q^2$  — 1060  $cm^{-1}$  и  $Q^3$  — 1200  $cm^{-1}$  (рисунок 3).

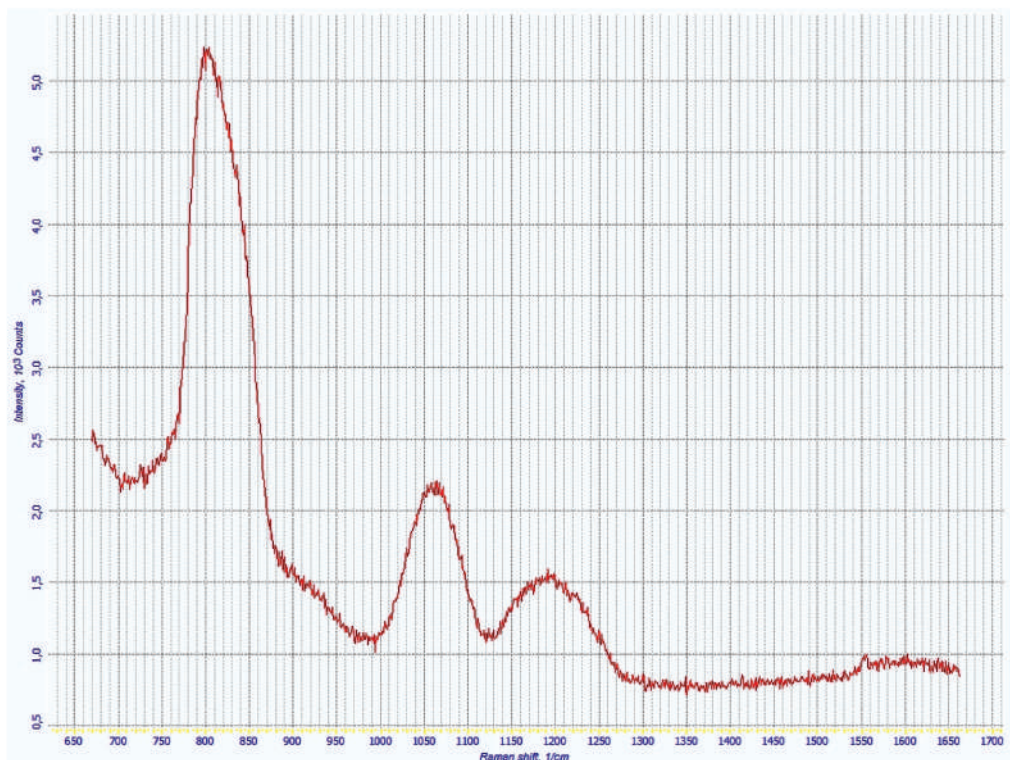


Рисунок 3. Спектр, полученный методом комбинационного рассеяния по определению тетраэдров  $Q^n$

Энергия колебаний рассчитывается по формуле Планка [3]:

$$E = h\gamma = h \frac{c}{\lambda},$$

где  $E$  — энергия тетраэдра;  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света;  $\lambda$  — длина волны;  $\gamma$  — частота волны. Она распределится следующим образом: для  $Q^0 E = 0,10$  эВ, для  $Q^1$  — 0,11 эВ, для  $Q^2$  — 0,13 эВ, а для  $Q^3$  — 0,15 эВ. В относительном количественном соотношении, приняв  $Q^3 = 1$ , получим:  $Q^2 = 1,47$ ;  $Q^1 = 1,96$ ;  $Q^0 = 6,33$ .

Данные значения энергии тетраэдров, полученные с помощью метода комбинационного рассеяния, хорошо согласуются с результатами, полученными по другой формуле [3]:

$$E = kT,$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура тетраэдра.

В центре глобулы располагается тетраэдр  $Q^4$ , который связан с другими через мостиковый ион кислорода и образует сетку кристаллов кварца или кристобалита. Затем следуют одномерные или двумерные и другие полимерные плоские сетки кремний-кислородные тетраэдры с концевыми связями, Si-O для кислой среды или Si-O-Na для щелочной среды, которые выходят на поверхность глобулы.

Кварцевое стекло имеет кристаллическую и аморфную структуры, причём на микро- и макроуровнях. Общими элементами являются динамические  $SiO_2$  и структурные тетраэдры  $SiO_4$  и  $Si_2O_7$  (рисунок 4) с образованием линейных и круговых комплексов [1, 4].

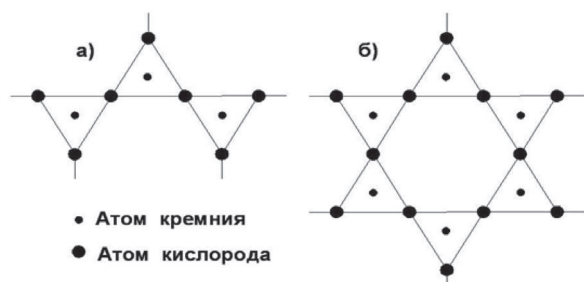


Рисунок 4. Образование линейных (а) и круговых (б) комплексов

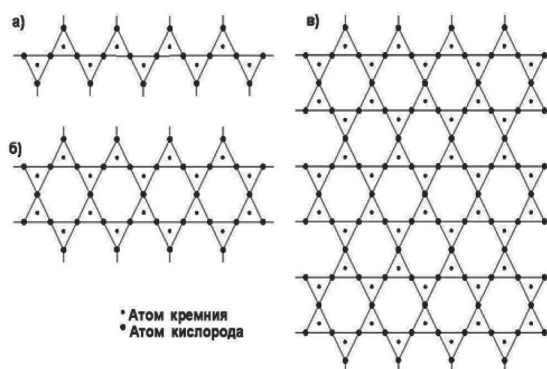


Рисунок 5. Образование: пироксеновых цепочек (а), амфиболовых лент (б), плоских сеток (в)

Далее, из линейных и круговых комплексов образуются более сложные структуры (рисунок 5): пироксеновые цепочки, амфиболовые ленты, плоские сетки.

Существенное влияние имеет размер глобул на качество механической обработки поверхности кварцевого стекла. С уменьшением размера глобул «рваность» поверхности уменьшается, так как снятие слоя при механической обработке происходит с разрушением связей между глобулами (рисунок 6) [5, 6].

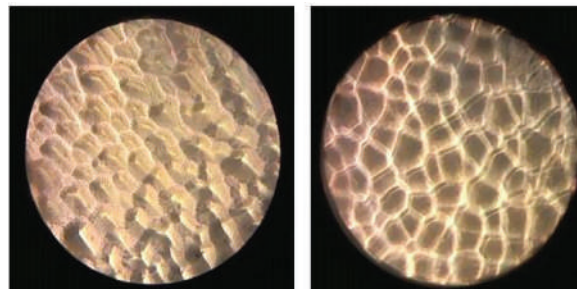


Рисунок 6. Рост глобул: равномерный (слева) и неравномерный (справа) (микроскоп оптический МИИ-4М×500)

Метод рентгенофазового анализа (РФА) показал (рисунок 7), что на частотах 25–26  $см^{-1}$  при температуре 1080 °С отсутствует кристобалит, и появляется он при 1100°С. Кварц присутствует во всех фазах, а на диаграмме РФА (рисунок 7) — на частоте 31  $см^{-1}$ . Качество поверхности определяли методами Виккерса, фрактальной геометрии, методом лежачей капли с помощью дистиллированной воды и глицерина.

Для эксперимента использовались пластинки со стороны шлифовки стекла.

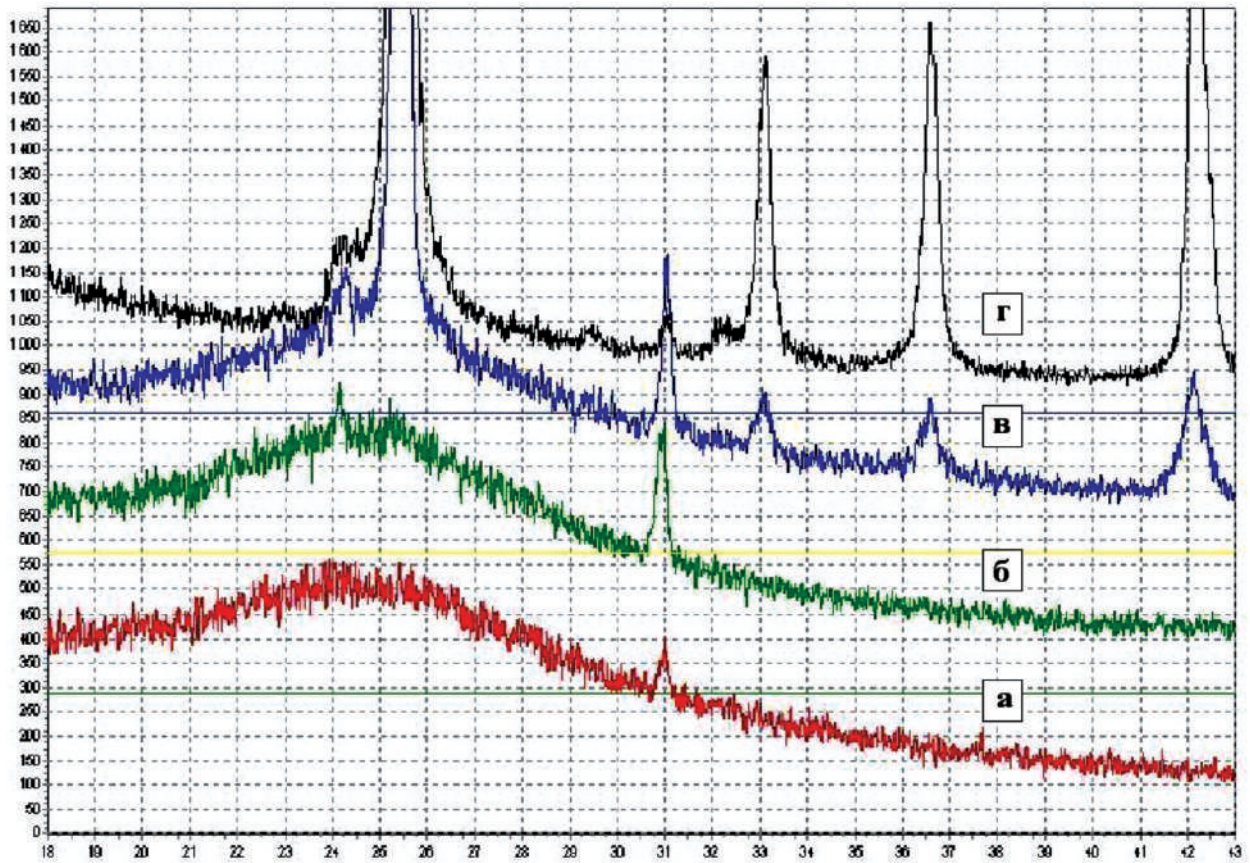


Рисунок 7. Рентгенограммы порошка кварцевого стекла марки КУ-1, отожжённого при различных температурах: 1080 °С (а); 1100 °С (б); 1200 °С (в); 1300 °С (г) в течение 5 ч

Шлифовка проводилась абразивным инструментом с зерном не менее 10 мкм в одном направлении. В этом случае исследуется среднее значение предельной нагрузки на отожженной поверхности. На рисунке 8 представлен график зависимости предельной нагрузки стекла от температуры отжига [6, 7]. Максимальной прочности стекло достигает при температуре отжига 1080 °С. Остальные методы показали результат, аналогичный [7].

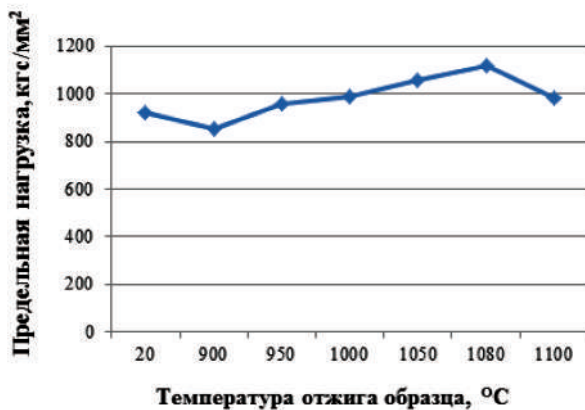


Рисунок 8. График зависимости предельной нагрузки от температуры отжига

Предельная нагрузка — это средняя нагрузка с появлением трещин вокруг индентора. Изменение поверхностного натяжения в интервале 950–1080 °С связано с образованием силоксановых связей на поверхности. Минимальное значение поверхностного натяжения получено для образца с обработкой 900 °С, с последующим повышением температуры от 1000 до 1080 °С поверхностное натяжение растёт и достигает максимума при 1080 °С, а при 1100 °С снова снижается.

**Выводы**

При охлаждении кварцевого стекла КВ, предварительно удалив из него натрий, при температуре 1500 °С образуется диоксид кремния, который переходит в структурную единицу — тетраэдр. Тетраэдры, являющиеся наноструктурами, объединяясь, создают новые микроструктуры — глобулы, размер которых находится в пределах от 10 до 300 мкм. Основу глобул составляет силоксановая связь. Наибольшая прочность силоксановой поверхности достигается при отжиге кварцевого ультрафиолетового стекла в течение 5 ч в диапазоне температур

от 950 °С до 1080 °С. При ступенчатом охлаждении (300 °С/ч) образуется мелкоглобулярная поверхность, обеспечивающая большую прочность, подобно кольчуге, а также высокое качество поверхности в процессе механической обработки. Кроме того, коэффициент добротности принимает значения от 14 до 22 миллионов единиц, что делает механические резонаторы пригод-

ными для эксплуатации в летательных и космических аппаратах.

*Работа выполнена под руководством профессора кафедры «Физика и методика обучения физике» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет», доктора физико-математических наук Брызгалов Александра Николаевича (27.10.1930 — 11.01.2017).*

### Список литературы

1. Анфилогов В.Н., Быков В.Н., Осипов А.А. Силикатные расплавы. М.: Наука, Ин-т минералогии УрО РАН, 2005. 357 с.
2. Воронков М.Г. Силоксановая связь. Новосибирск: Наука, 1976. 413 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов. М.: Академия, 2008. 560 с.
4. Долапчи С.М., Брызгалов А.Н., Пихуля Д.Г., Живулин Д.Е., Зубов М.С. Модели глобулярного строения стекла // Современные наукоёмкие технологии. 2016. № 6–1. С. 24–27.
5. Брызгалов А.Н., Долапчи С.М. Создание оптимальных плёнок кремния на подложке сапфира методом эпитаксии // Башкирский химический журнал. 2015. Т. 22. № 2. С. 113–115.
6. Пат. 2587191 Российская Федерация. Способ упрочнения изделий из стекла / А.Н. Брызгалов, С.М. Долапчи, Д.Е. Живулин, М.С. Зубов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный педагогический университет». № 2587191 от 19.01.2015.
7. Пат. 2558564 Российская Федерация. Способ снижения трещиноватости поверхности изделий из кварцевого стекла / А.Н. Брызгалов, Д.Е. Живулин, М.С. Зубов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный педагогический университет». № 2014117245/03 от 28.04.2014.

### References

1. Anfilogov V.N., Bykov V.N., Osipov A.A. Silikatnye rasplavy. M.: Nauka, In-t mineralogii URO RAN, 2005. 357 s.
2. Voronkov M.G. Siloksanovaya svyaz. Novosibirsk: Nauka, 1976. 413 s.
3. Trofimova T.I. Kurs fiziki: ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Akademiya, 2008. 560 s.
4. Dolapchi S.M., Bryzgalov A.N., Pihulya D.G., Zhivulin D.E., Zubov M.S. Modeli globulyarnogo stroeniya stekla // Sovremennyye naukoymkie tehnologii. 2016. № 6–1. S. 24–27.
5. Bryzgalov A.N., Dolapchi S.M. Sozdanie optimalnykh plyonok kremniya na podlozhke sapfira metodom epitaksii // Bashkirskij himicheskij zhurnal. 2015. T. 22. № 2. S. 113–115.
6. Pat. 2587191 Rossijskaya Federaciya. Sposob uprochneniya izdelij iz stekla / A.N. Bryzgalov, S.M. Dolapchi, D.E. Zhivulin, M.S. Zubov; Zayavitel i patentoobladatel Federalnoe gosudarstvennoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Chelyabinskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet». № 2587191 dd. 19.01.2015.
7. Pat. 2558564 Rossijskaya Federaciya. Sposob snizheniya treshhinovatosti poverxnosti izdelij iz kvarcevogo stekla / A.N. Bryzgalov, D.E. Zhivulin, M.S. Zubov; Zayavitel i patentoobladatel Federalnoe gosudarstvennoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Chelyabinskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet». № 2014117245/03 dd. 28.04.2014.



**Доломатов М. Ю.**  
**Dolomatov M. Yu.**  
кандидат технических наук,  
доктор химических наук,  
профессор,  
профессор кафедры  
«Технология нефти и газа»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет»,  
профессор кафедры  
«Физическая электроника  
и нанофизика», ФГБОУ  
ВО «Башкирский  
государственный  
университет»,  
г. Уфа, Российская  
Федерация



**Паймурзина Н. Х.**  
**Paimurzina N. Kh.**  
аспирант кафедры  
«Управление и сервис  
в технических системах»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
университет»  
г. Уфа, Российская  
Федерация



**Ковалева Э. А.**  
**Kovaleva E. A.**  
кандидат химических наук,  
доцент кафедры  
«Математика»,  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной  
университет»  
г. Уфа, Российская  
Федерация

УДК 535.34; 541.1

## ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИОНИЗАЦИИ И СРОДСТВА К ЭЛЕКТРОНУ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ

В данной работе энергетический спектр молекулы представлен через автокорреляционную функцию, зависящую от частоты переходов, так как спектр молекул органических полупроводников рассматривается как случайный процесс возбуждения сильно коррелированных электронных состояний. Для расчета вероятности электронных переходов в ультрафиолетовой области введен относительный эмпирический автокорреляционный параметр  $\mu$ , который равен отношению энергии спектра в УФ области к энергии всего электронного спектра. В данном исследовании рассмотрены 19 соединений полициклических ароматических углеводородов, содержащих от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец. По методу наименьших квадратов установлена корреляционная зависимость между потенциалами ионизации (средством к электрону) и параметром  $\mu$  полициклических ароматических полупроводников, определены абсолютные и относительные ошибки расчетов. Рассмотренный в данной работе подход может быть использован для приближенной оценки потенциалов ионизации, средства к электрону и электронно-донорной способности молекул в процессе образования комплексов с переносом заряда и орбитально-контролируемых реакциях.

**Ключевые слова:** органические полупроводники, содержащие от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец, потенциал ионизации, средство к электрону, относительный эмпирический автокорреляционный параметр  $\mu$ , корреляция.



## ESTIMATION OF IONIZATION ENERGY AND ELECTRON AFFINITY OF POLYCYCLIC AROMATIC SEMICONDUCTORS BY INTEGRAL CHARACTERISTICS OF THE DISTRIBUTION OF THE SPECTRAL DENSITY OF ELECTRONIC SPECTRUM

In this work the energy spectrum of the molecule is represented using the autocorrelation function. The autocorrelation function depends on the frequency of transitions, as the range of molecules in organic semiconductors is considered as a random process excitations of strongly correlated electronic states. To calculate the probability of electronic transitions in the ultraviolet region is entered relative the empirical autocorrelation parameter  $\mu$ . The parameter  $\mu$  is equal to the ratio of the energy spectrum in the UV region to the energy of the whole electronic spectrum. The present study examines 19 compounds polycyclic aromatic hydrocarbons from two to five linearly annellated benzene rings. Least-squares correlation dependence between the ionization potential (electron affinity) and the parameter  $\mu$  polycyclic aromatic semiconductors, the absolute and relative errors of calculations. Considered in this paper approach can be used for approximate estimation of ionization potentials, electron affinity and electron-donor ability of the molecules in the formation of complexes with charge transfer and orbital-controlled reactions.

**Key words:** organic semiconductors containing from two to five linearly annellated benzene rings, ionization potential, electron affinity, relative empirical autocorrelation parameter  $\mu$ , correlation.

### Введение

Развитие квантово-химического моделирования и синтез новых полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), обладающих полупроводниковыми свойствами, приводит к необходимости накопления экспериментального материала, получения корреляционных зависимостей с целью разработки методов прогнозирования свойств и целенаправленного синтеза соединений с заданными свойствами. Спектры ПАУ основательно были рассмотрены в 60–70 гг. прошлого столетия в исследованиях Э. Клара, Э.В. Шпольского и др. [1–5]. Электронная структура полициклических ароматических углеводородов характеризуется стабильной системой  $\pi$ -электронов, обеспечивающей высокую энергетическую стабильность молекул в фотохимических и радиационно-химических реакциях. Молекулы ПАУ обладают повышенной способностью к переносу заряда, что связано с низким потенциалом ионизации (ПИ) и высоким сродством к электрону (СЭ). Знание этих характеристик важно в молекулярной электронике, фотонике и в химии ароматических углеводородов. Поэтому актуальна разработка методов исследования ПИ и СЭ, не разрушающих структуру молекул. В настоящее время суще-

ствует ряд методов оценки ПИ ПАУ, например, по показателям цветности [6]. Существенным недостатком этого метода является невозможность определения ПИ для соединений, которые не обладают выраженной цветностью или цветность которых незначительна. Известен подход, в котором расчеты ПИ ароматических молекул проводились через интегральную силу осциллятора и топологические индексы (ТИ) [7]. В качестве недостатка данного подхода можно отметить трудоемкость расчетов ТИ. В данной работе предложен метод, позволяющий определять ПИ и СЭ для более широкого класса соединений независимо от их цветности и без расчета топологических индексов.

Основной идеей предлагаемого подхода является оценка ПИ на основе интегральных автокорреляционных характеристик спектра, которые отражают взаимодействие совокупности электронных состояний.

Целью данного исследования является разработка простого способа оценки ПИ ПАУ по интегральным (автокорреляционным) характеристикам функции распределения спектральной плотности.

В основе разработки лежат идеи, изложенные в работах по статистической радиофизике.

Рассмотрим регистрацию спектра как случайный процесс, который образует скалярное случайное поле  $\xi(f, \omega)$ , где  $f$  — спектральная плотность,  $\omega$  — соответствующая частота. Для описания электронных спектров применим формулы, известные из статистической радиофизики [8, 9]. По аналогии введем характеристики, охватывающие УФ и видимую области спектра. Учитывая, что электронные состояния молекул одинаковой мультиплетности взаимодействуют между собой, в общем случае будем рассматривать формирование электронного спектра как немарковский процесс.

В нашем случае автокорреляционная функция (АКФ) будет иметь вид:

$$A(\Delta\omega) = \int_{T_1}^{T_2} f(\omega) \cdot f(\omega + \Delta\omega) d\omega,$$

здесь  $\omega = 2\pi\nu$ , Гц — частота переходов.

Из органических соединений, поглощающих в видимой и ближней ультрафиолетовой области, ПАУ представляются более простыми в том отношении, что их электронные полосы в указанных областях связаны с одним типом перехода  $\pi-\pi^*$ .

Введем параметр для феноменологической оценки вклада этих переходов как отношение автокорреляционных функций в видимой области ко всему диапазону регистрации электронного спектра. Величину, характеризующую долю энергетических состояний электронного спектра, назовем относительный эмпирический автокорреляционный  $\mu$ -параметр. В логарифмической системе координат  $\mu$ -параметр характеризует отношение масштабов поглощения энергии случайного поля, в котором происходит процесс поглощения.

$$\mu = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \lg \varepsilon(\omega) \cdot \lg \varepsilon(\omega + \Delta\omega) d\omega}{\int_{\omega_0}^{\omega_2} \lg \varepsilon(\omega) \cdot \lg \varepsilon(\omega + \Delta\omega) d\omega}, \quad (1)$$

где числитель и знаменатель равны соответственно интегралам АКФ в УФ области и УФ и видимой областях спектра.

#### Объекты и методы

В данном исследовании рассмотрены 19 соединений ПАУ, содержащих от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец (таблица 1). Исходные растворы ПАУ готовили растворением навесок веществ в оптически прозрачных растворителях. В качестве

растворителей использовались химически чистые этанол (ГОСТ 18300-87), бензол (ГОСТ 5955-75), эфир этиловый (ТУ 7506804-97-97). Критерием чистоты растворителей являлось отсутствие флуоресценции при освещении их достаточно интенсивным ультрафиолетовым светом. Контроль за растворением проводили по измерению оптической плотности растворов до постоянного её значения. Концентрации углеводородов не превышали  $10^{-3}$  моль/л. Готовые растворы хранили в темном месте во избежание фотохимического разложения исследуемых соединений. Спектры поглощения ПАУ регистрировались в химически чистых растворах на спектрофотометре СФ-2000 в диапазоне поглощения от 200 до 750 нм ( $2,51 \cdot 10^{15} \leq \omega \leq 9,42 \cdot 10^{15}$  Гц) с шагом 2 нм. Для измерения использовали кварцевые кюветы ( $l = 1$  см). Спектры ряда соединений были взяты из баз данных [1]. При расчете спектров использовали логарифмический молярный коэффициент поглощения  $\lg \varepsilon$ , что позволило наглядно представить слабые полосы наряду с сильными. Значения автокорреляционных функций электронных спектров находили по формуле

$$A = \int_{\omega_i}^{\omega_j} \lg \varepsilon(\omega) \cdot \lg \varepsilon(\omega + \Delta\omega) d\omega, \quad (2)$$

где  $\omega_i$  и  $\omega_j$  — границы спектра, МГц;  $\Delta\omega$  — приращение аргумента (шаг), МГц;  $\lg \varepsilon(\omega)$ ,  $\lg \varepsilon(\omega + \Delta\omega)$  — логарифмы молярного показателя поглощения при определенных частотах.

Значения вертикальных ПИ рассчитывались ограниченным методом Хартри-Фока RHF 6-31G\*\* с полной оптимизацией геометрии молекул по теореме Купманса [10]. Оптимизированные конфигурации проверялись на соответствие критическим точкам поверхности потенциальной энергии.

Поскольку симметрия высшей занятой молекулярной орбитали (ВЗМО) определяет тип донорного влияния, а симметрия низшей свободной молекулярной орбитали (НСМО) — тип акцепторного влияния [11, 12], соответственно знак энергии позволяет предсказать донорную и акцепторную способность (НСМО > 0 — акцептор). Поскольку многие химические реакции связаны со способностью молекулы отдавать электрон, то знание энергетической характеристики ПИ крайне жела-

**Таблица 1.** Параметры ПАУ, содержащих от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец

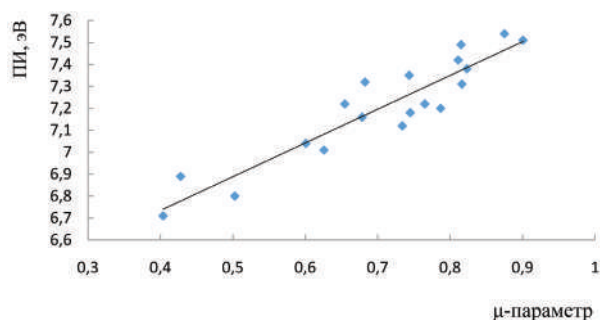
№	Название	Брутто-формула	Растворитель	μ-параметр	ПИ, эВ по методу 6-31G**	ПИ, эВ по формуле (3)	СЭ, эВ по методу 6-31G**	СЭ, эВ по формуле (4)	Абсолютная ошибка, эВ		Относительная ошибка, %	
									для ПИ	для СЭ	для ПИ	для СЭ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Углеводороды, содержащие два и три линейно-аннелированных бензольных кольца												
1	Гексагелицен Hexahelicene	C26H16	эфир	0,901	7,51	7,51	0,67	0,67	0,04	0,00	0,55	0,41
2	Пентафен Pentaphene	C22H14	этанол	0,875	7,54	7,47	0,63	0,69	0,11	0,06	1,46	9,17
3	3,4-бензпентафен 3,4-Benzopentaphene	C26H16	бензол	0,815	7,49	7,37	0,68	0,74	0,15	0,06	2,01	8,19
4	нафт[2',3':3,4]пентафен Naphtho-(2'.3':3,4)-pentaphene	C30H18	бензол	0,744	7,35	7,25	0,74	0,79	0,12	0,05	1,63	7,17
5	антрацено[2',1':1,2]антрацен Anthraceno-(2'.1':1,2)-anthracene	C26H16	бензол	0,679	7,16	7,14	0,84	0,84	0,03	0,01	0,40	0,63
6	2,3-бензпицен 2,3-Benzopicene	C26H16	1,2,4-трихлорбензол	0,811	7,42	7,36	0,68	0,73	0,09	0,06	1,17	8,67
7	2,3-8,9-добензпицен 2,3,8,9-dibenzopicene	C30H18	1-метилнафталин	0,683	7,32	7,14	0,69	0,84	0,18	0,05	2,49	6,59
Средняя ошибка									0,10	0,04	1,38	5,83
Углеводороды, содержащие четыре линейно-аннелированных бензольных кольца												
8	Тетрацен Tetracene	C18H12	этанол	0,626	7,01	7,01	0,9	0,89	0,04	0,01	0,59	1,36
9	1,2-бензтетрацен 1,2-Benzotetracene	C22H14	бензол	0,734	7,12	7,12	0,86	0,80	0,10	0,06	1,34	6,88
10	1,2-3,4-добензтетрацен 1,2,3,4-Dibenzotetracene	C26H16	бензол	0,787	7,20	7,2	0,83	0,75	0,10	0,07	1,33	8,62
11	1,2-7,8-добензтетрацен 1,2,7,8-Dibenzotetracene	C26H16	бензол	0,655	7,22	7,22	0,81	0,86	0,13	0,05	1,73	6,75
12	1,2-9,10-добензтетрацен 1,2,9,10-Dibenzotetracene	C26H16	диоксан	0,765	7,22	7,22	0,81	0,77	0,04	0,03	0,59	4,21
13	1,2-3,4-7,8-трибензтетрацен 1,2,3,4,7,8-Tribenzotetracene	C30H18	бензол	0,823	7,38	7,38	0,76	0,72	0,03	0,03	0,39	4,05
14	1,2-3,4-7,8-9,10-тетрабензтетрацен 1,2,3,4,7,8,9,10-Tetrabenzotetracene	C34H20	трихлорбензол	0,816	7,31	7,31	0,79	0,73	0,03	0,06	0,42	6,98
15	Гексафен Hexaphene	C26H16	бензол	0,745	7,18	7,18	0,83	0,79	0,05	0,04	0,73	4,58
Средняя ошибка									0,06	0,04	0,89	5,43
Углеводороды, содержащие пять линейно-аннелированных бензольных колец												
16	Пентацен Pentacene	C22H14	трихлорбензол	0,404	6,71	6,71	1,02	1,07	0,00	0,05	0,06	4,50
17	1,2-бензпентацен 1,2-Benzopentacene	C26H16	бензол	0,503	6,80	6,80	1,07	0,99	0,06	0,08	0,94	7,80
18	1,2-8,9-добензпентацен 1,2,8,9-dibenzopentacene	C30H18	1-метилнафталин	0,428	6,89	6,75	1,03	1,05	0,14	0,02	2,02	1,60
19	1,2-3,4-8,9-10,11-тетрабензпентацен 1,2,3,4,8,9,10,11-Tetrabenzopentacene	C38H22	1-метилнафталин	0,600	7,04	7,01	0,99	0,91	0,03	0,08	0,38	8,30
Средняя ошибка									0,06	0,06	0,85	5,55
Средняя ошибка для 19 соединений									0,08	0,05	1,07	5,60

тельно для понимания механизмов реакций и создания теоретических моделей реакционного центра, связанных с переносом электрона.

#### Обсуждение результатов

С помощью квантово-химических методов получены данные о влиянии относительного эмпирического корреляционного параметра  $\mu$  на ПИ и СЭ. Корреляции между эмпирическим параметром  $\mu$  и ПИ, а также между  $\mu$  и СЭ исследовались стандартным методом наименьших квадратов. В таблице 1 приведены результаты определения ПИ и СЭ по  $\mu$ -параметру и квантовыми методами. Как видно из таблицы 1, для молекул ПАУ характерны достаточно низкие значения ПИ, что является следствием нахождения  $\pi$ -электронов данных молекул на высокоэнергетических связывающих орбиталях. Данный факт позволяет рассматривать ПАУ в качестве доноров электронов при образовании комплексов с переносом заряда.

Выявлена корреляционная зависимость между ПИ и  $\mu$ -параметром. На рисунке 1 представлен график зависимости ПИ от  $\mu$ -параметра ПАУ, содержащих от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец, для выборки объема  $n=19$ .



**Рисунок 1.** Зависимость ПИ от  $\mu$ -параметра ПАУ, содержащих от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец

Линейная зависимость, представленная на рисунке 1, описывается уравнением

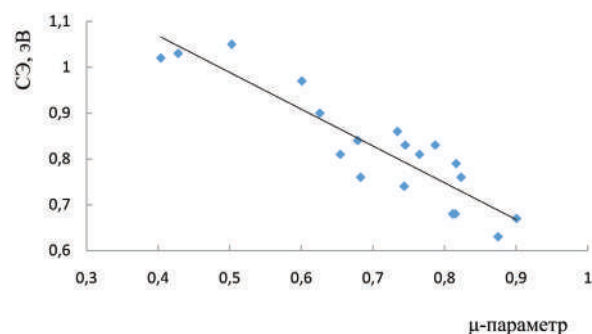
$$\text{ПИ} = 1,5386 \cdot \mu + 6,1191 \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,86$ .

Из данных таблицы 1 следует, что для рассмотренных соединений абсолютные ошибки значений ПИ, определенных методом RHF 6-31G\*\*, находятся в пределах от 0,06 до 0,1 эВ, а относительные — в пределах от 0,85 % до 1,38 %. Установлено, что предложенное уравнение зависимости лучше опи-

сывает ПАУ, содержащие четыре и пять линейно-аннелированных бензольных колец.

На рисунке 2 представлена зависимость СЭ от относительного эмпирического автокорреляционного параметра  $\mu$ .



**Рисунок 2.** Зависимость СЭ от  $\mu$ -параметра ПАУ, содержащих от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец

Уравнение линейной регрессии, представленное на рисунке 2, имеет вид

$$\text{СЭ} = -0,8025 \cdot \mu + 1,3899 \quad (4)$$

с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,83$ . Абсолютная ошибка рассчитанного по уравнению (4) СЭ колеблется от 0,04 до 0,05 эВ, относительная ошибка находится в пределах от 5,43 % до 5,83 %.

#### Выводы

В работе предложен феноменологический подход к оценке электронно-донорной характеристики потенциала ионизации ПАУ через отношение автокорреляционных функций спектров. Было показано, что вертикальные потенциалы ионизации, рассчитываемые в рамках ограниченного метода Хартри-Фока RHF 6-31G\*\* с полной оптимизацией геометрии молекул по теореме Купманса, хорошо коррелируют с относительным эмпирическим автокорреляционным  $\mu$ -параметром. Полученные зависимости позволяют достаточно просто оценивать ПИ и СЭ в ряду полициклических ароматических углеводородов, содержащих от двух до пяти линейно-аннелированных бензольных колец. Рассмотренный в данной работе подход может быть использован для приближенной оценки потенциалов ионизации, сродства к электрону и электронно-донорной способности молекул в процессе образования комплексов с переносом заряда и орбитально-контролируемых реакциях.

## Список литературы

1. Клар Э. Полициклические углеводороды: пер. с англ. / Пер. В.В. Ершова. М.: Химия, 1971. Т. 1, 2.
2. Шпольский Э.В. Линейные спектры флуоресценции органических соединений и их применения // Успехи физических наук. 1960. Т. LXXI. Вып. 2.
3. Нурмухаметов Р.Н. Электронные спектры поглощения и люминесценции ароматических полициклических углеводородов // Успехи химии. 1966. Т. 35. Вып. 6. С. 1129–1159.
4. Орлов Н.Н. Ароматические углеводороды как сырье для органического синтеза. М.: ГОНТИ НКТП Редакция химической литературы, 1938. 368 с.
5. Хюккель В. Теоретические основы органической химии: в 2 т.: пер. с нем. М.: Иностранная литература, 1955-1958. Т. 1: 644 с.; Т. 2: 638 с.
6. Долوماتов М.Ю., Ярмухаметова Г.У., Шуляковская Д.О. Оценка первых потенциалов ионизации и сродства к электрону молекул полициклических органических полупроводников по цветовым характеристикам в колориметрических системах XYZ и RGB // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 20–31.
7. Долوماتов М.Ю., Ковалева Э.А. Новый молекулярный дескриптор модели «структура-свойство» для оценки потенциалов ионизации нафто- и антрахинонов // Журнал структурной химии. 2015. Т. 56. № 5. С. 887–893.
8. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Изд-во «Радиотехника», 2003. 400 с. ISBN 5-93108-047-3.
9. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах. М.: Наука, 1981. 640 с.
10. Степанов Н.Ф. Квантовая механика и квантовая химия. М.: Мир, 2001. 519 с.
11. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. 2 изд. М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 896 с. ISBN 5-8360-0177-4.
12. Lee M.L., Novotny M.V., Bartle K.D. Analytical Chemistry of Polycyclic Aromatic Compounds. London: Academic Press Inc. Ltd, 1981. 462 p.

## References

1. Klar Je. Policiklicheskie uglevodorody: per. s angl. / Per. V.V. Ershova. M.: Himija, 1971. T. 1, 2.
2. Shpol'skij Je.V. Linejnye spektry fluorescencii organicheskikh soedinenij i ih primenenija // Uspehi fizicheskikh nauk. 1960. T. LXXI. Vyp. 2.
3. Nurmuhametov R.N. Jelektronnye spektry pogloshhenija i ljuminescencii aromaticheskikh policiklicheskih uglevodorodov // Uspehi himii. 1966. T. 35. Vyp. 6. S. 1129–1159.
4. Orlov N.N. Aromaticheskije uglevodorody kak syr'e dlja organicheskogo sinteza. M.: GONTI NKTP Redakcija himicheskij literatury, 1938. 368 s.
5. Hjukkel' V. Teoreticheskie osnovy organicheskij himii: in 2 t.: per. s nem. M.: Inostrannaja literatura, 1955-1958. T. 1: 644 s.; T. 2: 638 s.
6. Dolomatov M.Ju., Jarmuhametova G.U., Shuljakovskaja D.O. Ocenka pervykh potencialov ionizacii i srodstva k jelektronu molekul policiklicheskih organicheskikh poluprovodnikov po cvetovym harakteristikam v kolorimetriceskikh sistemah XYZ i RGB // Prikladnaja fizika. 2011. № 1. S. 20–31.
7. Dolomatov M.Ju., Kovaleva Je.A. Novyj molekuljarnyj deskriptor modeli «struktura-svojstvo» dlja ocenki potencialov ionizacii nafto- i antrahinonov // Zhurnal strukturnoj himii. 2015. T. 56. № 5. S. 887–893.
8. Perov A.I. Statisticheskaja teorija radiotehnicheskikh sistem. M.: Izd-vo «Radio-tehnika», 2003. 400 s. ISBN 5-93108-047-3.
9. Ahmanov S.A., D'jakov Ju.E., Chirkin A.S. Statisticheskaja radio-fizika i optika. Sluchajnye kolebanija i volny v linejnyh sistemah. M.: Nauka, 1981. 640 s.
10. Stepanov N.F. Kvantovaja mehanika i kvantovaja himija. M.: Mir, 2001. 519 s.
11. El'jashevich M.A. Atomnaja i molekularnaja spektroskopija. 2 izd. M.: Jeditorial URSS, 2001. 896 s. ISBN 5-8360-0177-4.
12. Lee M.L., Novotny M.V., Bartle K.D. Analytical Chemistry of Polycyclic Aromatic Compounds. London: Academic Press Inc. Ltd, 1981. 462 p.

---

## ОБ АВТОРАХ

### **Абдрафиков Михаил Асхатович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: wega55@mail.ru, Уфа, Российская Федерация

### **Абдрахманов Вали Хызырович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: awali@inbox.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Андрианов Артур Валерьевич**

инженер-конструктор, Акционерное общество «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

### **Бакиев Тагир Ахметович**

доктор технических наук, начальник Инженерно-технического центра, Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Уфа», г. Уфа, Российская Федерация

### **Балтин Руслан Рафаэлевич**

магистрант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: ravanmai@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Блинова Дарья Викторовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: blinova.darya@gmail.com, Уфа, Российская Федерация

### **Важдаев Константин Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: vazhdaevk@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

### **Гвоздев Владимир Ефимович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: wega55@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

### **Гусейнов Агил Гамид оглы**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и программирование», Сумгаитский государственный университет, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

### **Денисова Ольга Аркадьевна**

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

---

**Долапчи Сергей Михайлович**

старший преподаватель кафедры «Информационные, математические и естественнонаучные дисциплины», Частное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский институт управления и экономики», e-mail: denisovaolga@bk.ru, г. Коркино, Российская Федерация

**Доломатов Михаил Юрьевич**

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

**Зайцева Алина Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника» Факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: jenekap41@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Зелев Анатолий Павлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и сервис в технических системах», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: zelev7@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Зикий Анатолий Николаевич**

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

**Зламан Павел Николаевич**

ведущий инженер-конструктор Научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, г. Таганрог, Российская Федерация

**Калий Валерий Алексеевич**

кандидат технических наук, главный конструктор ОКБ АО «УАПО», e-mail: vtipy@mail.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Кириллов Константин Витальевич**

аспирант кафедры «Техническая кибернетика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: kir-konst@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Ковалева Элла Александровна**

кандидат химических наук, доцент кафедры «Математика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: kovaleva-ugntu@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

**Краснов Андрей Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: ravanmai@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Ле Суан Хонг** (*Социалистическая Республика Вьетнам*)

аспирант кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрического транспорта», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», e-mail: tenbigstar1209@yahoo.com, г. Москва, Российская Федерация

**Лихачев Евгений Александрович**

старший преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника» Факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: jenekap41@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Майский Равиль Анварович**

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

**Матанцев Александр Борисович**

аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: pontovnet@rambler.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Мукаев Роберт Юнусович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: mukaev\_r@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Мустафаев Валех Азад оглы**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика», Сумгаитский государственный университет, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

**Муфтеев Валериян Гайнизаманович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: mufteev@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Мухамадиев Айдар Асхатович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: aidar80@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация



---

**Никитин Олег Филиппович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», e-mail: aydar102@gmail.com, г. Москва, Российская Федерация

**Никулин Олег Викторович**

кандидат технических наук, ООО «УК «Татбурнефть», г. Альметьевск, Российская Федерация

**Паймурзина Наталья Халитовна**

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

**Салихов Ренат Баязитович**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии и наноэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», e-mail: salikhovrb@ua.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Салманова Малахат Насиман кызы**

аспирант кафедры «Информатика», Сумгаитский государственный университет, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

**Талыбов Натиг Гасан оглы**

кандидат технических наук, проректор по организации учебного процесса и технологии обучения, Сумгаитский государственный университет, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

**Талыпов Марат Артурович**

ассистент кафедры «Механика и инженерная графика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», e-mail: marih999@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

**Тарасенко Лариса Сергеевна**

магистрант кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: lartaraskost@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Тулупов Виктор Дмитриевич**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрического транспорта», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», e-mail: TulupovVD@mpei.ru, г. Москва, Российская Федерация

**Уразбахтина Юлия Олеговна**

кандидат технических наук, доцент, декан Факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: pbot@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

**Федотова Юлия Андреевна**

старший преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: gerasimova\_yulia@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Шабанов Виталий Алексеевич**

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru, г. Уфа, Российская Федерация

**Шакирзянов Айдар Анварович**

инженер службы неразрушающего контроля Инженерного технического центра, Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Уфа», e-mail: aydar102@gmail.com, г. Уфа, Российская Федерация

**Ясовеев Васих Хаматович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», e-mail: yasov@mail.ru, г. Уфа, Российская Федерация

---

## ABOUT THE AUTHORS

### **Abdrafikov Michail A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Technical Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: wega55@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Abdrakhmanov Vali Kh.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: awali@inbox.ru, Ufa, Russian Federation

### **Andrianov Artur V.**

Design Engineer, Joint Stock Company «Taganrog Scientific-Research Institute of Communication», e-mail: otDel24d@nkbmius.ru, Taganrog, Russian Federation

### **Bakiev Tagir A.**

Dr. Sci. Tech., Head of Engineering and Technical Center, Ltd «Gazprom transgaz Ufa», Ufa, Russian Federation

### **Baltin Ruslan R.**

Undergraduate Student of Automation of Technological Processes and Productions Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: ravanmai@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Blinova Darya V.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Technical Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: blinova.darya@gmail.com, Ufa, Russian Federation

### **Denisova Olga A.**

Dr. Sci. Phys.-Math., Associate Professor, Professor of Physics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Ufa, Russian Federation

### **Dolapchi Sergey M.**

Senior Lecture of Chair «Informational, Mathematical and Natural Science Disciplines», Private Educational Institution of Higher Education «South Ural Institute of Management and Economics», e-mail: denisovaolga@bk.ru, Korkino, Russian Federation

### **Dolomatov Michail Yu.**

Cand. Sci. Tech., Dr. Sci. Chem., Professor, Professor of Oil and Gas Technology Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Professor of Physical Electronics and Nanophysics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: dolomatov@gmail.com, Ufa, Russian Federation

### **Fedotova Yulia A.**

Senior Lecture of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: gerasimova\_yulia@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Gvozdev Vladimir E.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Technical Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: wega55@mail.ru, Ufa, Russian Federation

### **Husseyinov Agil H.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Information Technologies and Programming Chair, Scientific Secretary, Sumgait State University, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, Sumgait, Azerbaijan Republic

---

**Kaliy Valeriy A.**

Cand. Sci. Tech., Chief Designer of OKB JSC «Ufa Aggregate Production Association», e-mail: vtipty@mail.ru, Moscow, Russian Federation

**Kirillov Konstantin V.**

Post-Graduate Student of Technical Cybernetics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: kir-konst@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Kovaleva Ella A.**

Cand. Sci. Chem., Assistant Professor of Mathematics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: kovaleva-ugntu@yandex.ru, Ufa, Russian Federation

**Krasnov Andrey N.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Automation of Technological Processes and Productions Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: ravanmai@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Le Xuan Hong**

Post-Graduate Student of Electrotechnical Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University «Moscow Power Engineering Institute», e-mail: tenbigstar1209@yahoo.com, Moscow, Russian Federation

**Likhachev Evgeniy A.**

Senior Lecturer of Information and Measuring Techniques Chair, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: jenekap41@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Maiski Ravil A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Mathematics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: avanmai@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Matantsev Alexander B.**

Post-Graduate Student of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: pontovnet@rambler.ru, Ufa, Russian Federation

**Muftejev Valeriy G.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Mechanics and Engineering Graphics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: muftejev@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Mukaev Robert Yu.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: mukaev\_r@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Mukhamadiev Aydar A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: aidar80@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Mustafaev Valeh A.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Informatics Chair, Sumgait State University, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, Sumgait, Azerbaijan Republic

---

**Nikitin Oleg F.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Chair «Hydraulics, Hydromachines and Hydro-pneumoautomation», Federal State Budgetary Institution of Higher Professional Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University)», e-mail: aydar102@gmail.com, Moscow, Russian Federation

**Nikulin Oleg V.**

Cand. Sci. Tech., LLC «Management Company «Tatburneft», e-mail: oleg309@yandex.ru, Almetievsk, Russian Federation

**Paymurzina Natalia Kh.**

Post-Graduate Student of Management and Service in the Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: paimurzina@inbox.ru, Ufa, Russian Federation

**Salikhov Renat B.**

Dr. Sci. Phys.-Math., Professor, Head of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», e-mail: salikhovrb@ya.ru, Ufa, Russian Federation

**Salmanova Malahat N.**

Post-Graduate Student of Informatics Chair, Sumgait State University, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, Sumgait, Azerbaijan Republic

**Shabanov Vitaliy A.**

Cand. Sci. Tech., Professor, Head of Electrical Equipment and Facilities of Enterprises Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: ShabanovVA1@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Shakirzyanov Aydar A.**

Engineer of Nondestructive Testing Service of Engineering and Technical Center, Ltd «Gazprom transgaz Ufa», e-mail: aydar102@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Talibov Natig G.**

Cand. Sci. Tech., Vice-Rector on Teaching Organization and Training Technologies, Sumgait State University, e-mail: malaxat\_70@mail.ru, Sumgait, Azerbaijan Republic

**Talypov Marat A.**

Assistant of Mechanics and Engineering Graphics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», e-mail: marih999@gmail.com, Ufa, Russian Federation

**Tarassenko Larisa S.**

Undergraduate Student of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: lartarassenkost@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Tulupov Victor D.**

Dr. Sci. Tech., Professor of Electrotechnical Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University «Moscow Power Engineering Institute», e-mail: TulupovVD@mpei.ru, Moscow, Russian Federation

**Urazbakhtina Yulia O.**

Dean of the Faculty of Avionics, Energetics and Infocommunications, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: pbot@mail.ru, Ufa, Russian Federation

---

**Vazhdaev Konstantin V.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Infocommunication Technologies and Nanoelectronics Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Assistant Professor of Management and Service in Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: vazhdaevk@gmail.com, Ufa, Russian Federation

**Yasoveev Vasikh Kh.**

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Information and Measuring Techniques Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: yasov@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Zajceva Alina A.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Information and Measuring Techniques Chair, Faculty of Avionics, Energy and Infocommunications, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», e-mail: jenekap41@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Zelev Anatoly P.**

Cand. Sci. Tech., Assistant Professor of Management and Service in Technical Systems Chair, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: zelev7@mail.ru, Ufa, Russian Federation

**Zikiy Anatoliy N.**

Cand. Sci. Tech., Senior Researcher, Assistant Professor of Information Security of Telecommunication Systems Chair, Institute of Computer Technologies and Information Security, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: zikiy50@mail.ru, Taganrog, Russian Federation

**Zlaman Pavel N.**

Leading Design Engineer of Scientific Design Bureau of Modeling and Control Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Southern Federal University», e-mail: otdel24d@nkbmius.ru, Taganrog, Russian Federation

## **Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале:**

1. Статьи, предоставляемые авторами в журнал, должны соответствовать профилю журнала, обладать новизной, интересовать широкий круг научной общественности.
2. Редакция принимает к публикации только открытые материалы на русском и английском языках (для иностранных авторов).
3. Поля – 2,5 см с каждой стороны; шрифт – Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал – полуторный; ссылки на литературу – в квадратных скобках. При наличии ссылок список литературы обязателен (в порядке цитирования, в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008).
4. В правом верхнем углу жирным курсивом: фамилия, имя, отчество авторов (обязательно полностью), ученая степень, ученое звание, должность, структурное подразделение (обязательно полностью), наименование организации (полностью), город, страна.
5. По центру, жирным шрифтом, заглавными буквами: название статьи, УДК в правом верхнем углу.
6. В конце статьи укажите почтовый адрес с указанием индекса, фамилию и инициалы получателя (по этому адресу будет выслан журнал), телефон (сотовый), e-mail контактного лица. Файл со статьей оформить: Фамилия И.О.doc (или docx). Отправлять по адресу: uor-ugaes@mail.ru.
7. Обязательно прислать фото авторов отдельными файлами.
8. К статье должны быть приложены на русском и английском языках: название статьи, аннотация (240 слов, определяющих теоретическую ценность и практическую новизну статьи), ключевые слова (не менее 10), список литературы обязателен (не менее 5 источников) на русском и английском языках.
9. Автор дает согласие на воспроизведение на безвозмездной основе в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «УГУЭС» электронной версии своей статьи, опубликованной в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы».
10. Графический и табличный материал должен быть представлен в черно-белом варианте в приложении к WORD, например, Microsoft Graph, без использования сканирования; для диаграмм применять различную штриховку, размер шрифта 10 или 11 pt, математические формулы оформляются через редактор формул Microsoft Equation, а их нумерация проставляется с правой стороны. Таблицы, диаграммы, рисунки подписываются 12 шрифтом в правом верхнем углу.
11. Сокращение слов, имен и названий, как правило, не допускается. Разрешаются лишь общепринятые сокращения мер физических, химических и математических величин и терминов и т. д.
12. Поступившие в редакцию статьи в обязательном порядке будут проходить рецензирование. Рецензии отклоненных работ высылаются авторам и содержат аргументированный отказ от публикации. В рецензиях работ, отправленных на доработку, указываются замечания к статье.
13. Все статьи, поступившие в редакцию, в обязательном порядке проходят проверку в системе «Антиплагиат».
14. С аспирантов плата за публикацию не взимается. При отправлении статьи на электронный адрес также необходимо отправить отсканированную справку из аспирантуры, заверенную отделом кадров.

### **Памятка авторам**

В статье настоятельно рекомендуется:

- НЕ использовать табуляцию (клавиша Tab);
- НЕ устанавливать свои стили абзацев (кроме принятых по умолчанию);
- НЕ расставлять автоматические списки (при нумерации строк и абзацев);
- НЕ ставить двойные, тройные и т. д. пробелы между словами.

Рекомендуется применять в статье только один тип кавычек («»).

Помнить о том, что необходимо различать дефис и тире. Тире выставляется сочетанием двух клавиш («Ctrl» + «-»).

**Все цитаты в статье должны быть соотнесены со списком литературы, при прямом цитировании обязательно указывать номера страниц.** Список литературы не следует смешивать с примечаниями, которые должны располагаться перед списком литературы.

**Статьи, не соответствующие требованиям, отклоняются для доработки.**

---

## **Requirements for the materials, provided for publication in the journal:**

1. Articles provided by the authors in the Journal should match the profile of the magazine, be new, be interesting for a wide range of scientific community.
2. Revision accepted for publication only open materials in Russian and English (for foreign authors).
3. Fields – 2.5 cm on each side; font – Times New Roman, font size – 14, line spacing – one and a half; References in square brackets. If there is a list of literature references is required (in order of citation in accordance with GOST R 7.05-2008).
4. In the upper right corner in bold italics: surname, name, patronymic of the author (certainly in full), academic degree, academic rank, position, name of organization (in full), country, city.
5. Centered, bold capital letters: title of the article. UDC – in the upper right corner.
6. At the end of the article specify the e-mail address with ZIP code, name and initials of the recipient (the address will be sent to the magazine), telephone (mobile), e-mail of the contact person. Article File Contents: Surname N.P.doc (or docx). Send to the address: uop-ugaes@mail.ru.
7. Be sure to send color photos of the authors in separate files (at least 1 MB and not more than 5 MB).
8. To the article must be accompanied by the Russian and English languages: the article title, abstract (240 words, determine the theoretical value and practical novelty of the article), keywords (at least 10), references required (at least 5 sources).
9. Author agrees to play free of charge on the Internet at the website FSEI HE «USUES» electronic version of his article published in the journal «Electrical and data processing facilities and systems».
10. Graphical and table material should be presented in the annex to the WORD. For example, Microsoft Graph, without scanning; diagrams for applying a different shading, font size 10 or 11 pt, mathematical formulas should be made through the formula editor Microsoft Equation, and their numbers stamped on the right side. Table signed by the 12th print in the upper right corner, diagrams, drawings – at the bottom center.
11. Reductions of words of names usually are not permitted. Allowed only standard abbreviations measures, physical, chemical and mathematical quantities and terms, etc.
12. Received articles will necessarily be reviewed. Reviews of rejected papers are sent to the authors and contain a reasoned rejection of the publication. In reviews of works sent for revision, specify comments on the article.
13. All articles received by the editorial compulsorily tested in the «Anti-plagiarism».
14. Article volume with the summary and the list of references shouldn't exceed 12 pages.

### **Memo to authors**

The article is highly recommended:

- NOT TO use the tab key (Tab);
- NOT TO place your paragraph styles (other than the defaults);
- NOT TO set automatic lists (with line numbers and paragraphs);
- NOT TO put double, triple and so. D. The spaces between words.

Recommended in the article is only one type of quotes («» or “”).

Remember that it is necessary to distinguish hyphens and dashes. Dash is exhibited by a combination of two keys («Ctrl» + «-»).

**All quotations in the article should be correlated with the list of literature, with direct quotations necessarily indicate page numbers.** References should not be confused with the notes that must be placed before the bibliography.

**Articles that do not meet the requirements will be rejected for revision.**