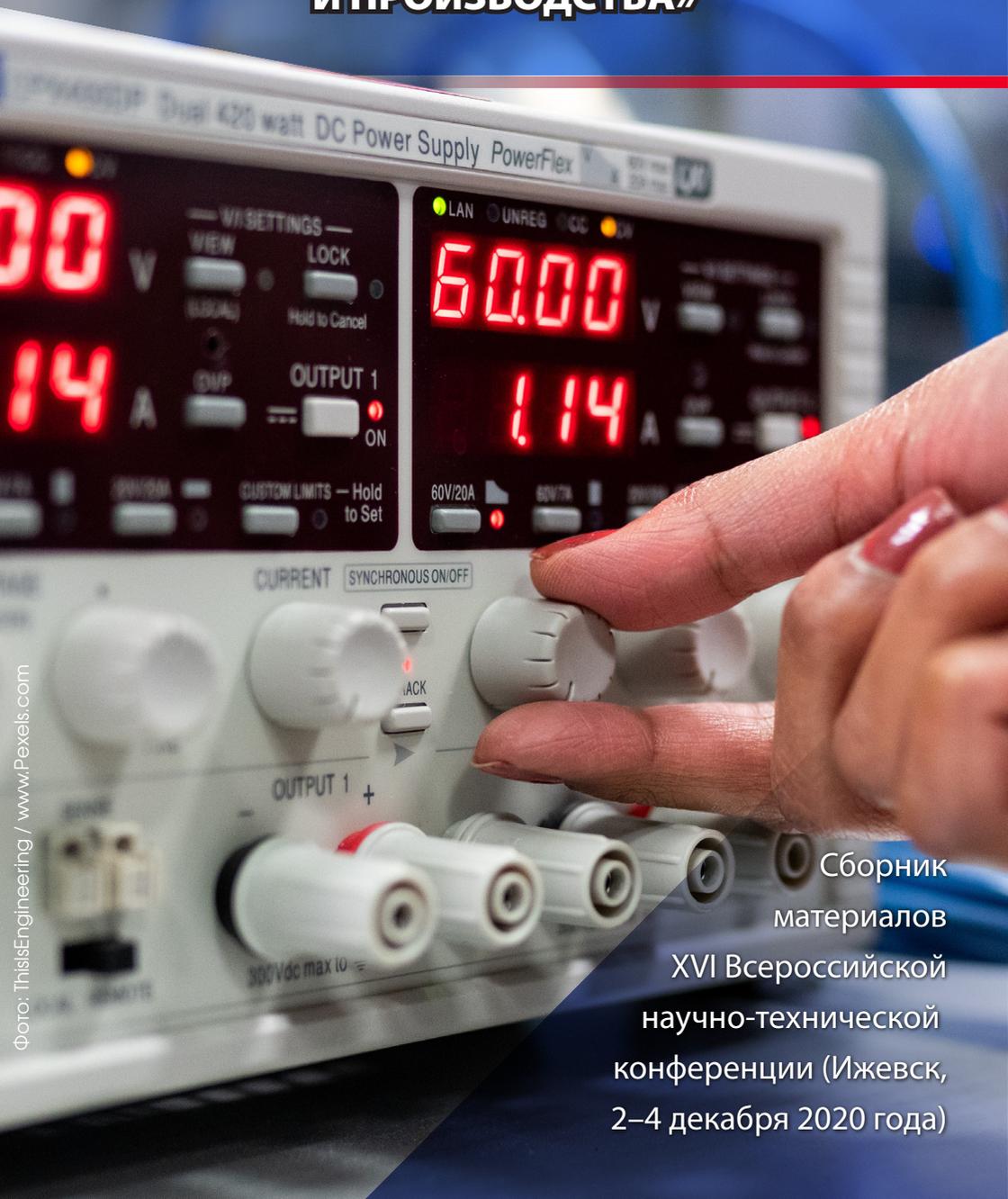


# «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2020. ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА»



Сборник  
материалов  
XVI Всероссийской  
научно-технической  
конференции (Ижевск,  
2–4 декабря 2020 года)

Минобрнауки России  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова»

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2020.  
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ  
И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов  
XVI Всероссийской научно-технической конференции  
(Ижевск, 2–4 декабря 2020 года)



Издательство ИжГТУ  
имени М. Т. Калашникова  
Ижевск 2020

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

*В. П. Грахов*, председатель организационного комитета, д-р экон. наук, ректор ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. Н. Копысов*, зам. председателя, канд. техн. наук, проф., проректор по научной и инновационной деятельности;

*А. В. Абилов*, зам. председателя, канд. техн. наук, доц., декан приборостроительного факультета, отв. организатор конференции, отв. редактор сборника;

*С. А. Мурашов*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», отв. организатор конференции, отв. редактор сборника;

*О. А. Дегтева*, канд. экон. наук, доц., начальник управления научно-исследовательских работ;

*А. П. Тюрин*, зам. председателя, д-р техн. наук, проф., зам. начальника управления научно-исследовательских работ;

*Ю. К. Шелковников*, д-р техн. наук, проф., гл. научный сотрудник УдмФИЦ УрО РАН;

*Л. В. Волкова*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»;

*Б. И. Сибгатуллин*, ст. преподаватель кафедры «Электротехника»;

*А. П. Александров*, гл. конструктор АО «ИЭМЗ «Купол»;

*А. Б. Бобков*, тех. директор филиала ПАО «Мобильные телесистемы»;

*С. Б. Николичев*, зам. директора по развитию ООО «ИИКП» (Корпорация «Аксион»);

*А. Г. Серяков*, зам. гл. конструктора АО «Ижевский радиозавод»;

*В. В. Ханжин*, директор Ижевского регионального отделения Уральского филиала ПАО «МегаФон» по Удмуртской Республике

**П75 «Приборостроение в XXI веке – 2020. Интеграция науки, образования и производства»** : сборник материалов XVI Всероссийской научно-технической конференции (Ижевск, 2–4 дек. 2020 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. – 266 с. – 8,8 МБ (PDF). – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7526-0892-6

В сборник включены избранные, прошедшие рецензирование статьи по материалам докладов XVI Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства», проходившей 2–4 декабря 2020 года в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова. Рассматривается широкий круг научных и технических вопросов в области приборостроения.

Издание предназначено для специалистов в области приборостроения, ученых, аспирантов, магистрантов и студентов.

УДК 681.2(06)

ISBN 978-5-7526-0892-6

© ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020

© Оформление. Издательство ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

*А. В. Абилов*, председатель, канд. техн. наук, доц., декан приборостроительного факультета, отв. организатор конференции, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*С. А. Мурашов*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», отв. организатор конференции, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*С. В. Леньков*, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск);

*Г. В. Ломаев*, д-р техн. наук, проф. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. В. Муравьев*, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*О. В. Муравьева*, д-р техн. наук, проф. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. И. Нистюк*, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*О. В. Пономарева*, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. В. Соболев*, д-р физ.-мат. наук, декан факультета «Математика и естественные науки», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*П. А. Ушаков*, д-р техн. наук, проф. кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. В. Хворенков*, д-р техн. наук, проф. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. А. Айзикович*, канд. физ.-мат. наук, доц., зав. кафедрой «Прикладная математика и информатика», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. К. Барсуков*, канд. техн. наук, проф. кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*О. П. Богдан*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. А. Богданов*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*Д. С. Васильев*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*Л. В. Волкова*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. А. Глушков*, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*Д. В. Злобин*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*С. В. Клишин*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. В. Коробейников*, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Программное обеспечение», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*Ю. В. Мышкин*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. В. Платунов*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*Б. И. Сибгатуллин*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. А. Стародубцева*, канд. техн. наук, проф. кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. А. Стрижак*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*Р. А. Хатбуллин*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*К. В. Шишаков*, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*И. В. Штенников*, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. А. Штин*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*И. А. Кайсина*, ст. преподаватель кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## Содержание

<b>Секция 1. Электронные средства и системы управления</b>	
<i>Strukov S. A., Fominykh Y. A., Mylnikov K. S., Glushkov V. A.</i> Multifunction programmable robotic platform .....	8
<i>Грбачак Е. П., Логинов Е. Л.</i> Управление научно-исследовательскими, энергомашиностроительными и электроэнергетическими компаниями как элементами интегрированного отраслевого технологического комплекса .....	16
<i>Фокеев А. Е., Вяткин Н. А.</i> Неактивная мощность и способы ее компенсации .....	22
<i>Фокеев А. Е., Тумаков И. Н.</i> Анализ применимости методов определения допустимой нагрузки для выбора мощности силовых трансформаторов для проектирования систем электроснабжения .....	32
<i>Штин А. А., Ахатов Р. З.</i> Моделирование генератора синусоидальных сигналов на микроконтроллере PIC16F84A в Multisim .....	40
 <b>Секция 2. Приборы в промышленности, неразрушающем контроле, здравоохранении и экологии</b>	
<i>Башарова А. Ф., Наговицын А. А., Муравьева О. В.</i> Методика расчета эффективности ЭМА-преобразователя продольных волн в условиях дополнительного намагничивания током высокочастотного индуктора .....	46
<i>Бехер С. А., Попков А. А.</i> Использование ударного нагружения при контроле хрупких объектов методом акустической эмиссии .....	53
<i>Богдан О. П., Залалутдинова А. Р.</i> Исследование акустического импеданса растворов резонансным методом .....	60
<i>Богдан О. П., Злобин Д. В., Тарасова А. В.</i> Исследование скорости акустической волны в образцах из терморасширенного графита .....	65
<i>Богдан О. П., Рысев Д. С.</i> Исследование анизотропии скорости звука в пенополиэтилене .....	70
<i>Волкова Л. В., Муравьева О. В., Муравьев В. В., Хантимирова А. А.</i> Исследование сигнала вихретокового преобразователя при контроле терморасширенного графита .....	75
<i>Дымкин Г. Я., Конишина В. Н., Юрченко Л. А.</i> Подготовка персонала по неразрушающему контролю продукции железнодорожного назначения .....	82
<i>Егоров В. С., Хасанов Р. Р.</i> Методика расчета коэффициента отражения с учетом физических свойств объекта контроля .....	90
<i>Казанцев С. В., Муравьев В. В., Андреев А. В.</i> Распространение ультразвуковой головной волны в эксплуатируемых рельсовых плетях .....	99
<i>Лаптев Д. С., Егоркина С. Б., Степанов В. А., Белых В. В., Худойкулова Ш. Н.</i> Оценка функционального состояния жизнедеятельности орга-	

низма на основе мультифрактального анализа изменений тканей роговицы под воздействием вращающегося электрического поля.....	104
<i>Ломаев Г. В., Емельянова М. С.</i> Генератор магнитных полей для магнитобиологических опытов.....	115
<i>Ломаев Г. В., Шихарев П. А.</i> Моделирование магнитных полей в строительных сооружениях с элементами конструкции, содержащими ферромагнетики .....	121
<i>Понькина А. А., Муравьева О. В., Волкова Л. В., Чухланцева Т. С.</i> Влияние волновой толщины стенки листа на эпюры смещений нормальных волн Лэмба.....	128
<i>Рыжова А. О., Бехер С. А.</i> Оценка возможности контроля плотности посадки прессовых соединений ультразвуковым методом .....	135
<i>Соков М. Ю., Елькин Н. Ю., Владимиров К. А., Муравьева О. В.</i> Спектральный метод контроля трубной резьбы с использованием электромагнитно-акустического преобразователя.....	142
<i>Танков К. А., Муравьев В. В.</i> Развитие усталостной трещины в головке рельса .....	150
<i>Хасанов Р. Р., Сяктерев М. В., Егоров В. С.</i> Стенд для контролируемого нагрева при испытаниях композитной арматуры .....	156

### Секция 3. Радиотехника, связь, информационные технологии

<i>Ali R., Al Akkad M. A.</i> Machine learning in robotic grasping tasks: a survey .....	164
<i>Атланова А. К., Чащина П. Д., Титов В. В., Кайсина И. А., Абилов А. В., Ламри М. А.</i> Обзор возможной реализации автономного полета малых БПЛА на базе Clever с поддержкой ретрансляции данных .....	171
<i>Вихляев И. А., Шишаков К. В.</i> Обработка сигналов твердотельного волнового гироскопа с постоянной частотой дискретизации .....	176
<i>Гравшин В. Г., Стойчев С. В., Ушаков П. А.</i> Проверка возможности реализации нового элемента с фрактальным импедансом путем комбинации элементов с фрактальным импедансом с известными параметрами.....	183
<i>Ельцов И. С., Вдовин А. Ю.</i> Исследование «графического пароля» с использованием аутентификации на основе модели «рукопожатия» для мобильных устройств.....	190
<i>Раев А. С., Касимов П. М., Зайцева А. А., Копысов А. Н., Хворенков В. В.</i> Сравнение и оценка диаграмм направленности излучателей для работы с поляризационно-модулированными сигналами в прототипе и в модели.....	198
<i>Сидорина В. А., Урсегова Е. Д., Чистякова Д. Р.</i> Экспериментальное исследование приема амплитудно-модулированных сигналов на одной боковой полосе.....	209

---

*Спиридонов Ф. И., Мингазов Р. И., Шишаков К. В.* Разработка программного комплекса для информационного сопровождения производства твердотельных волновых гироскопов .....218

*Титов В. В., Кайсина И. А., Абилов А. В., Ламри М. А.* Обзор методов улучшения доставки потоковых данных в беспроводных самоорганизующихся сетях .....226

*Комраз С. Р., Мирошников В. В., Победа Т. В.* Способ дистанционного обнаружения и идентификации потенциально опасных веществ .....234

#### **Секция 4. Физико-математические методы в приборостроении**

*Айзикович А. А., Коровин В. М.* Программная реализация машины с неограниченными регистрами .....242

*Гундина М. А., Ширвель П. И.* Скалограмма сигнала в Mathematica .....252

*Соболев В. Вал.* Сопоставление оптических спектров германида магния и германия .....257

## Секция 1. Электронные средства и системы управления

УДК 62-523.8

S. A. Strukov, Y. A. Fominykh, K. S. Mylnikov, students

E-mail: [manual2456@gmail.com](mailto:manual2456@gmail.com)

V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor

E-mail: [kra\\_dept@istu.ru](mailto:kra_dept@istu.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Multifunction Programmable Robotic Platform**

*The article describes the design of a three-wheeled robot platform with two driven wheels. The structure, the schematics, the components and the construction design of the device are considered. The attention is given to the principles of operation and functions of the platform. There considered the multifunction feature implemented by modular type of the platform that allows flexible reconfiguring of its hardware and operation mode. Special attention is given to a relevant application – automatic disinfection of rooms.*

**Keywords:** platform, device, base, robotic, disinfection.

#### **Introduction**

There are many robotic platforms with dimensions and applications like robotic vacuum cleaners, e. g., iRobot Create. Usually these platforms have at least one drive and some pivot points [1]. The mentioned platforms have just one sphere of application and the user cannot change it by his own will [2]. The point of this work was to design a universal three-wheeled robot platform with two driven wheels. The main feature of this platform is flexibility for the user to reconfigure its operational algorithm and its onboard equipment to provide wider applicability [3].

One possible application of the platform is described here in details. It is automatic disinfection of human inhabited areas like rooms, stores, selling floors, offices etc. at people absence time intervals. It especially makes sense in case of threats like coronavirus.

## Application

Consider such application as room disinfection.

There is a Russian industrial disinfection device “Yunior” based on a robotic platform (Fig. 1). Its features are large areas of coverage, production of disinfection vapor by the robot itself, ability to move across uneven surface by means of caterpillars [4].



*Fig. 1.* Russian disinfecting robot “Yunior”

This type of machine is too sophisticated for an average private user. So, the designed robot platform can replace it with maintaining the general functions in simplified manner as follows:

1. Instead of the industrial vaporizer, a nebulizer pressurized pack is supposed to be used. It is activated by means of mechanical pushing the release button with an electromagnetic drive.

2. The platform can be equipped with a set of UV LEDs to provide additional disinfection of the air around the device.

Operation modes of all pieces of the onboard equipment can be flexibly programmed.

Compare the efficiency of the designed robot and “Yunior”.

The disinfecting agent is sprayed for 1 second every 10 seconds. The evaporation rate is 1 g per second that makes 6 g (60 ml) per minute at the given regularity. The net weigh of one spraying can is 200 g, so it takes 33 minutes 20 seconds to empty it. Adding the second spraying can doubles the spraying time at the same rate.

The industrial vaporizer operation time is also 1 hour with full tank [5]. Its spraying potential is 200-300 ml per minute which is 5 times greater than

the previous one. It is too much for an average user, so the designed device perfectly fits.

## Design

The platform is based upon the blocks with standard schematics. The structure diagram is given in Fig. 2.

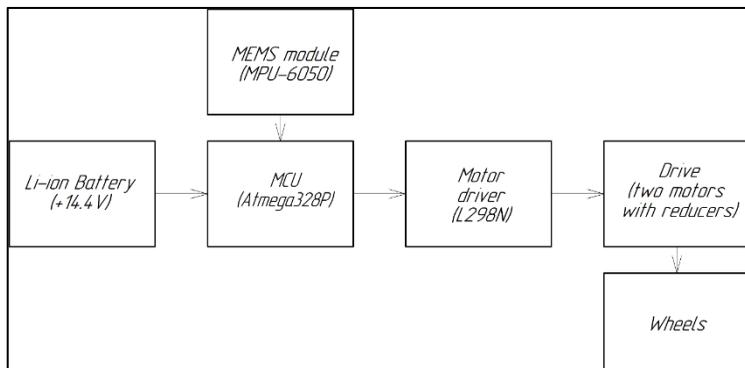


Fig. 2. Multifunction robotic platform structure diagram

A brief description of the blocks is given further:

1. The power supply is a 14.4 V Li-ion battery like those used to power hand drills.

2. At the microcontroller board (Arduino Nano), 14.4 V from the battery is converted into 5 V. Then two these voltages are applied to the two-channel drive controller L298N which can stand current up to 3 A.

3. Control algorithm is implemented as firmware of the microcontroller board MCU ATmega 328P-AU [6].

4. Each driven wheel is put in motion by its own collector motor equipped with a gearbox. The motors receive control signals from the drive controller.

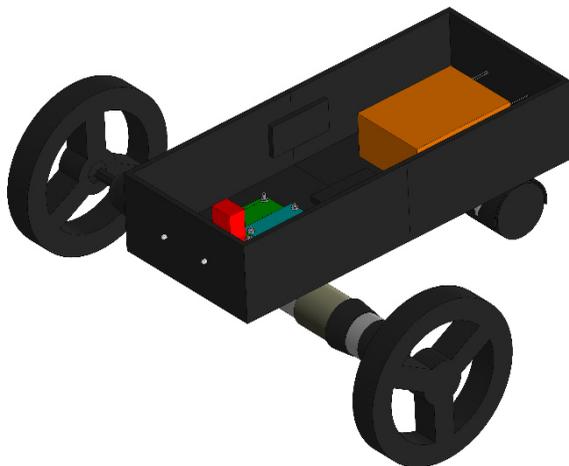
5. IMU GY-521 with three-degrees-of-freedom gyroscope and two-degrees-of-freedom accelerometer is a feedback sensor that makes it possible to estimate Euler angles and yaw-pitch-roll ratings of the platform. It increases the accuracy of positioning the robot in space [7].

Electrical schematic diagram is given in Fig. 3. Power supply voltage of 15-17 V is applied from an external battery via X1 connector. It energizes the circuit. Control signals [8] (PWM and logic state of motors' rotation directions) from MCU D1 (Arduino Uno/Nano) are directed to L298N DC motor driver D3 with protection diodes VD1...VD8. Driver D3 forms the corre-



The device PCB layout is given in Fig. 4. It has several PLS-male connectors to provide easier docking of external modules. Some elements like VD1...VD8, C3, C4, etc. are not to be mount on the Fig. 4 PCB as they are located at L298N separate PCB.

The body of the platform is 3D-printed (see the computer model in Fig. 5) [9]. Drives' mounting brackets are not shown conventionally.



*Fig. 5.* Approximate 3D image of the robotic platform

The reason of using hand drill motor sets with integrated gearboxes is their ability to accelerate and provide with significant torque. The corresponding hand drill batteries are suitable for being power sources.

Wheels can be either 3D-printed or chosen from standard ones [9]. The third wheel is not supposed to be driven directly as long as its function is to stabilize the platform horizontally [10].

The robot platform features [11]:

1. The robot can be programmed to drive along certain paths or choose the optimal path with presence of random obstacles.
2. The platform can carry various equipment and payload to perform specific functions.
3. The platform carrying capacity is up to 2 kg.
4. It can move only over the flat surface.
5. The potentially achievable linear motion speed is up to 14 km/h (in case of 700 RPM motor spin rate and 15 cm diameter of driven wheels).

Therefore, modular design of the platform provides its functional flexibility [12].

### Research of platform functions

Even though the concept of the described device is not brand new in robotics (there are such platforms as iRobot Create, iRobot Create 2 etc.), the platform provides numerous applications:

- Automatic room disinfection;
- Mobile air freshener;
- Mobile irrigation device;
- Mobile insect repellent (enhanced repellency surface);
- Cargo platform [4, 13];
- Multi-purpose remote controlled mobile platform [14];
- Automatic homing turret.

### Conclusions

The designed multifunction robot platform performs the variety of functions that fit an average private user's needs with no excessive performance. The device suits the private rooms or apartments of about 60 square meters.

### References

1. Anashin, D. V. (2015). Ispol'zovanie universal'nogo robota v fermerskikh hozjajstvakh [Using of versatile robots in farming facilities]. *Sovremennye materialy, tehnika i tehnologii [Modern Machinery, Materials and Technologies]*, 1(1), 17-18. (in Russian).
2. Paraskevov, A. V., & Levchenko, A. V. (2014). Sovremennaja robototekhnika v rossii: realii i perspektivy (obzor) [Modern robotics in russia: reality and future]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU [Scientific Journal of the KubGAU]*, (104), 1-22. (in Russian). Retrieved from <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/116.pdf>.
3. Trybin, V. G., Eskin, A. V., Pechnikov, A. L., & Zhmud', V. A. (2014). Ispol'zovanie seti internet dlja interaktivnoj laboratornoj raboty s distancionnym upravleniem model'ju robota snegouborshhika [The use of Internet for interactive laboratory work for the distance control of robot-snow-fightong vecicle], *Avtomatika i programmnaya inzheneriya [Automatics & Software Engineering]*, (1), 95-103. (in Russian). Retrieved from <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/journal/en/A%26AE-1-2014.pdf>.
4. Dranitski, I. O. (2015). Ispol'zovanie mobil'nikh robotov dlja avtomatizacii skladskich pomesheniy [Using of mobile robots for warehouse automation]. *Vestnik nauki i obrazovaniya [Bulletin of Science and Education]*, (6), 5-9. (in Russian).
5. Dovlatov, I. M. (2017). Ustanovki dlya obezzarazhivaniya ptichnikov aerozolem [Installations for disinfection of poultry houses spray]. *Innovacii v sel'skom hozjajstve [Inventions in Agriculture]*, 2(23), 61-66. (in Russian).

6. Andreev, R. V., Polyakova, N. D., & Apal'kov, I. V. (2017). Razrabotka konstruktora mobil'nogo robota i algoritmov ego upravleniya [Development of mobile robot DIY kit and its control algorithms]. *DSPA: Voprosy primeneniya cifrovoy obrabotki signalov [DSPA: Questions of using digital signals processing methods]*, 7(3) 157-161. (in Russian).
7. Buhrtz, T., Letellier, J., & Sieck, J. (2013). Using mobile robots in museums for visitor interaction. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi [Proceedings of Odessa Polytechnic University]*, (1), 32-35.
8. Degtjareva, E. A. (2015). Rol' robototekhniki v izuchenii algoritimizacii i programirovaniya [Place of robotics in study of algorithms and programming], *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovanij XXI veka: teorija i praktika [Relevant trends of scientific research of XXI century: theory and application]*, 3(8-4), 489-492, (in Russian).
9. Medvedeva, S. I., Nekrasov, A. A., & Shepelyov, S. O. (2016). Preimushchestvo 3D pechati v izgotovlenii prototipov v robototekhnike [The advantage of 3D printing to manufacture prototypes in robotics]. In *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Innovacionnye podhody k resheniju tehniko-jekonomicheskikh problem" : sbornik trudov [Proceedings of the International Conference "New methods of solving technical and economic problems"]* (pp. 113-117). Moscow, Russia : National Research University of Electronic Technology. (in Russian).
10. Martynenko, Yu. G. (2005). Motion control of mobile wheeled robots]. *Journal of Mathematical Sciences*, 147(2), 6569-6606. doi: 10.1007/s10958-007-0496-4.
11. Klassifikacija promyshlennykh robotov [Classification of industrial robots] (in Russian). [Online; accessed 18.09.2020]. URL: <https://infopedia.su/13xac63.html>.
12. Gavrilov, M. (n. d.). Modelirovanie i prototipirovanie na 3D printere [Modeling and prototyping on 3D printer]. (in Russian). Retrieved from <https://www.prorobot.ru/info/3d-modelirovanie.php>.
13. Kharitonova, P. N., & Martirosjan, M. M. (2020). Ispol'zovanie transportnykh robotov v pivovarennom proizvodstve [Use of transport robots in brewery]. In *Sbornik statey II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnye issledovaniya vysshey shkoly" [Proceedings of II International Scientific Practical Conference "Science Researches of Higher School"]* (pp. 85-87). Penza, Russia : Nauka i Prosveshchenie.
14. Zin'ko, R., Serkiz, O., Kutrakov, O., & Andyush, M. (2015). Ispol'zovanie mobil'nykh robotov v chrezvychaynykh situatsiyakh [The use of mobile robots in extraordinary situations]. *Naukovi Notatki [Scientific Notes]*, (51), 76-80. (in Russian).

---

С. А. Струков, Ю. А. Фоминых, К. С. Мыльников, студенты

E-mail: manual2456@gmail.com

В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц.

E-mail: kra\_dept@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Многофункциональная программируемая роботизированная платформа**

*В статье приводится процесс разработки двухколесной роботизированной платформы с двумя ведущими колесами и третьим опорным. Приведена структура устройства, его схемы и компоненты. Уделено внимание принципам работы и функциям платформы. Рассмотрена применимость платформы в различных сферах жизнедеятельности и частный случай её применения в качестве устройства для дезинфекции помещений.*

**Ключевые слова:** платформа, устройство, основание, роботизированный, дезинфекция.

УДК 65.011.56

*Е. П. Грабчак*, канд. экон. наук, директор департамента

*Е. Л. Логинов*, д-р экон. наук, проф. РАН

E-mail: [evgenloginov@gmail.com](mailto:evgenloginov@gmail.com)

Министерство энергетики Российской Федерации

## **Управление научно-исследовательскими, энергомашиностроительными и электроэнергетическими компаниями как элементами интегрированного отраслевого технологического комплекса**

*Рассмотрены проблемы восстановления плановых основ государственного управления в отношении научно-исследовательских, энергомашиностроительных и электроэнергетических сегментов как элементов интегрированного отраслевого технологического комплекса. Предлагается формирование основ системной организации научно-технического развития электроэнергетики, включая ключевые направления фундаментальных исследований и НИОКР с учетом приоритетов импортозамещения. Обоснована необходимость разработки системных мер по адаптации информационных систем управления в электроэнергетике к угрозам и рискам, связанным с воздействиями природного и техногенного характера в обычных условиях, в условиях чрезвычайных и иных нештатных ситуаций. Сформулированы направления реализации мер по разработке и реализации программ производства энергетического оборудования на российских предприятиях машиностроения и приборостроения в средне- и долгосрочной перспективе.*

**Ключевые слова:** энергетика, управление, импортозамещение, информационные системы, цифровые технологии.

### **Введение**

Задачи повышения эффективности управления отраслевым технологическим комплексом требуют комплексного реинжиниринга системы управления создания в нашей стране и в ЕАЭС в целом системы комплексной координации мер по импортозамещению с точки зрения рассмотрения энергетической инфраструктуры как метасистемы [1–3].

Необходима разработка системных механизмов интеграции структур фундаментальной и прикладной науки, образования, энергомашиностроительного и приборостроительного производства, энергогенерации и транспортировки электроэнергии при реализации проектов импортозамещения в энергетике России [4–6].

### **Ключевые положения по управлению интегрированным отраслевым технологическим комплексом**

Предлагаются следующие меры по управлению интегрированным отраслевым технологическим комплексом:

- разработка основных мер обеспечения надежности энергоснабжения и технологической безопасности функционирования энергосистем (живучесть энергосистемы) для работы в обычных условиях, в условиях чрезвычайных ситуаций и в особый период (природные воздействия критического характера, техногенные воздействия, военные, террористические и иные атакующие воздействия, некорректная работа связанных обеспечивающих систем диспетчерского, автоматического и иного управления и т. п.);

- разработка мероприятий, направленных на снижение зависимости энергетика от импорта продукции, оборудования, комплектующих и запасных частей и иностранных технологических решений, а также на развитие отечественного производства для импортозамещения в энергетике России;

- разработка организационного и информационного механизма формирования консолидированных пакетов заказов (планов закупок) по ключевым позициям производства и поставок оборудования и запасных частей для эксплуатации и ремонта, а также в отношении разработки новых образцов техники и оборудования с заданными критериями инновационности для модернизации основных фондов компаний отрасли на принципах импортозамещения.

- оценка различных угроз для функционирования энергосистем и надежности энергоснабжения потребителей в обычных условиях, в условиях чрезвычайных ситуаций и в особый период, анализ возможных последствий возникновения событий, влияющих на устойчивость энергосистемы для отдельного энергорайона и энергосистемы в целом, с учетом большого объема разноплановых факторов и вероятности возникновения таких факторов;

- разработка типовых и специальных решений по повышению уровня защищенности объектов и систем управления в энергетике России от природных и техногенных воздействий естественного и искусственного характера с учетом приоритетов импортозамещения;

- анализ вариантов работы оборудования и действий энергокомпаний в сверхкритических условиях, которые не были учтены при строительстве и развитии энергосистем, разработка механизмов взаимодействия энергокомпаний в этих условиях с органами исполнительной власти разного уровня (от федерального до муниципальных образований);

- разработка методических подходов к прогнозированию, локализации «очагов» возможных и произошедших аварий и расчету необходимых ресурсов для ликвидации последствий чрезвычайных и нештатных ситуаций,

приводящих к угрозам системам энергообеспечения промышленных объектов и жилищных агломераций, в том числе разработка рекомендаций по созданию в энергокомпаниях специальных подсистем поддержки принятия решений для действий в таких условиях и интеграции таких подсистем на межкорпоративном уровне с выходом на Минэнерго России;

– анализ состава закупаемых энергокомпаниями оборудования и комплекствующих с позиций обеспечения приоритетов импортозамещения и их технических характеристик для выдачи рекомендаций российским производителям оборудования, мониторинг процессов замены оборудования с учетом критериев обеспечения защищенности объектов и систем управления в энергетике России от природных и техногенных воздействий естественного и искусственного характера;

– разработка основных мер по применению мер государственной поддержки в проектах организации импортозамещения, обеспечения надежности энергоснабжения и технологической безопасности функционирования энергосистем.

### **Механизмы поддержки проектов по созданию импортозамещающих производств в энергетическом машиностроении**

Поддержка проектов по созданию импортозамещающих производств в энергетическом машиностроении может быть реализована Минэнерго России и Минпромторгом России в рамках действующих инструментов государственной поддержки:

– предоставление льготного заемного финансирования из Фонда развития промышленности для реализации ключевых инвестиционных проектов, направленных на импортозамещение и создание новых производств под 5 % годовых;

– субсидирование затрат на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по современным технологиям в рамках реализации такими организациями инновационных проектов (Постановление Правительства Российской Федерации от 12 декабря 2019 г. № 1649);

– субсидирование затрат на производство и реализацию пилотных партий средств производства (Постановление Правительства Российской Федерации от 25 мая 2017 г. № 634).

### **Выстраивание новой конфигурации систем и центров управления энергетикой России с учетом требований информационной безопасности**

Цифровые информационные технологии с расширенной smart-компонентой создают новые возможности для повышения эффективно-

сти различных сфер деятельности в энергетике и одновременно риски с позиций обеспечения информационной безопасности [7–10].

Выходом из рассмотренной ситуации для российских структур является ускоренное импортозамещение ключевых функциональных узлов информационных систем управления и программного обеспечения. (Пример есть – это информационные системы Росатома). Необходимо выстраивание новой конфигурации систем и центров управления энергетикой России, адаптированных к особенностям новых трендов цифровизации процессов и процедур управления.

Как упреждающие меры, направленные на снижение опасности рисков и угроз системам управления в энергетике, при их реализации российскими государственными ведомствами и госкомпаниями можно предложить следующие:

- выяснение в отношении корпоративных (ведомственных) информационных систем количества процессоров и иных комплектующих иностранного производства, которые могут быть дистанционно отключены;

- разработка сценариев действий ведомства или госкомпании в условиях, если внезапно перестанут работать корпоративные (ведомственные) информационные системы, или обычные каналы связи, которые могут быть дистанционно отключены (в том числе в отношении работы АСУ ТП);

- определение ведомствами и госкомпаниями ключевых системообразующих серверов в отношении корпоративных (ведомственных) информационных систем и сетей, которые нуждаются в первоочередной замене на комплектующие отечественного производства или комплектующие иностранного производства, но дополненные элементами российского производства, исключающими возможность дистанционного отключения;

- разработка ведомствами и госкомпаниями с учетом финансовых возможностей 5-летних планов замещения ключевых узлов системообразующих серверов корпоративных (ведомственных) информационных систем и сетей оборудованием российского производства, исключающим возможность дистанционного отключения;

- реализация российскими приборостроительными компаниями расширения производства ряда позиций по компьютерным комплектующим исходя из потребности замещения ключевых узлов системообразующих серверов корпоративных (ведомственных) информационных систем и сетей оборудованием российского производства, исключающим возможность дистанционного отключения;

- разработка ведомствами и госкомпаниями планов внедрения технологических решений, обеспечивающих дублирование защищенного хранения наиболее важных баз данных, с учетом возможности отклю-

чения ряда ключевых системообразующих серверов в отношении корпоративных (ведомственных) информационных систем и сетей;

– исследование проблемы зависимости от регулярного обновления используемых в информационных системах российских ведомств и госкомпаний программ иностранного производства с их обязательной связью с серверами иностранного производителя (в том числе ситуаций, когда такое обновление будет невозможно или опасно в связи с возможным содержанием программных «закладок» в обновляемой версии иностранной компьютерной программы);

– разработка ведомствами и госкомпаниями корпоративных стандартов развития ведомственных (корпоративных) информационных сетей, исключаящих возможность подключения к ним из сетей общего пользования.

### **Выводы**

Восстановление плановых основ государственного управления в отношении научно-исследовательских, энергомашиностроительных и электроэнергетических сегментов как элементов интегрированного отраслевого технологического комплекса обеспечит поддержание надежности и безопасности энергоснабжения, в том числе поддержание живучести энергосистемы, для работы в обычных условиях, в условиях чрезвычайных ситуаций и в особый период.

### **Список литературы**

1. *Грабчак, Е. П.* Цифровая трансформация электроэнергетики / Е. П. Грабчак. – Москва : Кнорус, 2018. – 340 с.
2. *Логинов, Е. Л.* Внедрение цифровых платформ для управления сложными техно-организационными системами топливно-энергетического комплекса России: от цифровой энергетики – к цифровой экономике / Е. Л. Логинов. – Москва : ИПР РАН, 2018. – 189 с.
3. *Шкута, А. А.* Развитие интеллектуальных сервисов в автоматизированных информационных системах управления / А. А. Шкута. – Москва : Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, 2018. – 214 с.
4. *Массель, Л. В.* Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики / Л. В. Массель // Энергетическая политика. – 2018. – № 5. – С. 30–42.
5. *Дрожжинов, В. И.* Веб-технологии, искусственный интеллект и когнитивное правительство / В. И. Дрожжинов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13, № 2. – С. 153–169.
6. *Кондратьев, В. В.* Разработка и применение платформы для дистанционной поддержки деятельности сетевой энергокомпании в сфере интеллектуальной энергетики / В. В. Кондратьев, И. В. Любимцев, М. В. Фирсов // Энергия единой сети. – 2014. – № 1 (12). – С. 68–74.

7. Кудинов, И. Ю. Интеллектуальные технологии моделирования и управления многосвязными объектами / И. Ю. Кудинов // Информационные технологии. – 2011. – № S3. – С. 1–32.

8. Снижение рисков каскадных аварий в электроэнергетических системах / отв. ред. Н. И. Воропай ; Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева и др. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011. – 303 с.

9. Лоскутов, А. Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии / А. Б. Лоскутов // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 9–27.

10. Мищеряков, С. В. Цифровая оценка надежности производственной системы субъектов энергетики / С. В. Мищеряков // Надежность и безопасность энергетики. – 2018. Т. 11, № 2. – С. 109–116.

*E. P. Grabchak*, CSc in economics, department head

*E. L. Loginov*, DSc in economics, professor of RAS,

head of the expert and analytical service of the Situation analysis center

E-mail: [evgenloginov@gmail.com](mailto:evgenloginov@gmail.com)

Ministry of Energy of the Russian Federation

## **Management of Research, Energy Machine-Building and Electric Power Companies as Elements of an Integrated Industry Technological Complex**

*The problems of restoring the planned foundations of public administration in relation to research, energy machine building and electric power segments as elements of an integrated industrial technological complex are considered. The formation of the foundations of a systematic organization of the scientific and technological development of the electric power industry is proposed, including key areas of basic research and R&D taking into account the priorities of import substitution. The necessity of developing systemic measures to adapt management information systems in the electric power industry to threats and risks associated with natural and man-made impacts under ordinary conditions, in emergency and other emergency situations is substantiated. The directions of the implementation of measures for the development and implementation of programs for the production of power equipment at Russian enterprises of machine building and instrument making in the medium and long term are formulated.*

**Keywords:** energy, management, import substitution, information systems, digital technologies.

УДК 621.316.11

*А. Е. Фокеев*, канд. техн. наук, доц.

*Н. А. Вяткин*, магистрант

E-mail: [saxsix@yandex.ru](mailto:saxsix@yandex.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Неактивная мощность и способы ее компенсации**

*Работа посвящена определению понятия неактивной мощности и способам ее компенсации. Полностью разобрано понятие неактивной мощности, что она характеризует, из чего складывается, чем определяется, как рассчитывается, какое влияние оказывает на работу приемников и электрической сети в целом, а также рассмотрены способы ее компенсации и возможные технические решения производителей устройств компенсации неактивной мощности.*

**Ключевые слова:** неактивная мощность, компенсация неактивной мощности, высшие гармоники, нелинейность, УКНМ.

### **Введение**

При эксплуатации электрических сетей промышленных предприятий существует необходимость соблюдения требуемого режима электропотребления в части поддержания соотношения потребляемой активной и реактивной мощности. Электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой расходуют из электрической сети ток несинусоидальной формы. В условиях увеличения количества электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой использование понятия реактивной мощности не достаточно для правильного выбора технических решений по обеспечению требуемого режима электропотребления. Определение реактивной мощности на стадии расчета и выбора силового электрооборудования затруднено, необходимо использовать понятие неактивной мощности и параметры, характеризующие форму тока и напряжения в электрической сети.

### **Неактивная мощность**

Неактивную мощность принято обозначать латинской буквой  $N$  – это мощность, которую можно разделить на две составляющие [1]:

– мощность, определяющая взаимодействие гармоник тока и напряжения, изменяющихся синфазно, – реактивная мощность сдвига  $Q_C$ ;

– мощность, определяющая взаимодействие гармоник тока и напряжения, изменяющихся противофазно, – мощность искажения  $Q_{И}$ .

Так как равенство нулю скалярного произведения мощности сдвига и мощности искажения не является очевидным, то используется алгебраическое суммирование:

$$Q_{Н} = Q_{С} + Q_{И}. \quad (1)$$

В соответствии с нормативной технической документацией (стандарт IEEE 1459-2000 «Определения для измерений величин, связанных с электрической мощностью в синусоидальных, несинусоидальных, симметричных и несимметричных условиях») формулу неактивной мощности  $N$  можно записать в следующем виде:

$$N = \sqrt{S_e^2 - P^2}, \quad (2)$$

$$S_e = 3 \cdot U_e \cdot I_e, \quad (3)$$

где  $S_e$  – эффективная полная мощность, ВА;  $P$  – активная мощность, Вт;  $U_e$  – эффективное напряжение, В;  $I_e$  – эффективный ток трехфазной цепи, А.

Следует отметить, что выражение (1) описывает влияние мощности сдвига – реактивной мощности и мощности искажений – в сети с несинусоидальным режимом работы. Таким образом, значение неактивной мощности можно вычислить по формуле

$$N = \sqrt{Q^2 + D^2}, \quad (4)$$

где  $Q$  – реактивная мощность, ВАр;  $D$  – мощность искажений, ВА.

Полученное выражение соответствует теории Буденау [2]. Данная теория гласит, что полную мощность можно разложить на активную, реактивную мощности и мощность искажений, что выражается следующей формулой:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2. \quad (5)$$

Геометрическая интерпретация данной формулы представлена на рис. 1.

Таким образом, в полной мощности присутствует мощность потерь, которая не участвует в процессе обмена электроэнергией между источником и приёмником в течение периода времени, что обусловлено отчасти присутствием активной составляющей полной мощности и выражается в значении мощности искажения.

Для возможности проведения визуального анализа связь между составляющими полной мощности представлена в трёхмерном пространстве с осями, обозначающими чистую активную, чистую реактивную мощность и мощность нелинейных искажений,  $S_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$  соответственно.

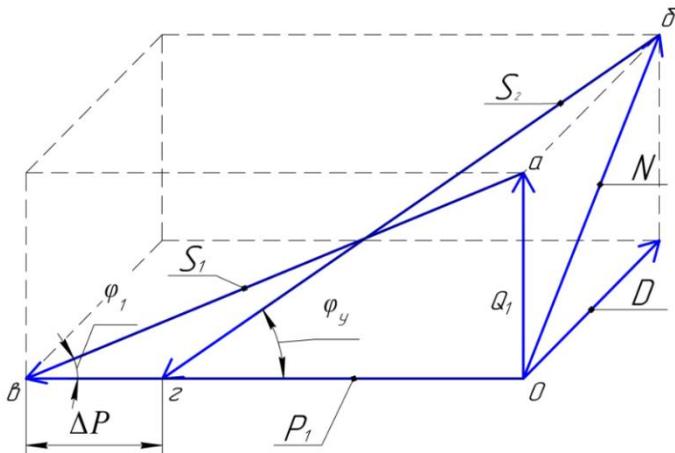


Рис. 1. Графическая интерпретация составляющих полной мощности

На рисунке можно наглядно наблюдать треугольники мощности, отражающие взаимосвязь между составляющими полной мощности при синусоидальном напряжении (треугольник мощности  $Oab$ , который характеризует параметры основной гармоники ( $S_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ )), и несинусоидальном напряжении (треугольник мощности  $Obg$  ( $S_2$ ,  $P_1 - \Delta P$ ,  $N$ )). Данные треугольники построены только при условии, что полные мощности, которые расходуются в фазе сети при синусоидальном и несинусоидальном напряжениях, равны между собой ( $S_1 = S_2$ ).

Из этого следует, что увеличение полной мощности при нелинейной нагрузке в цепи происходит за счет мощности нелинейных искажений тока и напряжения, которая не принимает участия в совершении работы. Отсюда полная (кажущаяся) мощность определяется по формуле

$$S^2 = (UI)^2 = S_I^2 + S_N^2, \quad (6)$$

где  $U$  и  $I$  – действующие значения напряжения и тока в сети;  $S_I$  и  $S_N$  – мощности гармоник основной частоты и неосновных гармоник.

Мощность гармоник основной частоты определяется как

$$S_1 = (U_1 I_1)^2, \quad (7)$$

где  $U_1$  и  $I_1$  – значения напряжения и тока основной гармоники в сети.

Мощность неосновных гармоник частоты состоит из трех компонентов гармоник искажений и определяется следующим образом:

$$S_N = D_I^2 + D_U^2 + S_i^2 = (U_I I_I)^2 + (U_i I_i)^2, \quad (8)$$

где  $D_I$  – токовые искажения мощности;  $D_U$  – искажения мощности, вызванные искажениями напряжения;  $S_N$  – полная мощность высокочастотных гармоник.

### Параметры, характеризующие форму тока и напряжения

Приведенные выше составляющие неактивной мощности не имеют четкой физико-математической интерпретации, которая бы описывала их воздействия на силовое электрооборудование. Значение полной мощности, определяемое по выражению (3), не отражает реальное тепловое воздействие электрической нагрузки на токоведущие части. Поэтому необходимо использовать параметры, характеризующие форму тока и напряжения в электрической сети.

Для оценки уровня гармоник в электрической цепи используют показатель, который называется фактором гармоник, который определяется по формуле

$$K_Y = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (Y_n)^2}}{Y_1}. \quad (9)$$

Данное выражение согласуется со стандартом МЭК 61000-2-2. Также существуют общие коэффициенты гармонических искажений по напряжению и по току, которые определяются из выражений:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (U_n)^2}}{U_1}, \quad (10)$$

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (I_n)^2}}{I_1}. \quad (11)$$

С каждым годом прирост количества нелинейных потребителей и, соответственно, увеличение их совокупной мощности отрицательным образом сказывается на качестве электрической энергии, что также приводит к возрастанию потерь активной мощности в элементах электрической сети. Впоследствии это приводит к уменьшению уровня напряжения в распределительных сетях, что оказывает дополнительную нагрузку на линии электропередач и силовые трансформаторы посредством потоков реактивной мощности. Нелинейные искажения тока в цепи также оказывают негативное влияние [3], которое проявляется в нарушении соразмерности мгновенных значений напряжения и силы тока, что вызвано нелинейностью нагрузки. Данное явление имеет место быть в случае, когда в качестве потребителей реактивной мощности выступают: асинхронные двигатели, трансформаторы, силовое электрооборудование с тиристорным управлением, выпрямители, инверторы, дуговые и индукционные электропечи, газоразрядные лампы, сварочное оборудование, преобразователи частоты, бытовые электрические приборы (компьютеры, телевизоры, микроволновые печи и прочие, имеющие в своей конструкции импульсные блоки питания).

Нарушение линейности нагрузки приводит к появлению следующих негативных последствий:

1. Нарушение целостности нулевого рабочего проводника и кабельной линии ввиду перегрузки токами, кратной трем.
2. Дополнительные потери в трансформаторах.
3. Ухудшение работы батарей конденсаторов.
4. Уменьшение срока службы электрооборудования, изоляции проводов и кабелей ввиду протекания интенсивного теплового и электрического старения изоляции.
5. Возникновение ложного срабатывания предохранителей и автоматов вследствие нагрева внутренних элементов.
6. Возникновение помех в сетях связи и телекоммуникаций, расположенных вблизи силовых кабелей.

### **Компенсация неактивной мощности**

Решая вопрос компенсации неактивной мощности, следует отметить самые эффективные устройства в текущий момент времени. К таким относятся средства управления реактивной мощностью и средства активной фильтрации [4], приведенные устройства компенсации принято называть сокращенно УКНМ. Успешное решение этой задачи обусловлено тенденциями развития силовой электроники, а именно разработкой приборов, которые обладают достаточной мощностью и быстродействием, а также могут работать в ключевом режиме. К подобным устрой-

ствам относятся управляемые источники реактивной мощности. Задачей данных приборов является компенсация энергии не только емкостного характера, но также и индуктивного, в настоящее время они широко известны как устройства компенсации реактивной мощности с фильтром (УКРМФ). Также данные устройства могут применяться в трехфазных системах электроснабжения для устранения перекоса фазных нагрузок напряжения и тока. Используя данные устройства, можно создавать активные фильтры гармоник (АФГ) и пассивные фильтры гармоник (ПФГ), имеющие общее или отдельное схмотехническое и конструктивное исполнение.

При выборе концепции технического решения производители данных устройств помимо коэффициентов гармонических искажений по напряжению и току, соответственно  $K_U$  и  $K_I$ , руководствуются таким параметром, как «коэффициент гармоник»:

$$N_{\text{нн}} = \frac{S_{\text{нн}}}{S_{\text{тр}}}, \quad (15)$$

где  $S_{\text{нн}}$  – взвешенная сумма мощностей генераторов гармоник, подключенных к вторичной обмотке силового трансформатора;  $S_{\text{тр}}$  – номинальная мощность силового трансформатора.

Выбор производителями технического решения по параметру коэффициента гармоник  $N_{\text{нн}}$  предполагает предварительную укрупненную оценку доли полной мощности нелинейных потребителей по отношению к мощности силового трансформатора. Следовательно, выбор технического средства для компенсации неактивной мощности производится по критерию уровня мощности токовых искажений. Суть данного подхода заключается в идентификации объектов, уровень высших гармонических составляющих тока которых значителен и при заданной мощности силового трансформатора может привести к возникновению резонансных явлений в контуре силовой трансформатор – УКРМ. Производится идентификация объектов, для которых невозможно применение УКРМ или УКРМФ, таким образом, требуется фильтрация гармонических составляющих посредством ПФГ или АФГ.

ПФГ – согласованные фильтры (рис. 2, в), рассчитанные на компенсацию определенной гармонической составляющей, используются для повышения качества электрической энергии посредством фильтрации гармонических составляющих. Соответственно, для расчета резонансной частоты ПФГ необходимо знать номер гармонической составляющей тока, для которой будет выполняться компенсация.

АФГ – активные фильтры гармоник, используются для компенсации гармонических составляющих тока, путем формирования необходимого спектра гармоник, находящихся в противофазе с гармоническими составляющими тока нагрузки. Применение АФГ возможно в двух вариантах: как для повышения качества электрической энергии (рис. 2, з), так и обеспечения условий работы УКРМФ (рис. 2, д). Для выбора АФГ по номинальному току необходимо определить среднеквадратичное значение тока высших гармонических составляющих в электрической сети:

$$I_{\text{АФГ}} = \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}, \quad (16)$$

где  $I_h$  – действующее значение тока  $h$ -й гармоники.

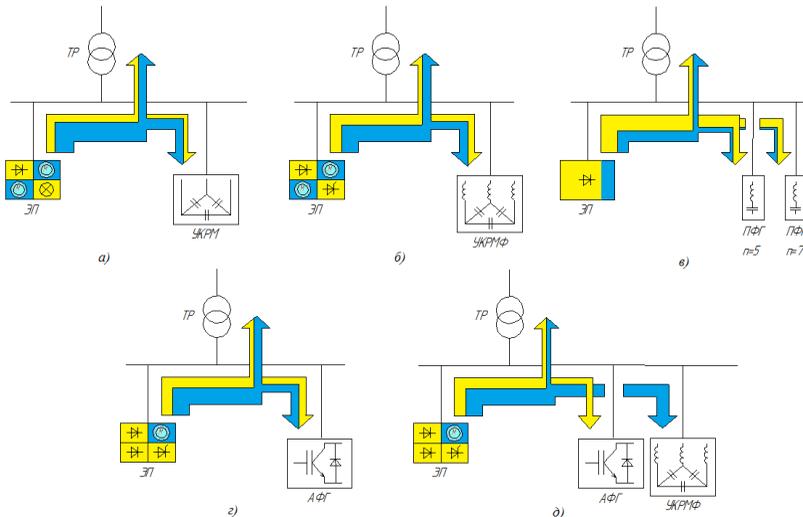


Рис. 2. Распределение потоков неактивной мощности (синий цвет) и токов высших гармоник (желтый цвет) при различных способах компенсации: УКРМ (а); УКРМФ (б); ПФГ (в); АФГ (з); АФГ + УКРМ (д)

Несмотря на увеличение доли гармонических составляющих в сети электрической нагрузки, для современных предприятий по-прежнему остается актуальным применение классического способа компенсации реактивной мощности путем использования УКРМ (рис. 2, а) при усло-

вии соблюдения мер по обеспечению номинального срока службы косинусных конденсаторов. Использование в УКРМФ (рис. 2, б) антирезонансных дросселей позволяет снизить негативное влияние на косинусные конденсаторы, тем самым уменьшает воздействие бросков тока при локальных пробоях диэлектрика и импульсных перенапряжениях.

Выбор и проработка технического решения по компенсации неактивной мощности помимо рекомендаций производителей также должны согласовываться с нормативной документацией, особенно в части выбора номиналов напряжений и температурных классов конденсаторов, так как от этого очень сильно зависит то, как долго и насколько эффективно будет работать конденсаторная установка в составе УКНМ, насколько рациональными и целесообразными будут капиталовложения в данное приобретение.

В Правилах устройства электроустановок [5] (гл. 5.6 «Конденсаторные установки», п. 5.6.9) указано, что конденсаторные батареи рассчитанные на значения номинального напряжения 10 кВ и ниже, должны набираться конденсаторами номиналом, равным номинальному напряжению сети. Длительная перегрузка единичных конденсаторов по напряжению при условии неперевышения порога в 110 % от номинального значения считается допустимой.

Также ГОСТ 27389–87 [6], в особенности п. 2.2, регламентирует, что конденсаторные установки должны выдерживать перегрузки по напряжению, вызванные скачком напряжения либо высшими гармониками, либо и тем и другим явлением в совокупности, в диапазонах изменения до 1,1 номинального значения и до 1,3 действующего значения, отсчитывая от тока, протекающего при номинальном напряжении и номинальной частоте.

Также и в ГОСТ 56744–2015 (МЭК 61921:2003) [7], в п. 5.1, прописано, что эксплуатация конденсаторных установок должна производиться при определенных условиях, то есть при определенной температуре, токе и напряжении, которые могут нарушаться в случае аварийных режимов работы сети.

Пункты 5.2 и 5.3.5 уточняют, что выбор компонентов конденсаторных батарей должен быть выполнен с учетом температурного класса компонентов и самой сборки, а номинал напряжения должен быть как минимум равен подводимому к конденсатору напряжению. Это вызвано тем, что в определенных сетях между подводимым и номинальным напряжением может существовать значительная разница, что имеет немаловажное значение, так как срок службы и дальнейшее качество работы конденсаторных установок стоит под угрозой ввиду негативного влияния увеличенного значения напряжения на конденсаторном диэлектрике.

Пунктом 5.3.5 предусмотрен вариант последовательного включения элементов цепи с конденсатором в качестве средства уменьшения действия эффектов высших гармоник. У данного способа также существует и негативная сторона, как следствие, последовательное включение сопровождается ростом напряжения на зажимах конденсатора свыше допустимого напряжения сети, что приводит к необходимости завышения номинала напряжения конденсатора.

В свою очередь, рассматривая вариант параллельного соединения элементов, следует отметить недостаток, выражающийся в увеличенном значении напряжения в промежутке от источника до точки подключения конденсаторов, что вызвано наличием в цепи высших гармоник. Благодаря данному явлению конденсаторы могут работать при более высоком значении напряжения, по сравнению с тем, которое поступает от источника изначально.

В п. 5.4.1.1, приведены рекомендации по уменьшению действия высших гармоник на конденсаторные установки, с целью предотвращения сокращения сроков службы, путем подключения дросселя последовательно с каждой ступенью конденсатора.

В соответствии с вышеперечисленными указаниями из нормативной документации при выборе конденсаторов необходимо завышать номиналы по напряжению, а также необходимо учитывать влияние высших гармоник и применять соответствующие технические решения с целью предотвращения преждевременного выхода из строя и правильного функционирования оборудования.

## **Выводы**

1. Определено понятие неактивной мощности как суммы мощностей сдвига и реактивной мощности, рассмотрена геометрическая интерпретация полной мощности в соответствии с теорией Буденау.

2. Приведены показатели, по которым оценивается влияние наличия нелинейных потребителей и, как следствие, нелинейных искажений на электрическую сеть, а также рассмотрены негативные последствия и эффективные средства по решению задач компенсации.

3. Рассмотрены критерии, которыми руководствуются производители при выборе и проработке технического решения по компенсации неактивной мощности, в частности при выборе УКРМ и УКРМФ.

4. Обоснована необходимость использования понятия неактивной мощности и параметров, характеризующих форму тока и напряжения в электрической сети.

## Список литературы

1. Шпота, А. А. Неактивная мощность в электроэнергетических системах / А. А. Шпота, Д. В. Орлов, Р. А. Набиуллин // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по материалам XLV Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2015. – № 4 (41). – С. 65–71.
2. Сулейманов, А. О. Неактивная мощность и ее составляющие в электроэнергетических системах : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Сулейманов Алмаз Омурзакович. – Томск, 2009. – 135 с. – РГБ ОД, 61 10-5/391.
3. Мощность искажения как технологическая составляющая технологической нормы расхода электроэнергии при передаче по сетям общего назначения / Ю. М. Денчик, В. С. Сальников, М. Н. Иванов, А. В. Гноевой // Сборник научных трудов. Вып. 11 / сост. В. В. Калекин. – Омск : ОИВТ (филиал) ФБОУ ВПО «НГАВТ», 2013. – ISBN 978-5-8119-0522-5.
4. Вагин, Г. Я. Повышение качества электрической энергии и компенсация реактивной мощности на металлургических предприятиях с дуговыми печами / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов, С. Н. Юртаев // Главный энергетик. – 2017. – № 2. – С. 43–48.
5. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 1999–2005.
6. ГОСТ 27389–1987. Установки конденсаторные для компенсации реактивной мощности. Термины и определения. Общие технические требования. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-27389-87> (дата обращения: 24.06.2020).
7. ГОСТ Р 56744–2015 (МЭК 61921:2003) Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные низковольтные для повышения коэффициента мощности. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200127200> (дата обращения: 24.06.2020).

*A. E. Fokeev*, CSc in engineering, associate professor

*N. A. Vyatkin*, magister student

E-mail: [saxsix@yandex.ru](mailto:saxsix@yandex.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## Inactive Power and Methods of Its Compensation

*The work is devoted to the definition of the concept of inactive power and methods of its compensation. The concept of inactive power has been fully analyzed, what it characterizes, what it consists of, how it is determined, how it is calculated, what effect it has on the operation of the receivers and the electrical network as a whole, and also considers the methods of its compensation and possible technical solutions of manufacturers of devices for compensating inactive power.*

**Keywords:** inactive power, inactive power compensation, higher harmonics, non-linearity, UKNM.

УДК 621.314.21

*А. Е. Фокеев*, канд. техн. наук, доц.

*И. Н. Тумаков*, магистрант

E-mail: [tumakov.work@mail.ru](mailto:tumakov.work@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Анализ применимости методов определения допустимой нагрузки для выбора мощности силовых трансформаторов для проектирования систем электроснабжения**

*Работа посвящена анализу применимости методов определения допустимой нагрузки силовых трансформаторов для выбора их номинальной мощности при проектировании систем электроснабжения. Приведены основные аспекты определения допустимой нагрузки силовых трансформаторов для экспериментальных и эмпирических методов. Определен метод, наиболее подходящий для определения коэффициента снижения допустимой нагрузки силовых трансформаторов на этапе проектирования систем электроснабжения при использовании минимального количества исходных данных.*

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, высшие гармонические составляющие, нелинейная нагрузка, снижение срока службы, допустимая нагрузка.

### **Введение**

Задача инженера-проектировщика на стадии проектирования системы электроснабжения сводится к выбору оптимальных параметров силового электрооборудования и токоведущих частей, которые обеспечат требуемый режим электроснабжения. Выбор производится по результатам расчета параметров электрической нагрузки, определяющих тепловое воздействие (нагрев) на силовое электрооборудование и токоведущие части. В случае превышения допустимых значений температуры нагрева возможны выход оборудования из строя и нарушение нормального режима электроснабжения.

Развитие современных технологий определяет увеличение количества высокотехнологического оборудования и электронных устройств, имеющих несинусоидальный характер электропотребления. Силовой трансформатор является устройством с сосредоточенными параметрами, для которого влияние высших гармонических составляющих тока проявляется в виде дополнительных потерь активной мощности и нагрева обмоток, магнитопровода и элементов конструкции [1, 2].

Для правильного выбора силовых трансформаторов необходимо учитывать влияние нелинейной нагрузки – выбор мощности должен осуществляться с использованием коэффициента снижения допустимой нагрузки. При этом объем исходных данных для расчета коэффициента должен быть минимальным, а значение инженерной ошибки расчета не должно приводить к необоснованному увеличению капитальных затрат.

### Экспериментальные методы

Метод косвенного измерения потерь в силовом трансформаторе [3] предполагает перерасчет предельно допустимой нагрузки силового трансформатора по выражению:

$$I_{\text{MAX}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot K_3^2}{\Delta P_{\text{КЗ}}^{\text{НЕСИН}}}}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\text{КЗ}}$  – номинальное значение потерь короткого замыкания силового трансформатора;  $K_3$  – коэффициент загрузки силового трансформатора;  $\Delta P_{\text{КЗ}}^{\text{НЕСИН}}$  – значение потерь короткого замыкания силового трансформатора для рассматриваемого несинусоидального режима.

Определение потерь короткого замыкания несинусоидального осуществляется с использованием мгновенных значений токов и напряжений первичной и вторичной обмотки силового трансформатора с использованием выражения:

$$\Delta P_{\text{КЗ}}^{\text{НЕСИН}} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{i_a' (u_{AC} - u_{ac}') + i_b' (u_{BC} - u_{bc}')}{\Delta P_{\text{КЗ}}} \right) dt, \quad (2)$$

где  $i_a'$ ,  $i_b'$ ,  $u_{ac}'$ ,  $u_{bc}'$  – мгновенные значения фазных токов и линейных напряжений во вторичной обмотке трансформатора;  $u_{AC}$ ,  $u_{BC}$  – мгновенное значение линейного напряжения первичной обмотки;  $T$  – период;  $t$  – время.

Измерение мгновенных значений токов и напряжений производится в первичной и вторичной обмотке силового трансформатора. Обработка результатов измерений и вычисления производятся посредством специализированного программного обеспечения.

Необходимо отметить, что суммарные потери в трансформаторе (потери в стали, потери в обмотках и потери в элементах конструкции) составляют примерно 1–2 % номинальной мощности. Для корректного определения потерь, обеспечивающего точность последующей оценки

допустимой нагрузки, потребуется применение высокоточного измерительного оборудования.

Метод измерения частотной характеристики [4] обмоток силового трансформатора предполагает перерасчет предельно допустимой нагрузки силового трансформатора по выражению:

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{\Delta P_{КЗ} \cdot K_3^2}{\sum_h I_h^2 R_{\Sigma hABC}}}, \quad (3)$$

где  $R_{\Sigma hABC}$  – суммарное эквивалентное входное сопротивление фаз трансформатора для  $h$ -й гармоники.

Принцип определения  $R_{\Sigma hABC}$  основан на экспериментальном определении частотной характеристики трансформатора путем подачи в обмотку низкого напряжения измерительной помехи. Генерация помехи и обработка сигнала реакции трансформатора на помеху производится с использованием специального измерительного комплекса. Выражение для расчета нагрузочных потерь силового трансформатора преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta P_{НАГР} &= \Delta P_R + \Delta P_{вих} + \Delta P_{пр} = \\ &= \sum_h I_h^2 (R_{DC} + R_{вих} \cdot h^2 + R_{пр} \cdot h^{0,8}) = \\ &= \sum_h I_h^2 \cdot R_{\Sigma h}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta P_R$  – резистивные потери в обмотках;  $\Delta P_{вих}$  – потери от вихревых токов в обмотках;  $\Delta P_{пр}$  – прочие потери от вихревых токов в элементах конструкции трансформатора;  $I_h$  – действующее значение тока  $h$ -й гармоники;  $R_{DC}$  – активное сопротивление обмотки на постоянном токе;  $R_{пр}$  и  $R_{вих}$  – эквивалентные сопротивления потерь от вихревых в конструкции и в обмотках трансформатора;  $R_{\Sigma h}$  – входное эквивалентное сопротивление  $h$ -й гармоники.

Необходимо отметить, что на результаты измерения частотной характеристики трансформатора в значительной степени будут влиять конструктивные особенности. Кроме того, выполнение такого рода измерений необходимо для всей номенклатуры трансформаторов, используемых в системах электроснабжения.

### Эмпирические методы

В настоящее время существует несколько эмпирических методов, которые учитывают наличие высших гармонических составляющих тока при определении допустимого тока силового трансформатора.

Метод 1 (рекомендован стандартом IEEE 619-P619AD5-1996 «Guide for Applying Harmonics Limits») предполагает грубую оценку полной мощности силового трансформатора, питающего нелинейную нагрузку, в зависимости от доли нелинейной нагрузки (рис. 1).

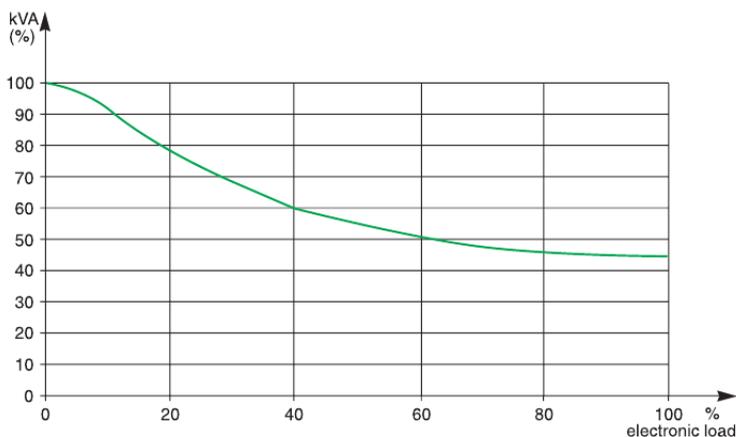


Рис. 1. Зависимость допустимой нагрузки силового трансформатора  $S_{\text{Тр.д}}$  от доли полной мощности нелинейной нагрузки  $N_{\text{НН}}$

Стоит отметить, что в данном случае речь идет о полной мощности одного трансформатора. В случае если предполагается работа трансформаторов в режиме «горячего резервирования», шкала мощности должна рассматриваться с учетом доли ответственных потребителей электрической энергии. Кроме того, зависимость  $S_{\text{Тр.д}} = f(N_{\text{НН}})$  на рис. 1 не предполагает различий для нелинейной нагрузки, для которой форма тока и гармонический состав могут различаться.

Метод 2 (рекомендован стандартом ANSI C57.110-2008 «IEEE Recommended Practice For Establishing Liquid-Filled And Dry-Type Power And Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents») применяется в Соединенных Штатах Америки и Европе и основан на использовании понятия  $K$ -фактора:

$$K = \sum_h \left( \frac{I_h}{I} \right)^2 \cdot h^2, \quad (5)$$

где  $h$  – порядковый номер гармоники;  $I_h$  – действующее значение  $h$ -й гармоники тока нагрузки;  $I$  – среднеквадратичное значение полного тока нагрузки.

По своей сути  $K$ -фактор является мерой способности трансформатора выдерживать тепловые эффекты гармонических токов, порождаемых многими видами современного электронного оборудования и некоторым электрическим оборудованием. Значения коэффициента снижения допустимой нагрузки  $K_{\text{СДН}}$  силового трансформатора в зависимости от принятого  $K$ -фактора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значение  $K_{\text{СДН}}$  в зависимости от  $K$ -фактора

$K$ -фактор	$K_{\text{СДН}}$
4	0,886
9	0,761
13	0,692
20	0,606
30	0,524
40	0,469
50	0,428

Нужно обратить внимание, что чисто линейная нагрузка, которая потребляет синусоидальный ток, будет иметь  $K$ -фактор, равный единице. При нормальных условиях значение коэффициента  $K$ -фактора колеблется от 1 до 50. Значения  $K$ -фактора выше единицы указывают, что потери на вихревые токи в элементах трансформатора будут в  $K$  раз больше значений на основной частоте.

Метод 3 (приведен в C57.110-2018 – IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents) основан на использовании следующих выражений:

$$I_{\text{MAX}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{КЗ}}^*}{1 + F_{\text{HL}} \cdot \Delta P_{\text{вих.о}}^* \text{макс}}} = \sqrt{\frac{1 + \Delta P_{\text{вих.о}}^* \text{макс}}{1 + F_{\text{HL}} \cdot \Delta P_{\text{вих.о}}^* \text{макс}}}, \quad (6)$$

$$F_{HL} = \frac{\Delta P_{\text{вих}}^{\text{НЕСИН}}}{\Delta P_{\text{вих.о}}} = \frac{\sum_h I_h^2 \cdot h^2}{\sum_h I_h^2}, \quad (7)$$

где  $F_{HL}$  – коэффициент гармонических потерь, зависящий от воздействия вихревых токов;  $\Delta P_{\text{вих.о}}$ ,  $\Delta P_{\text{вих}}^{\text{НЕСИН}}$  – потери от вихревых токов в обмотках соответственно в синусоидальном и несинусоидальном режимах;  $\Delta P_{\text{вих.о}}^{\text{макс}}$  – максимальные потери от вихревых токов в обмотке в синусоидальном режиме в базисных единицах.

Отметим, что для реализации метода 3 требуется знать значения потерь в отдельных элементах трансформатора, в том числе потерь на вихревые токи. В паспорте на силовой трансформатор, как правило, приводятся только значения потерь холостого хода и короткого замыкания.

Метод 4 (рекомендован стандартом UTE C-15-112 «Effects of current on human beings and livestock») предполагает расчет коэффициента снижения допустимой нагрузки силового трансформатора по выражению

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \left( \sum_{h=2}^{40} h^{1,6} \cdot \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right)}}, \quad (8)$$

где  $h$  – порядок гармонической составляющей тока;  $I_1$  – действующее значение первой гармонической составляющей тока нагрузки, А;  $I_h$  – действующее значение гармонической составляющей тока нагрузки, А.

Выражение (8) является универсальным для различных типов и конструкций силовых трансформаторов и учитывает рост температуры наиболее нагретой точки обмотки в результате воздействия высших гармонических составляющих.

### Сравнительный анализ методов

В работе [4] выполнено сравнение результатов определения допустимого тока силового трансформатора с использованием экспериментальных методов и эмпирического метода 3. Экспериментальные методы: измерения частотной характеристики сопротивления обмоток и косвенного измерения потерь, отличающиеся меньшей степенью абстракции при определении потерь, позволили определить допустимый ток трансформатора более точно. При одинаковых исходных данных силового трансформатора значение допустимого тока, рассчитанного по

экспериментальным методам, составило 79 и 83 % номинального тока, а при расчете по нормативному методу 3 составило 58 % номинального тока.

В табл. 2 приведены сравнительные результаты, полученные с использованием одних и тех же исходных данных для всех рассматриваемых методов. Результаты исследования [4] дополнены результатами расчета допустимого тока силового трансформатора с использованием эмпирических методов 1, 2 и 4.

**Таблица 2. Результаты, полученные при использовании различных методов**

Наименование метода	Параметр	Значение	$I_{MAX}$ , % от $I_{НОМ}$
Метод косвенного измерения потерь	$\Delta P_{KЗ}^{НЕСИН}$ , Вт	55,2	79
Метод измерения ЧХ трансформатора	$\sum I_n^2 R_{\Sigma \text{УЛВС}}$ , Вт	50	83
Эмпирический метод 1	$N_{НН.ТР}$ , %	75	46
Эмпирический метод 2	$K$ -фактор	10,5	$\approx 73,5$
Эмпирический метод 3	$F_{НЛ}$	10,53	58
Эмпирический метод 4	$k$	0,774	77,4

Результаты, получаемые посредством эмпирических методов 1 и 2, представляют собой очень грубую оценку допустимого тока силового трансформатора, выполняемую без учета фактического гармонического состава тока нагрузки. Значения допустимого тока трансформатора составляют 46 % и 73,5 % соответственно.

Применение эмпирического метода 4 для расчета допустимого тока силового трансформатора позволило получить значение 77,4 % номинального тока. Таким образом, метод 4 при использовании минимального количества исходных данных и отсутствии необходимости выполнения измерений позволяет выполнить оценку допустимой загрузки силового трансформатора с получением результата, наиболее приближенного к результатам экспериментальных методов.

## Выводы

1. Экспериментальные методы оценки, несмотря на высокую достоверность получаемых результатов, не применимы для выполнения расчетов на стадии проектирования систем электроснабжения.

2. Экспериментальные методы могут быть использованы для создания математических моделей силовых трансформаторов различной кон-

струкции с целью использования параметров этих моделей для дополнения эмпирических методов оценки.

3. Эмпирический метод оценки допустимой нагрузки силового трансформатора, рекомендованный стандартом UTE C-15-112, является оптимальным с точки зрения объема используемых исходных данных.

### Список литературы

1. Dao, T. Voltage harmonic effect on losses in distribution transformers / T. Dao, H. A. Halim, Z. Liu, B. T. Phung // International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS) (Bali, Indonesia, 6-8 Oct. 2016), pp. 27-32. DOI: [10.1109/ICSGTEIS.2016.7885761](https://doi.org/10.1109/ICSGTEIS.2016.7885761).

2. Singh, J. Effect of harmonics on distribution transformer losses and capacity / J. Singh., S. Singh, A. Singh // International Journal of Engineering Technology Science and Research. 2017. Vol. 4. Issue 6. Pp. 48-55.

3. Fuchs, E. F. Measurement of three-phase transformer derating and reactive power demand under nonlinear loading conditions / E. F. Fuchs, D. Lin, J. Martynaitis // IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 21. No. 2. Pp. 665-672. DOI: [10.1109/TPWRD.2005.858744](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.858744).

4. Янченко, С. А. Анализ методов разгрузки трансформаторов в сетях с высоким уровнем несинусоидальности тока / С. А. Янченко, С. А. Цырук, А. И. Куликов // Промышленная энергетика. – 2017. – № 7. – С. 44–53.

A. E. Fokeev, CSc in engineering, associate professor

I. N. Tumakov, magister student

E-mail: [tumakov.work@mail.ru](mailto:tumakov.work@mail.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## Analysis of the Applicability of Methods for Determining the Permissible Load for Choosing the Power of Power Transformers for the Design of Power Supply Systems

*The work is devoted to the analysis of the applicability of methods for determining the permissible load of power transformers for the selection of their rated power in the design of power supply systems. The main aspects of determining the permissible load of power transformers for experimental and empirical methods are presented. The most suitable method for determining the coefficient of reducing the permissible load of power transformers at the design stage of power supply systems, using the minimum amount of initial data, has been determined.*

**Keywords:** power transformer, harmonic components, non-linear load, degradation of service life, load capacity.

УДК 621.314.04

*А. А. Штин*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: [shtin\\_a\\_a@mail.ru](mailto:shtin_a_a@mail.ru)

*Р. З. Ахатов*, магистрант

E-mail: [ramis.ahatov@gmail.com](mailto:ramis.ahatov@gmail.com)

Кафедра «Электротехника»

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Моделирование генератора синусоидальных сигналов на микроконтроллере PIC16F84A в Multisim**

В докладе рассматривается схема генератора синусоидальных сигналов на микроконтроллере PIC16F84A, в качестве цифро-аналогового преобразователя используется резистивная матрица R-2R. Создан текст программы на языке ассемблера для микроконтроллера. Данная схема предназначена для использования в лабораторных работах по электротехническим дисциплинам.

**Ключевые слова:** генератор сигналов, моделирование, микроконтроллеры, Microchip, MCU, ассемблер.

### **Введение**

При разработке любого электронного устройства может быть использовано моделирование как физическое, так и математическое. Физическое моделирование часто связано с большими материальными затратами, поскольку требует изготовления макетов и их трудоемкого исследования на дорогостоящем оборудовании. В таких случаях в основном используют математическое моделирование при помощи средств и методов вычислительной техники [1].

На кафедре «Электротехника» имеется лицензионное программное обеспечение компании National Instruments (NI), включающее в себя среду проектирования Multisim. Она позволяет моделировать не только аналоговые схемы, но и цифровые. Также Multisim позволяет моделировать 8-разрядные микроконтроллеры с ядром MCS-51 и PIC-16 компании Microchip, и в составе программы имеются компиляторы с языка C и ассемблера указанных выше микроконтроллеров [2].

### **Сведения из теории**

Цифроаналоговый преобразователь представляет собой резистивную матрицу R-2R, принцип работы которой основан на свойстве резистив-

ного делителя сохранять постоянное сопротивление нагрузки для источника опорного напряжения при подаче питания. Вследствие этого на выводах резистора R, начиная со старшего разряда  $n - 1$ , опорное напряжение последовательно делится пополам. При этом напряжение на выходе преобразователя с матрицей R-2R для  $n$ -битного будет

$$U_{\text{вых}} = U_{VDD} * \sum \left( A_i * \frac{1}{2}^{n-1} \right), \quad (1)$$

где  $U_{VDD}$  – опорное напряжение;  $i$  – номер разряда ( $i = 0, 1, 2 \dots n - 1$ );  $A_i$  – разрядный коэффициент, который может принимать значения 0 или 1 [3].

### Описание эксперимента

Схема устройства генератора синусоидальных сигналов основана на цифроаналоговом преобразователе, который управляется с помощью микроконтроллера PIC16F84A (рис. 1).

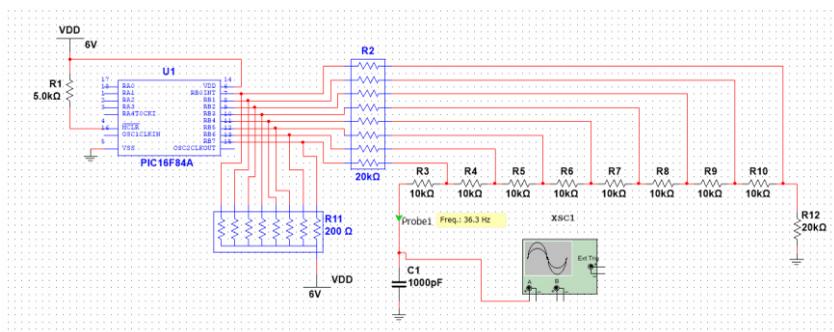


Рис. 1. Схема генератора синусоидального сигнала

Схема состоит из микроконтроллера U1 (PIC16F84A), сборки резисторов R2 и с R3 по R10 образуют матрицу преобразователя R-2R. Сборка резисторов R11 подтягивает контакты микроконтроллера к питанию VDD. Напряжения питания всей схемы VDD 6 В [4].

Текст программы составлен с использованием языка ассемблера (листинг 1). Также в программе задействована память данных (EEPROM) микроконтроллера, в котором записаны мгновенные значения. В начале программы описан используемый микроконтроллер, его конфигурация и используемые регистры.

Подготовительные моменты касаются определения направлений работы портов. Для порта В необходимо определить направления как вы-

ход изменением регистра TRISB на 0 (0 – выход, 1 – вход), порт А не используется в проекте. Этот регистр находится в первом банке памяти, поэтому необходимо перейти в него, и по умолчанию используется нулевой банк. Переход между банками осуществляется путем изменения бита RP0 в регистре STATUS на 1 (0 – нулевой банк, 1 – первый банк).

В соответствии с поставленной задачей для выводов порта В содержимое EEPROM с текущим адресом READCOUNT помещается в рабочий регистр. Регистр EEADR хранит адрес ячейки, к которой происходит обращение. Далее командой bsf разрешается чтение EEPROM, используя регистр EECON1, который находится в первом банке.

В следующем цикле данные доступны для чтения из регистра EEDATA. Данные сохраняются в этом регистре, пока не будут прочитаны новые. Прочитанные данные из EEDATA записываются в рабочий регистр для вывода значений в PORTB. Далее вызывается Timer для задержки между чтениями данных из EEPROM и уменьшается значение регистра READCOUNT на единицу.

### *Листинг 1. Текст программы генератора синусоидальных сигналов*

```
#include "p16f84a.inc"
Cell          equ    H'0D'
FREQUENCY    equ    H'FF'
READCOUNT   equ    H'0F'
Start        bsf     STATUS, RP0
             clr     TRISB
             bcf     STATUS, RP0
READEEPROM   movf    READCOUNT, 0
             movwf   EEADR
             bsf     STATUS, RP0
             bsf     EECON1, RD
             bcf     STATUS, RP0
             movf    EEDATA, 0
             movwf   PORTB
             call    Timer
             decfsz  READCOUNT, 1
             goto    READEEPROM
             movf    READCOUNT, 0
             movwf   EEADR
             bsf     STATUS, RP0
             bsf     EECON1, RD
             bcf     STATUS, RP0
             movf    EEDATA, 0
             movwf   PORTB
             call    Timer
             movlw   H'3F'
```

Листинг 1 (продолжение).

```

Timer      movwf  READCOUNT
           goto  READEEPROM
           movlw FREQUENCY
           movwf Cell
Loop       nop
           nop
           decfsz Cell, f
           goto  Loop
           return
END

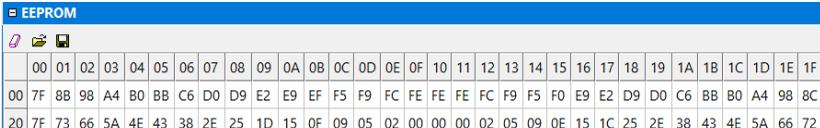
```

Работа схемы основана на считывании кодов, отображающих мгновенные значения, из внутреннего постоянного запоминающего устройства микроконтроллера (EEPROM). Коды передаются в порт В, к выходам которого подключен цифроаналоговый преобразователь. Эти коды должны быть предварительно записаны в EEPROM. Панель для записи в EEPROM открывается в меню MCU – PIC16F84A – Memory View [5].

Для выполнения расчета шестнадцатеричных кодов необходим Excel. Задать столбец от 0 до 63 (например, с ячейки В2), т. к. объем EEPROM 64 байта. Вычислить десятичные значения по формуле (2) [6]:

$$C2 = 127,5 * \sin\left(6,28 * \frac{B2}{64}\right) + 127,5. \quad (2)$$

Минимальное значение кода – 00, максимальное – FF, начальное значение – 80, конечное значение – 73. Полученные коды записываются в EEPROM (рис. 2).



00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1A	1B	1C	1D	1E	1F	
00	7F	8B	98	A4	B0	BB	C6	D0	D9	E2	E9	EF	F5	F9	FC	FE	FE	FC	F9	F5	F0	E9	E2	D9	D0	C6	BB	B0	A4	98	8C	
20	7F	73	66	5A	4E	43	38	2E	25	1D	15	0F	09	05	02	00	00	00	02	05	09	0E	15	1C	25	2E	38	43	4E	5A	66	72

Рис. 2. Значения EEPROM

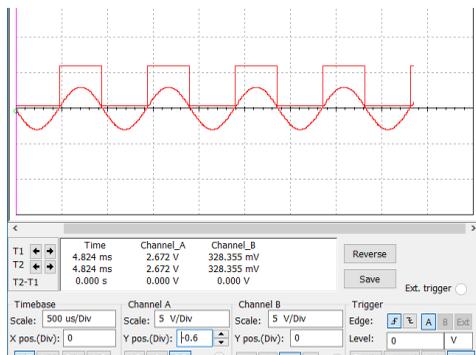


Рис. 3. Осциллограмма выходных сигналов

При включении режима эмуляции на экране XSC1 должна появиться осциллограмма как на рис. 3. Второй канал осциллографа отображает логический уровень старшего разряда D0 [7].

## Выводы

Достоинством предложенного генератора синусоидальных сигналов является низкая стоимость. Это позволяет очень просто перейти от модели *Multisim* к практической реализации устройства. Также полученные результаты планируется использовать на кафедре «Электротехника» в курсах «Электроника» и «Микропроцессоры и системы управления аппаратами на их основе».

## Список литературы

1. Шестеркин, А. Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10 / А. Н. Шестеркин. – Москва : ДМК Пресс, 2012. – 360 с.
2. Штин, А. А. Электротехнические дисциплины в среде моделирования Multisim: лабораторный практикум : учеб. пособие для вузов / А. А. Штин. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – 220 с.
3. Дьяконов, В. П. Современные измерительные генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2011. – 384 с.
4. Штин, А. А. Моделирование аналого-цифровых преобразователей в среде моделирования Multisim : материалы науч. исследований / А. А. Штин // САПР и моделирование в современной электронике : сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. (Брянск, 24–25 окт. 2019 г.). – Брянск : Брянский гос. техн. ун-т, 2019. – С. 332–335.
5. Кохи, Д. Измерение, управление и регулирование с помощью PIC-микроконтроллеров : пер. с нем. / Д. Кохц. – Киев : МК-Пресс, 2007. – 304 с.

6. *Никамин, В. А.* Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи : справочник / В. А. Никамин. – Санкт-Петербург : КОРОНА принт ; Москва : Альтекс-А, 2003. – 224 с.

7. *Безруков, П. Е.* Трехфазный генератор для лабораторных работ / П. Е. Безруков // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 415–418.

A. A. *Shtin*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: [shtin\\_a\\_a@mail.ru](mailto:shtin_a_a@mail.ru)

R. Z. *Akhatov*, master's degree student

E-mail: [ramis.ahatov@gmail.com](mailto:ramis.ahatov@gmail.com)

Department of Electrical Engineering

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Simulation of a Sinusoidal Signal Generator on the PIC16F84A Microcontroller in Multisim**

*The report discusses a circuit of a sinusoidal signal generator based on a PIC16F84A microcontroller, a resistive matrix R-2R is used as a digital-to-analog converter. The text of the program in the assembly language for the microcontroller has been created. This circuit is intended for use in laboratory work in electrical disciplines.*

**Keywords:** signal generator, modeling, microcontrollers, Microchip, MCU, assembler.

## Секция 2. Приборы в промышленности, неразрушающем контроле, здравоохранении и экологии

УДК 620.179.16

А. Ф. Башарова<sup>1</sup>, А. А. Наговицын<sup>1</sup>, аспиранты

О. В. Муравьева<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, проф.

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

<sup>1</sup> Ижевский государственный технический университет имени

М. Т. Калашникова

<sup>2</sup> ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН»

### Методика расчета эффективности ЭМА-преобразователя продольных волн в условиях дополнительного намагничивания током высокочастотного индуктора

*В статье рассматриваются возможности увеличения поля подмагничивания ЭМА-преобразователя продольных волн за счет дополнительного воздействия магнитным полем тока в высокочастотном индукторе. Предложена методика расчета, позволяющая оценить возможности повышения эффективности проходных ЭМА-преобразователей продольных волн для сталей с известными кривыми намагничивания.*

**Ключевые слова:** ультразвук, эффективность электромагнитно-акустического преобразователя, продольная волна, кривая намагничивания.

#### Введение

Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод является одним из перспективных для возбуждения-приема ультразвуковых волн при контроле. В качестве основного достоинства данного метода можно выделить бесконтактность, позволяющую отстроиться от качества обработки поверхности объекта контроля, а также возможность возбуждения и приема любых типов волн [1–6]. Несмотря на преимущества ЭМА-метода, его основным недостатком является низкая эффективность преобразования. Увеличения эффективности ЭМА-преобразования достигаются увеличением поля подмагничивания, в том числе с использова-

нием динамического подмагничивания, увеличением напряжения (тока) зондирующего импульса, применением малошумящих схем приемно-усилительного тракта [7–9]. В случае излучения-приема продольных волн, требующего касательной компоненты поля постоянного подмагничивания, для повышения эффективности ЭМА-преобразования возможно использование дополнительного подмагничивания током высокочастотного индуктора.

Цель работы: разработка методики расчета эффективности проходного ЭМА-преобразователя продольных волн в условиях дополнительного намагничивания током высокочастотного индуктора.

### Используемые подходы

Принцип действия ЭМАП продольных волн в условиях намагничивания полем высокочастотного индуктора показан на рис. 1.

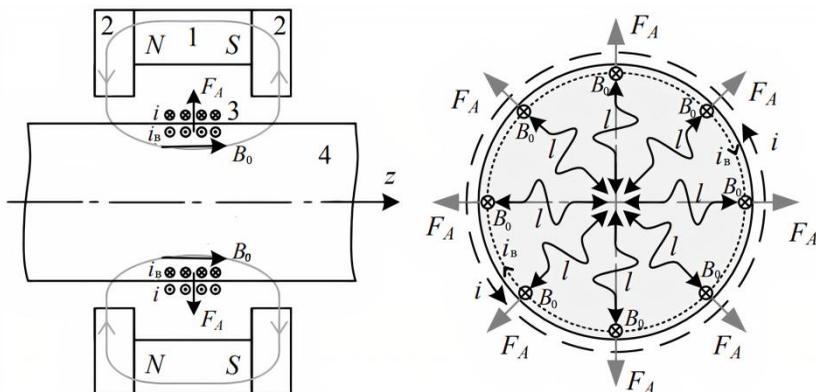


Рис. 1. Принцип действия проходного ЭМАП продольных волн

Проходной ЭМА-преобразователь продольных волн состоит из магнитной системы в виде кольцевого магнита неодим-железо-бор, концентраторов магнитного потока в виде двух ферромагнитных шайб, формирующей постоянное поле подмагничивания  $B_0$  и катушки индуктивности, возбуждающей в объекте контроля вихревые токи, текущие в тонком приповерхностном слое.

Возбуждение акустических волн ЭМА-преобразователем происходит за счет электродинамического эффекта (силы Ампера), определяемого взаимодействием вихревых токов  $i_v$  длиной  $dl$  с индукцией поля подмагничивания  $B_0$  в пределах скин-слоя [10, 11]:

$$F_A = dl \left[ \vec{i}_e \cdot \vec{B}_0 \right]. \quad (1)$$

При ориентации поля подмагничивания  $B_0$  в осевом направлении и вихревых токов  $i_e$  – по периметру цилиндра возможно возбуждение продольных волн во всех радиальных направлениях в поперечном сечении цилиндра.

Прием импульсов, многократно переотраженных по диаметру цилиндра, происходит за счет появления ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  в катушке за счет колебаний приповерхностного слоя объекта со скоростью  $V$  в поле подмагничивания с индукцией  $B_0$  [10,11]:

$$j = \sigma [V \cdot B_0], \quad (2)$$

где  $\sigma$  – электропроводность.

Формируемый магнитным полем высокочастотного индуктора вихревой ток создает собственное магнитное поле  $\Delta H$ , которое при условии синфазного включения смещает точку на кривой намагничивания  $B(H)$  из  $B_0$  в точку  $(B_0 + \Delta B_0)$ , что может привести к повышению эффективности ЭМА-преобразования (рис. 2). Последнее определяется положением точки  $B_0$  на кривой начального намагничивания и величиной поля  $\Delta H$  [12, 13].

Расчет возможности повышения эффективности проходного ЭМА-преобразователя продольных волн проведен для образца из стали 40Х (закалка 860 °С, отпуск 400 °С).

Использован следующий алгоритм расчета:

– На кривой намагничивания  $B(H)$  выбирается точка, которая соответствует значению напряженности внешнего постоянного магнитного поля  $H_0$ .

– В условиях синфазного включения высокочастотного индуктора с амплитудой внешнего импульсного поля  $\Delta H$  определяется прирост магнитной индукции  $\Delta B$  относительно точки  $B_0$ .

– Проводится расчет зависимости прироста магнитной индукции  $\Delta B$  от величины прироста внешнего поля  $\Delta H$  на различных участках кривой намагничивания.

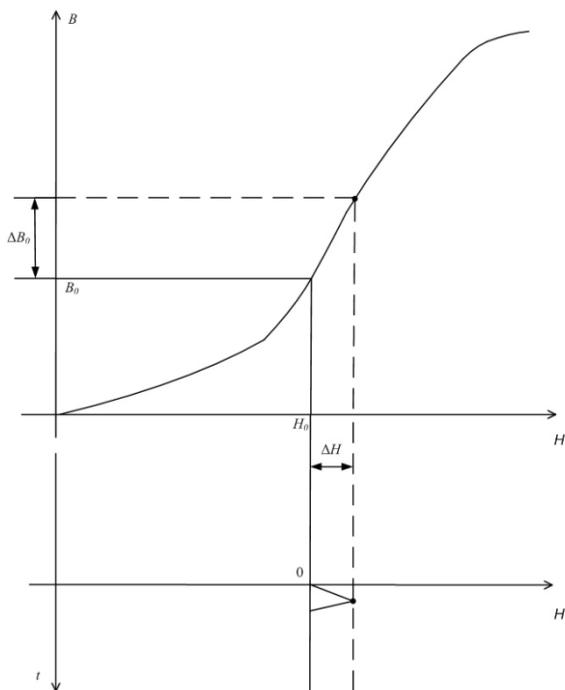


Рис. 2. Зависимость приращения индукции  $\Delta B$  от прироста внешнего поля  $\Delta H$  за счет дополнительного намагничивания

### Результаты и их обсуждение

Зависимость величины прироста магнитной индукции  $\Delta B$  от положения точки постоянного подмагничивания  $B_0$  на кривой намагничивания  $B(H)$  при различных значениях поля подмагничивания высокочастотным индуктором  $\Delta H$  приведена на рис. 3.

Видно, что максимальный прирост магнитной индукции  $\Delta B$  изменяется в диапазоне от 0,07 до 0,7 Тл при различных значениях прироста внешнего импульсного поля  $\Delta H$ , причем максимум наблюдается в относительно малых полях до 5000 А/м и соответствует области максимума дифференциальной магнитной проницаемости. Таким образом, при небольших полях постоянного намагничивания использование дополнительного воздействия синфазным магнитным полем высокочастотного индуктора позволяет в области, далекой от насыщения, получить суще-

ственный прирост эффективности ЭМА-преобразования: при  $\Delta H = 500$  А/м – на 12 % и при  $\Delta H = 1000$  А/м – на 24 % (при  $H = 2500$  А/м).

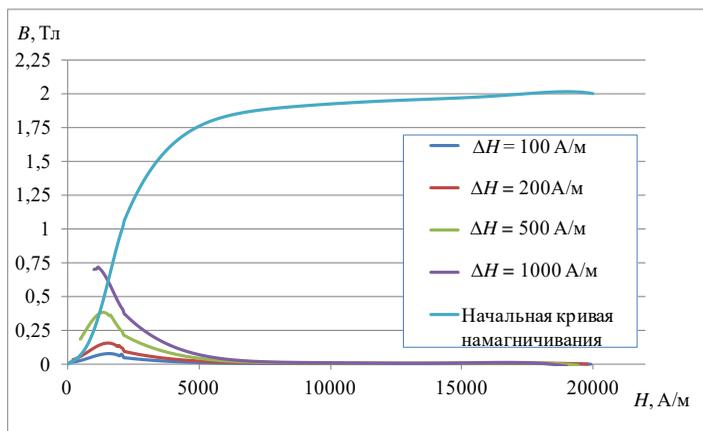


Рис. 3. Зависимость величины прироста магнитной индукции  $\Delta B$  от положения точки постоянного подмагничивания  $B_0$  на кривой намагничивания  $B(H)$  при различных значениях поля подмагничивания высокочастотным индуктором  $\Delta H$

## Выводы

Разработанная методика расчета позволяет оценить возможности повышения эффективности проходных ЭМА-преобразователей продольных волн для сталей с известными кривыми намагничивания и оптимизировать параметры поля постоянного подмагничивания. Результаты расчетов эффективности ЭМА-преобразователя продольных волн в условиях дополнительного намагничивания током высокочастотного индуктора показали, что выбор оптимального поля подмагничивания позволяет получить большую эффективность в сравнительно малых полях, соответствующих максимуму дифференциальной магнитной проницаемости.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 1.2405.2017/4.6) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

## Список литературы

1. *Бабкин, С. Э.* Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком / С. Э. Бабкин // Дефектоскопия. – 2020. – № 4. – С. 32–39.
2. *Стрижак, В. А.* Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 159–166.
3. *Комаров, В. А.* Магнитоупругое электромагнитно-акустическое преобразование. Ч. 3. Двойное преобразование / В. А. Комаров // Контроль. Диагности-ка. – 2018. – № 4. – С. 20–29.
4. *Муравьев, В. В.* Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости / В. В. Муравьев, К. А. Тапков, С. В. Леньков // Дефектоскопия. – 2019. – № 1. – С. 10–16.
5. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 37–44.
6. *Будрин, А. Ю.* Влияние термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках / А. Ю. Будрин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 12–17.
7. *Толипов, Х. Б.* Возможности повышения эффективности бесконтактного излучателя акустических волн / Х. Б. Толипов // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 71–74.
8. *Злобин, Д. В.* Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков / Д. В. Злобин, Л. В. Волкова // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 236–245.
9. *Буденков, Г. А.* Влияние химического состава и температуры металлов на эффективность электромагнитно-акустического преобразования / Г. А. Буденков, О. В. Коробейникова // Дефектоскопия. – 2009. – № 4. – С. 41–49.
10. *Петров, К. В.* Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, М. Ю. Соков, О. В. Муравьева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 135–146.
11. *Петров, К. В.* Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, О. В. Муравьева, Ю. В. Мышкин, А. Ф. Башарова // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. – С. 16–24.
12. *Сандомирский, С. Г.* Анализ влияния режимов термической обработки сталей на их остаточную намагниченность на частных петлях магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Сталь. – 2016. – № 4. – С. 55–59.
13. *Сандомирский, С. Г.* Возможности контроля физико-механических свойств стали 40Х по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Сталь. – 2018. – № 5. – С. 46–50.

A. F. Basharova<sup>1</sup>, postgraduate student  
A. A. Nagovitsyn<sup>1</sup>, postgraduate student  
O. V. Murav'eva<sup>1,2</sup>, DSc in engineering, professor  
E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

## **Efficiency Calculation of Longitudinal Mode Electromagnetic Acoustic Transducer with Additional Magnetization**

*The paper deals with the possibility of increasing the magnetization field of the EMA transducer of longitudinal waves due to additional exposure to the current magnetic field of the high-frequency inductor. A new methodology of calculating is proposed to assess the possibilities of increasing the efficiency of EMA-transducers of longitudinal waves for steels with known magnetization curves.*

**Key words:** ultrasound, efficiency of an electromagnetic-acoustic transducer, longitudinal wave, magnetization curve.

УДК 620.179.17

С. А. Бехер, д-р техн. наук, проф.

А. А. Попков, науч. сотрудник

E-mail: [beher@stu.ru](mailto:beher@stu.ru)

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

## **Использование ударного нагружения при контроле хрупких объектов методом акустической эмиссии**

*В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований с использованием ударного нагружения стеклянных объектов методом акустической эмиссии. Предложена схема эксперимента, позволяющая проводить однократное ударное воздействие и демпфирование упругих колебаний контролируемого объекта. Установлено, что релаксация упругих напряжений в области трещины после удара удовлетворительно описывается логарифмической зависимостью. Предложен способ разделения общего потока сигналов на стационарные группы по временным интервалам между сигналами и идентификации механизмов формирования упругих колебаний.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, ударное нагружение, кластеризация сигналов, трещина, стекло.

### **Введение**

На сегодняшний день одним из актуальных направлений при проектировании и производстве элементов конструкции является снижение их массы, которое предполагает использование материалов высокой прочности и меньшей плотности, например высокопрочные стали и сплавы, композиционные материалы и конструкционные керамики. Для таких материалов характерен высокий удельный предел прочности при механических нагрузках, но склонность к разрушениям хрупкого типа, чувствительность к ударам и высокая скорость развития усталостных дефектов существенно ограничивают их применимость [1]. Поэтому актуальной задачей является разработка методов неразрушающего контроля, которые способны обнаруживать дефекты, развивающиеся без заметной пластической деформации, на ранних стадиях, в том числе при воздействии ударных нагрузок [2].

Для раннего обнаружения дефектов и оценки скорости их развития перспективно использовать метод акустической эмиссии (АЭ). Однако для обнаружения дефектов, которые развиваются без заметной пластической деформации и при ударных воздействиях, метод АЭ требует со-

вершенствования и разработки методического, алгоритмического и программного обеспечения диагностических комплексов [3, 4].

### Постановка задачи и описание эксперимента

Напряженно-деформированное состояние объекта является необходимым условием для возможности его диагностирования методом АЭ. Для объектов, режим эксплуатации которых предполагает наличие нестационарных вибрационных или температурных нагрузок, нагружение стандартными методами (давление, пневматические или гидравлические испытания) может не дать достоверного результата, а для прочных и хрупких объектов часто приводит к быстрому и неконтролируемому разрушению [5]. Ударное нагружение позволяет локально воспроизводить высокий уровень механических напряжений и является перспективным при АЭ-контроле объектов, дефекты в которых развиваются без заметных пластических деформаций.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве контролируемых объектов использовались листы из силикатного стекла размерами 200×300 мм и толщиной 2 мм, на длинной кромке которых создавалась трещина длиной 10–15 мм (рис. 1).

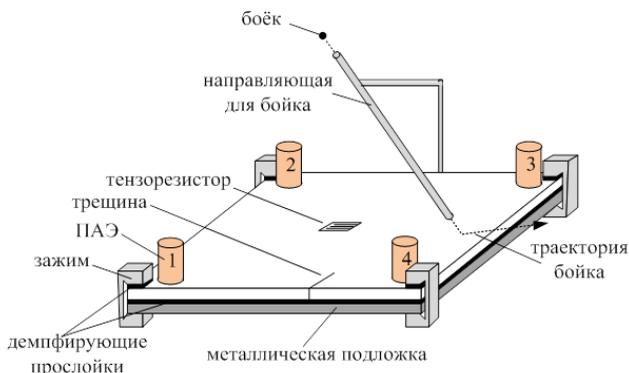


Рис. 1. Экспериментальная установка для ударного воздействия на стеклянный объект

Так же экспериментальным исследованиям подвергались листы без видимых дефектов. Стеклянные листы фиксировались на металлической подложке толщиной 2 мм с помощью зажимов по углам листа. Между рабочей поверхностью зажимов и поверхностью листа, а также между листом и металлической подложкой располагались демпфирующие

щие прокладки. На расстоянии 10 мм от краев листа устанавливались четыре преобразователя АЭ в виде прямоугольной акустической антенны. Для измерения напряжено-деформированного состояния в центр листа перпендикулярно направлению роста трещины наклеивался проволочный тензорезистор типа ПКС-12-200, который подключался к измерительной системе по одиночной схеме.

Нагружение осуществлялось ударами стальными шариками (бойками) диаметром 12 мм и массой 7 г, падающими с высоты 0,2–0,7 м. Нагружение ударом шарика меньшей массы не инициировало событий акустической эмиссии. Масса стального шарика выбиралась экспериментально: использование более тяжелого шарика вызывало разрушение стеклянного образца и мгновенный рост трещины. Для создания направленного удара применялась алюминиевая трубка, ориентированная под углом 40–60° к поверхности образца. Место и направление удара выбирались таким образом, чтобы не допустить повторного воздействия бойка на стекло. Экспериментальные исследования по динамическому воздействию на хрупкие образцы без видимых дефектов показали, что единственным источником сигналов акустической эмиссии является место соударения стального бойка и стеклянного образца. Использование пьезоантенны из четырех преобразователей позволило осуществлять локацию источников акустической эмиссии и проводить предварительную фильтрацию сигналов по месту их возникновения (удар стального шарика, рост трещины, трение зажимов).

### Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментов установлено, что зависимость относительных деформаций на берегах трещины от времени является логарифмической (рис. 2, а). Для наглядности и обоснования логарифмической зависимости график построен в полулогарифмическом масштабе [7]. Коэффициент корреляции деформаций и логарифма времени на участке релаксации напряжений составляет 0,98. В момент удара деформации увеличиваются до 50 млн<sup>-1</sup>. После этого в течение 4 мс регистрируются колебания с частотой 1,6 кГц и монотонно убывающей амплитудой [6].

На зависимости числа сигналов от времени, построенной в полулогарифмическом масштабе, выделяются две области (рис. 2, б). Время отсчитывается от сигнала, вызванного ударом, который на графике не представлен. Непрерывные сигналы – «хвосты» – представляют собой монотонно затухающие колебания, возбужденные ударом. Эти сигналы регистрируются в течение 30 мс, после чего обнаруживаются дискретные сигналы АЭ. Зависимость их числа от времени аппроксимирована

логарифмической зависимостью с коэффициентом корреляции 0,94. Значение коэффициента корреляции меньше 0,99 связано с наличием излома зависимости на интервале времени 0,2–0,4 с.

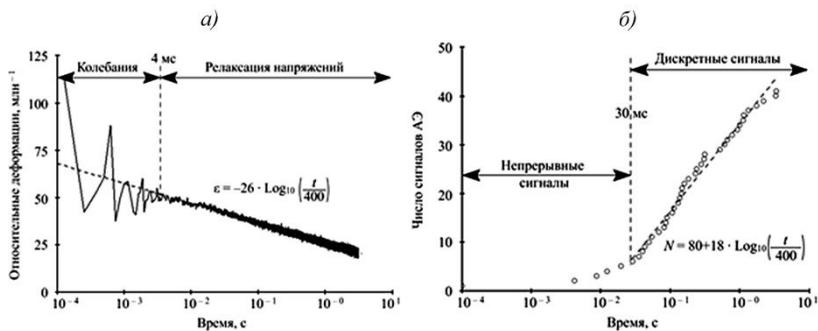


Рис. 2. Зависимость относительных деформаций образца (а) и числа сигналов АЭ (б) от времени при одном ударе в полулогарифмическом масштабе времени и результат аппроксимации

В ходе работы установлено, что в общем потоке АЭ идентифицируются группы сигналов, интервал времени между которыми существенно превышает среднее значение времени между сигналами в пределах группы. Для обнаружения границ групп сигналов предложено анализировать интервалы времени между сигналами (рис. 3).

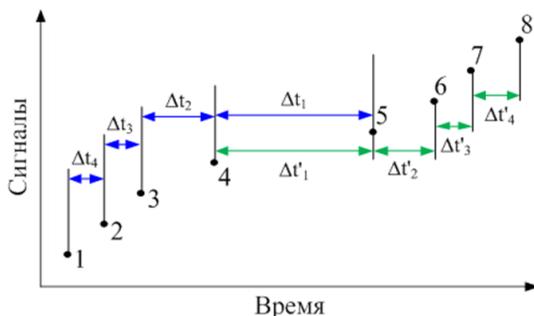


Рис. 3. Схема определения коэффициентов отношения временных интервалов при кластеризации по временной селекции

Текущий сигнал считается последним в группе, если временной интервал между текущим сигналом и следующим за ним превышает сред-

нее значение интервалов времени между несколькими последовательно зарегистрированными сигналами, предшествующими текущему. Аналогично текущий сигнал считается первым в группе, если временной интервал между текущим и предшествующим ему сигналами превышает среднее значение интервалов времени между несколькими последовательно зарегистрированными сигналами после текущего. По коэффициентам отношений временных интервалов можно определить вероятность признака начала или окончания обособленной группы [8].

Таким образом, временная селекция сигналов акустической эмиссии при ударном нагружении позволила идентифицировать три механизма формирования упругих колебаний (рис. 4). Первый механизм – упругие монотонно затухающие колебания, вызванные воздействием бойка на образец, регистрируемые в течение 0,025 с. Время затухания зависит от свойств материала основания, на котором расположен образец. Второй механизм связан с разрушением кромок концентратора и кромок трещины при ударном нагружении. Сигналы этой группы регистрируются на интервале времени 0,025–0,35 с. Последним механизмом акустической эмиссии является замедленное разрушение, а возникающие при этом сигналы регистрируются с 0,35-й секунды после удара и в течение более 400 с. Особенностью потока сигналов является логарифмическая зависимость суммарного счета от времени и нестационарность потока событий акустической эмиссии. Сигналы формируют идентифицируемые по времени регистрации группы, внутри которых распределение интервалов описывается экспоненциальным законом распределения.

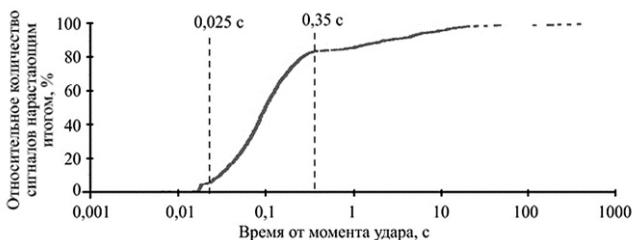


Рис. 4. Зависимость количества акустико-эмиссионных сигналов от времени регистрации относительно времени регистрации сигнала ударного воздействия

## Выводы

Проведены экспериментальные исследования по динамическому нагружению объектов из силикатного стекла, в ходе которых регистрировались зависимости активности акустической эмиссии и относительных

деформаций контролируемого объекта от геометрических размеров растущей трещины. Выявлено, что после полного разрушения в течение некоторого времени регистрируются сигналы акустической эмиссии, предположительно вызванные смещением кромок трещины; что в течение времени  $t = 6$  мс после ударного воздействия аппаратура не способна регистрировать сигналы акустической эмиссии. Установлено, что зависимость деформаций и суммарного счета акустической эмиссии от времени удовлетворительно описывается логарифмической функцией с коэффициентом корреляции более 0,94. Предложен метод разделения общего потока сигналов на независимые группы по временным интервалам между сигналами, которые характерны для различных источников акустической эмиссии.

### Список литературы

1. Буйло, С. И. Диагностика предразрушающего состояния по амплитудным и временным инвариантам потока актов акустической эмиссии / С. И. Буйло // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 79–83.
2. Муравьев, В. В. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона / В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, А. Е. Кареев // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 63–68.
3. Муравьев, В. В. Оценка роста усталостных трещин в боковых рамах тележек грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 9. – С. 24–29.
4. Stepanova, L. N., Lebedev, E. Yu., Kareev, A. E., Chaplygin, V. N., Katarushkin, S. A. Use of the acoustic emission method in detecting the fracture process in specimens made of composite materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2004. Vol. 40. No. 7. С. 455-461.
5. Муравьев, В. В. Автоматизированные диагностические стенды для продления срока службы литых деталей вагонов / В. В. Муравьев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. № 4(60). С. 98–102.
6. Бехер, С. А. Применение ударного нагружения для обнаружения трещин в стекле акустико-эмиссионным методом / С. А. Бехер, А. А. Попков // Дефектоскопия. – 2018. – № 11. – С. 3–8.
7. Исследование основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и циклических испытаниях образцов из стали 20ГЛ / Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров, К. В. Канифадин, В. В. Чернова // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 6. – С. 41–45.
8. Пат. 2727316 Рос. Федерация, МПК G01N 29/14 (2006.01). Способ акустико-эмиссионного контроля конструкций / Бехер С. А., Бобров А. Л., Попков А. А. – № 2019145699 ; заявл. 31.12.2019 ; опубл. 21.07.2020. Бюл. № 21.

S. A. Bekher, DSc in engineering, professor

A. A. Popkov, researcher

E-mail: [beher@stu.ru](mailto:beher@stu.ru)

Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

## **The Use of Shock Loading when Testing Fragile Objects by the Acoustic Emission Method**

*The article discusses the results of experimental studies using shock loading of glass objects by the method of acoustic emission. The scheme of the experiment is proposed, which allows to carry out a single shock action and damping of elastic vibrations of the controlled object. It was found that the relaxation of elastic stresses in the crack region after impact is satisfactorily described by the logarithmic dependence. A method is proposed for dividing the total signal flow into stationary groups by time intervals between signals and identifying mechanisms for the formation of elastic vibrations.*

**Keywords:** acoustic emission, shock loading, signal clustering, crack, glass.

УДК 534.64

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.

А. Р. Залалутдинова, студент

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Исследование акустического импеданса растворов резонансным методом

*В работе представлены результаты измерения акустического импеданса водных растворов глицерина и ацетона различной концентрации с помощью резонансного метода, основанного на изменении параметров электрической эквивалентной схемы пьезопластины, нагруженной на воздух, эталонную среду и раствор, и дальнейшем пересчете их с использованием электромеханических аналогий. Результаты измерения акустического импеданса растворов показали схожий характер зависимости от концентрации теоретической и экспериментальной кривых.*

**Ключевые слова:** акустический импеданс, раствор, резонансный метод, пьезопластина, измерение, концентрация.

### Введение

Различные растворы применяются повсеместно в промышленности (например, нефтегазовой, атомной и т. п.), дефектоскопии (магнитная, проникающими веществами), медицине, фармакологии и других областях. Помимо контроля концентрации растворенных веществ в растворах, необходимо контролировать качество как самих растворов, например сточных вод [1], так и отдельных компонентов, входящих в их состав. Существующие методы [1–7] не обладают достаточной универсальностью и применимы только либо для контроля определенных растворов [1–5], например, оптически прозрачных [2], либо для контроля конкретного вещества в нем [6], к тому же каждый из них имеет ряд своих недостатков.

Для оценки качества растворов перспективными являются методы, основанные на измерении их акустических свойств, например, акустического импеданса, скорости звука, затухания звука и др. Измерение акустического импеданса раствора позволяет определить не только качество раствора по его отклонению от истинного значения, но и другие физические свойства, знание которых может позволить расширить об-

ласть их применения, а также фиксировать их изменение в процессе эксплуатации раствора.

Целью работы является исследование возможности измерения акустического импеданса растворов различной концентрации с использованием резонансного метода.

### Используемый подход

Для измерения акустического импеданса исследуемых растворов используется резонансный метод, основанный на измерении напряжения на резонансной частоте, снимаемого через сопротивление развязки с пьезопластины, поочередном нагружаемой на воздух, эталонную и исследуемую среды, представлении пьезопластины в виде электрической эквивалентной схемы и расчете импеданса с использованием электро-механических аналогий [8, 9]. Экспериментальная установка, реализующая данный метод, представлена на рис. 1.

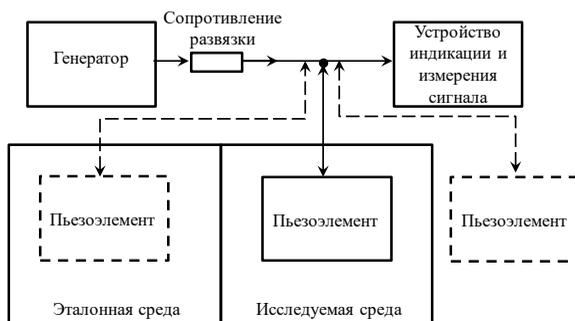


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Определение экспериментального значения акустического импеданса растворов  $Z_{\text{эксп}}$  подробно описано в [6, 7].

Теоретическое значение акустического импеданса растворов  $Z_{\text{теор}}$  определялось по формуле:

$$Z_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{\rho}{C_V \beta + (1 - C_V) \beta_0}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность раствора;  $C_V$  – объемная концентрация раствора;  $\beta$  – сжимаемость растворяемого вещества;  $\beta_0$  – сжимаемость растворителя.

## Результаты эксперимента и их обсуждение

С использованием резонансной методики измерен акустический продольный импеданс водных растворов глицерина и ацетона различной объемной концентрации  $C_V$  (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %), а также чистых глицерина и ацетона, что соответствует 100%-й концентрации, при следующих параметрах установки (рис. 1): напряжение генератора  $U_{\Gamma} = 10$  В, сопротивление развязки  $R_p = 200$  Ом, продольная пьезопластина ЦТС-19 размерами  $20 \times 20 \times 1$  мм (электрическая емкость  $C_1 = 5,8$  нФ), эталонная среда – вода ( $Z_0 = 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м). Результаты измерения акустических импедансов водных растворов глицерина и ацетона различной концентрации показаны на рис. 2.

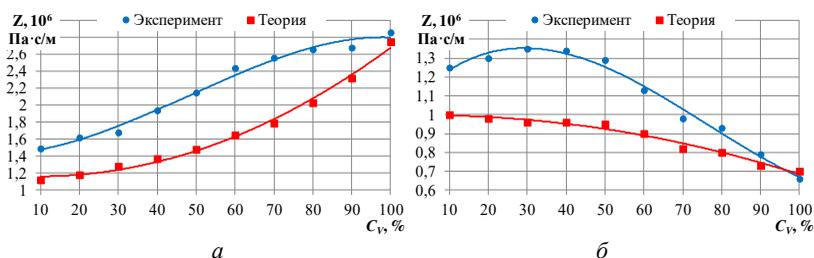


Рис. 2. Результаты измерения акустических импедансов  $Z$  водных растворов глицерина (а) и ацетона (б) различной концентрации  $C_V$

На рис. 2, а показано изменение акустического импеданса водного раствора глицерина от объемной концентрации. При этом на графиках, соответствующих экспериментальным измерениям и теоретическому расчету по формуле (1), наблюдается рост акустического импеданса с увеличением концентрации, это связано с тем, что акустический импеданс чистого глицерина ( $Z_{\text{табличное}} = 2,42 \cdot 10^6$  Па·с/м) больше, чем воды ( $Z_{\text{табличное}} = 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м), следовательно, при увеличении доли глицерина в воде значение акустического импеданса их раствора также будет расти. Для водного раствора ацетона наблюдается обратная зависимость (рис. 2, б), т. к. чистый ацетон ( $Z_{\text{табличное}} = 0,92 \cdot 10^6$  Па·с/м) имеет значение акустического импеданса меньше, чем у его растворителя – воды. Отличие экспериментального значения акустического импеданса растворов от теоретического может быть связано с отклонением свойств глицерина, ацетона и воды от табличных значений, что может быть обусловлено наличием примесей и поверхностно активных веществ, а так-

же погрешностями при измерении плотности раствора и при подготовке растворов.

### Выводы

Результаты исследований показали возможность применения резонансного метода для измерения акустического импеданса растворов, что может позволить оценить их качество и другие физические свойства (скорость звука, упругие модули), а также метод может быть использован в качестве аналитического для проведения количественного анализа по определению концентрации растворенного вещества в растворе с помощью калибровочных графиков.

### Список литературы

1. *Алексеев, В. А.* Интерполяционный контроль сточных вод / В. А. Алексеев, В. П. Усольцев, С. И. Юран // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17, № 1. – С. 117–125.
2. *Нужин, А. В.* Оптический метод контроля неоднородности растворов по углу смачивания / А. В. Нужин, А. А. Слободянюк // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 9. – С. 55–57.
3. *Копытков, В. В.* Метод контроля срока годности водных растворов полимеров / В. В. Копытков // Пластические массы. – 2007. – № 8. – С. 32–34.
4. 06.12-19И.215 Методы и средства контроля качества растворов // РЖ 19И. Общие вопросы химической технологии. – 2006. – № 12.
5. *Жданов, Д. Н.* Сорокин / Д. Н. Жданов // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 110–111.
6. *Жданов, Д. Н.* Оптико-электронная система контроля биологической активности растворов ионного серебра / Д. Н. Жданов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2007. – Т. 7, № 2. – С. 99–102.
7. *Корепанов, М. А.* Идентификация виртуальных аналогов жидких ракетных топлив / М. А. Корепанов, С. Н. Храмов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 49–56.
8. Методика и устройство для экспериментальной оценки акустического импеданса вязкоупругих сред / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, О. П. Богдан, В. Н. Сяктерев, В. В. Волков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 314–326.
9. Пат. RU 2672774 С1. Способ измерения акустического импеданса среды и устройство для его осуществления / Муравьева О. В., Злобин Д. В., Богдан О. П., Муравьев В. В. № 2017125620 ; заявл. 17.07.2017 ; опубл. 19.11.2018.

*O. P. Bogdan*, CSc in engineering, associate professor

*A. R. Zalalutdinova*, student

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Investigation of the Acoustic Impedance of Solutions by the Resonant Method**

*The paper presents the results of measuring the acoustic impedance of aqueous solutions of glycerol and acetone of different concentrations using a resonant method based on changing the parameters of the electrical equivalent circuit of a piezo plate loaded on air, a reference medium, and a solution, and then recalculating them using electromechanical analogies. The results of measuring the acoustic impedance of solutions showed a similar nature of the dependence on the concentration of the theoretical and experimental curves.*

**Ключевые слова:** acoustic impedance, aqueous solution, resonant method, piezo plate, measurement, concentration.

УДК 534.6.08

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.

Д. В. Злобин, канд. техн. наук, доц.

А. В. Тарасова, студент

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Исследование скорости акустической волны в образцах из терморасширенного графита

*В работе представлены результаты исследования скорости акустической волны в листах-заготовках из терморасширенного графита разной толщины и средней плотности, полученные при использовании теневого акустического метода, основанного на измерении времени прохождения акустического импульса в образце. Исследования показали, что увеличение плотности образца приводит к росту скорости акустической волны в нем. Также показано влияние на значение средней скорости акустической волны наличия дефектов, при этом менее плотные дефекты в образцах приводят к снижению скорости и наоборот. Погрешность измерения скорости акустической волны составила 0,4–2,2 %.*

**Ключевые слова:** терморасширенный графит, плотность, скорость акустической волны, измерение, лист-заготовка.

### Введение

Терморасширенный графит (ТРГ) – углеродистый материал с низкой плотностью [1], он обладает достаточно большим диапазоном рабочих температур, высокой химической стойкостью, хорошей уплотняющей способностью, которые содействуют устойчивому росту потребления уплотнений на его основе многими отраслями промышленности [2]. Важным отличием ТРГ от всех других порошкообразных углеродных материалов является его способность образовывать углеродные изделия без какого-либо связующего вещества [3].

ТРГ имеет широкое применение, поэтому его технологическое значение растет [3, 4], следовательно, важно изучать физические свойства материала, углеродную основу и пористую структуру, а также разрабатывать новые методы его контроля.

В настоящее время согласно нормативным документам, например, ТУ 5728-006-93978201-2008, СТ ЦКБА-СОЮЗ-СИЛУР-019-2012 или РД 153-34.1-39.605-2002, контролируют лишь геометрические размеры заготовок и изделий, содержание некоторых элементов в составе ТРГ,

предел прочности при растяжении и при сжатии, коэффициент трения и т. п. [1]. Большинство этих свойств контролируются разрушающими методами, и дальнейшее использование заготовок становится невозможным, к тому же нельзя оценить изменение свойств внутри партии. Скорость акустической волны [5], распространяющейся в листе-заготовке из ТРГ, является наиболее универсальным свойством материала, зависящим от большинства контролируемых свойств, а ее измерение возможно без разрушения материала.

Целью работы является оценка возможности измерения скорости акустической волны в ТРГ теневым временным методом, а также исследование зависимости скорости от плотности листа-заготовки.

### Используемый подход

Исследование скорости акустической волны в листах-заготовках ТРГ выполнено с помощью теневого временного акустического метода, суть которого состоит в регистрации времени прохождения импульса сквозь объект [6]. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, а. Для реализации данного метода использован ультразвуковой дефектоскоп с преобразователями с рабочей частотой 300 кГц. Зондирующий импульс с генератора дефектоскопа 1 поступает на преобразователь 2, выступающий в роли излучателя, который излучает акустический импульс в лист-заготовку ТРГ 4 (лист располагался продольно относительно преобразователей). Распространяясь сквозь лист-заготовку ТРГ, акустический импульс поступает на приемник 3 и далее в дефектоскоп 1, где он обрабатывается. При этом на экране дефектоскопа наблюдаются зондирующий импульс и импульс, прошедший сквозь лист-заготовку ТРГ (рис. 1б), время  $t$  между которыми необходимо измерить.

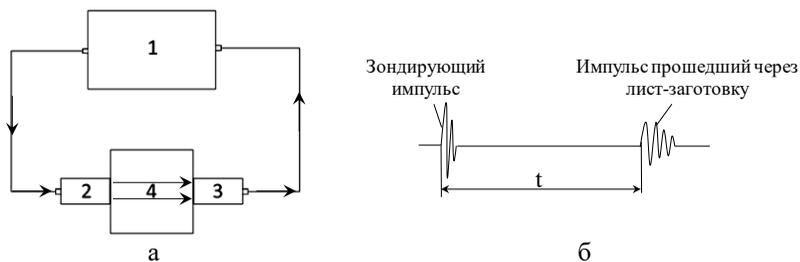


Рис. 1. Экспериментальная установка:

а – блок-схема: 1 – ультразвуковой дефектоскоп, 2 – излучатель, 3 – приемник, 4 – лист-заготовка из ТРГ; б – изображение на экране дефектоскопа

Скорость акустической волны определялась по формуле

$$C = \frac{L}{t - 2t_p}, \quad (1)$$

где  $L = 30$  мм – расстояние, пройденное акустической волной в образце ТРГ;  $t$  – время между зондирующим импульсом и импульсом, регистрируемым приемником;  $t_p = 6,83$  мкс – время прохождения волны в преобразователях.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследования проводились на 5 партиях листов-заготовок ТРГ, изготовленных ООО СИЛУР, толщиной 0,4 мм, 0,6 мм, 0,8 мм, 1 мм и 1,5 мм с различными плотностями, лежащими в диапазоне 643–1523 кг/м<sup>3</sup>.

Для каждого листа-заготовки ТРГ по формуле (1) определена средняя скорость акустической волны по сечению образца, по результатам которых получен график ее зависимости от средней плотности образца ТРГ определенной толщины (рис. 2).

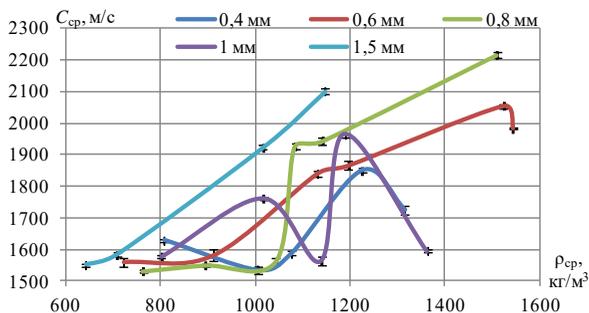


Рис. 2. Зависимость средней скорости акустической волны от средней плотности листов разной толщины

Из графика видно, что с увеличением плотности листа-заготовки ТРГ скорость акустической волны увеличивается. При этом для листов-заготовок ТРГ толщиной 1 мм наблюдается существенное уменьшение скорости акустической волны для листа плотностью 1139 кг/м<sup>3</sup>, что объясняется наличием в образце дефектов – пузырей, заполненных воздухом, в результате чего акустический импульс при распространении в листе-заготовке ТРГ частично распространяется по воздуху ( $C_{\text{воздух}} = 330$  м/с), которым заполнен пузырь, что приводит к уменьшению сред-

ней по сечению образца скорости акустической волны. Аналогичная картина наблюдается для листов-заготовок ТРГ толщиной 0,6 мм плотностью 1543 кг/м<sup>3</sup> и толщиной 0,4 мм плотностью 1315 кг/м<sup>3</sup>. Наличие включений в листе-заготовке ТРГ более плотных, чем сам образец, приводит, наоборот, к увеличению средней скорости акустической волны по сечению образца. Погрешность измерения скорости акустической волны в листах-заготовках ТРГ составила 0,4–2,2 %.

## Выводы

Таким образом, исследования скорости акустической волны в листах-заготовках ТРГ показали зависимость ее от плотности, структуры и наличия дефектов, что может быть использовано при разработке новых методов контроля изделий из ТРГ, основанных на изменении скорости акустической волны относительно среднего значения по образцу. Увеличение плотности листа-заготовки ТРГ приводит к нелинейному увеличению скорости акустической волны, при этом, зная данную зависимость, можно определить другие физические свойства ТРГ, такие как модуль упругости, акустический импеданс и др., что является важным для более широкого применения изделий из ТРГ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» в рамках научного проекта № ПАВ/20-90-17.*

## Список литературы

1. *Афаносов, И. М.* Теплопроводность и механические свойства терморасширенного графита / И. М. Афаносов, Д. В. Савченко, С. Г. Ионов // Неорганические материалы. – 2009. – Т. 45. – С. 540–544.
2. *Ярошенко, А. П.* Высококачественные вспучивающиеся соединения интеркалирования графита – новые подходы к химии и технологии / А. П. Ярошенко, М. В. Савоскин // ЖПХ. – 1995. – Т. 68, вып. № 8. – С. 1302–1306.
3. *Яковлев, А. В.* Терморасширенный графит: синтез, свойства и перспективы применения / А. В. Яковлев, А. И. Финаенов, С. Л. Забудьков // Журнал прикладной химии. – 2006. – Т. 79. – С. 1761–1771.
4. *Финаенов, А. И.* Области применения и получение терморасширенного графита / А. И. Финаенов, А. И. Трифионов, А. М. Журавлев // Новые материалы и технологии. – 2004. – № 1 (2). – С. 77–80.
5. *Методика и устройство для экспериментальной оценки акустического импеданса вязкоупругих сред / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, О. П. Богдан, В. Н. Сяктерев, В. В. Волков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 314–326.*

6. Акустический и вихретоковый методы неразрушающего контроля листов из терморасширенного графита / О. П. Богдан, Д. В. Злобин, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2019) : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 20-летию ООО «Кузбасский центр сварки и контроля» / под ред. А. Н. Смирнова. – Кемерово, 2019. – С. 236–246.

*O. P. Bogdan*, CSc in engineering, associate professor

*D. V. Zlobin*, CSc in engineering, associate professor

*A. V. Tarasova*, student

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Investigation of Acoustic Wave Velocity in Samples of Thermally Expanded Graphite**

*The paper presents the results of studying the acoustic wave velocity in sheets-billets made of thermally expanded graphite of different thickness and average density, obtained using the shadow acoustic method based on measuring the passage time of an acoustic pulse in a sample. Studies have shown that an increase in the density of the sample leads to an increase in the velocity of the acoustic wave in it. The influence of defects on the value of the average acoustic wave velocity is also shown, while less dense defects in samples lead to a decrease in velocity and vice versa. The error in measuring the acoustic wave velocity was 0.4-2.2 %.*

**Keywords:** thermally expanded graphite, density, acoustic wave velocity, measurement, sheet-billet.

УДК 620.179.161

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.

Д. С. Рысев, магистрант

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Исследование анизотропии скорости звука в пенополиэтилене

*В статье исследована возможность оценки анизотропии скорости звука в пенополиэтилене по измерению времени прохождения ультразвукового импульса частотой 50 кГц сквозь лист в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Показана зависимость скорости звука в пенополиэтилене от направления прозвучивания и определен коэффициент анизотропии, который составил 0,08–0,35, а также выявлена его ортотропность.*

**Ключевые слова:** пенополиэтилен, анизотропия свойств, акустический метод, скорость звука.

### Введение

Пенополиэтилен (ГОСТ Р 56729-2015 (EN 14313:2009)) является газонаполненным полимером, состоящий из открытых или закрытых ячеек, с уникальными физическими свойствами (высокие коэффициенты шумопоглощения, виброгашения, эластичность, ветро-влажностойчивость, низкая теплопроводность и др.), благодаря которым он нашел свое применение в различных областях промышленности, в том числе и особо опасных. В основном пенополиэтилен используют в качестве теплоизоляции в широком диапазоне температур (–80 °С... +150 °С) и для шумо- и виброгашения механических колебаний [1–4]. Несмотря на широкое применение пенополиэтилена, его физические свойства и их изменение по объекту плохо изучены.

Одним из таких физических свойств является скорость звука в пенополиэтилене и ее анизотропия, обусловленная различием форм ячеек и их ориентацией в направлении вспенивания, влияющая на его прочностные характеристики [1, 5]. Исследование анизотропии скорости звука в листах пенополиэтилена позволит определить его ориентацию в пространстве, что обеспечит наиболее эффективное его применение для реализации требуемой задачи, например шумогашение. В настоящее время в существующей нормативной базе ГОСТ Р 56729–2015 (EN 14313:2009), ГОСТ Р 56227–2014, ТУ 2244-069-04696843-00, ТУ 2244-

001-61124153-2014 и др. регламентировано определение физических свойств листов пенополиэтилена, таких как кажущаяся плотность, теплопроводность, влагопоглощение и паропроницаемость, линейные размеры, сопротивление растяжению и расслаиванию, звукопоглощение и выделение вредных веществ [6], при этом отсутствуют методики измерения скорости звука в пенополиэтилене и ее анизотропии.

Целью работы является измерение скорости звука и ее анизотропии в листах пенополиэтилена различной толщины и плотности акустическим теневым временным методом.

### Используемые подходы

Исследование анизотропии скорости звука в листах пенополиэтилена основано на измерении времени прохождения ультразвуковой волны сквозь лист в двух взаимно перпендикулярных направлениях и дальнейшем расчете. Ввиду того, что пенополиэтилен является высокопористым материалом, для его исследования необходимо применять бесконтактный метод измерения или измерение с сухим контактом. Блок-схема экспериментальной установки, используемой для исследования анизотропии свойств листов пенополиэтилена, представлена на рис. 1.

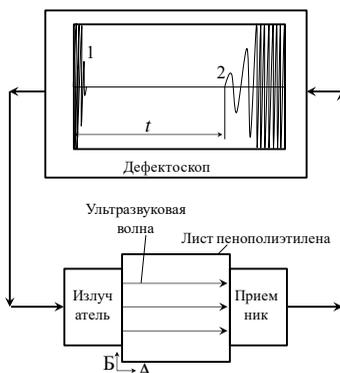


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования анизотропии свойств листов пенополиэтилена: 1 – зондирующий импульс, 2 – импульс, прошедший сквозь лист пенополиэтилена

С дефектоскопа электрический импульс поступает на излучатель, трансформирующий его в акустический импульс и излучающий в лист пенополиэтилена в направлении А. Акустический импульс частично проходит сквозь лист пенополиэтилена, частично по воздуху, это обусловлено тем, что размер преобразователей больше толщины листа. Да-

лее сигнал поступает на приемник и обратно в дефектоскоп, где происходит обработка принятого сигнала и измерение времени  $t$  прохождения волны в объекте. На осциллограмме (рис. 1) видно, что часть энергии импульса 2, прошедшая сквозь лист, приходит на приемник раньше, чем доля энергии импульса, прошедшей по воздуху, т. к. пенополиэтилен имеет большую скорость звука, чем воздух, а также этот сигнал имеет более низкую частоту, что связано с большим поглощением волны в пенополиэтилене. Далее необходимо повторить аналогичное измерение в направлении Б листа пенополиэтилена. Обязательным условием для обеспечения достоверности измерения является соосность излучателя и приемника.

Измерив время  $t$  прохождения волны сквозь лист пенополиэтилена в направлениях А и Б, скорость звука в данных направлениях можно определить по формуле

$$C = \frac{L}{t - 2t_p}, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние, пройденное ультразвуковой волной в листе пенополиэтилена;  $t$  – время между зондирующим импульсом и импульсом, регистрируемым приемником;  $t_p = 6,83$  мкс – время прохождения волны в преобразователях (излучателе, приемнике), определенное по стандартному образцу СО-2.

### Результаты и обсуждение

Для исследования анизотропии скорости звука в пенополиэтилене использовались листы размером  $50 \times 50$  мм, толщиной от 2 мм до 6 мм, различной плотности в диапазоне от  $29 \text{ кг/м}^3$  до  $63 \text{ кг/м}^3$ . Частота ультразвукового излучения выбрана 50 кГц для повышения проникающей способности ввиду высокого звукопоглощения в материале листа. Результаты измерения скорости звука в направления А и Б листа пенополиэтилена показаны в табл. 1.

Для оценки анизотропии скорости звука в листе используется коэффициент анизотропии  $K_C$ , определяемый по формуле [7, 8]

$$K_C = \frac{C_B - C_A}{C_B}, \quad (2)$$

где  $C_A$  и  $C_B$  – скорость звука в листе пенополиэтилена в направлении А и Б соответственно. Коэффициент анизотропии скорости звука в пенополиэтилене для исследуемых листов представлен в таблице.

**Результаты измерения скорости звука в листах пенополиэтилена**

№	Толщина, мм	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость звука $C$ , м/с		Коэффициент анизотропии скорости звука $K_C$
			в направлении А	в направлении Б	
1	2	39	–	625	–
2	2	45	–	625	–
3	3	36	–	625	–
4	3,5	63	500	769	0,35
5	4	29	–	588	–
6	4,5	48	526	714	0,26
7	5	35	446	568	0,21
8	5	50	575	625	0,08
9	6	35	500	556	0,10
10	6	59	500	667	0,25

Из таблицы видно, что для листов № 1 (толщина 2 мм, плотность 39 кг/м<sup>3</sup>), № 2 (толщина 2 мм, плотность 45 кг/м<sup>3</sup>), № 3 (толщина 3 мм, плотность 36 кг/м<sup>3</sup>) и № 5 (толщина 4 мм, плотность 29 кг/м<sup>3</sup>) скорость звука в направлении А не определена ввиду высокой анизотропии, чувствительность оказалась не достаточной для регистрации прошедшего сигнала. Для остальных листов пенополиэтилена скорость звука в направлении Б имеет большее значение, чем в направлении А. Это связано с тем, что ячейки, сформированные в результате вспенивания, ориентированы в направлении Б и соответственно перпендикулярно направлению А. Коэффициент анизотропии скорости звука в пенополиэтилене составил 0,08–0,35. Выявить определенную зависимость коэффициента анизотропии скорости звука от плотности листа пенополиэтилена или его толщины не удалось ввиду небольшого набора объектов исследования одинаковой толщины или плотности. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что листы пенополиэтилена являются ортотропными.

**Выводы**

В ходе проделанной работы была определена скорость звука в листах пенополиэтилена во взаимно перпендикулярных направлениях. Исследования показали, что в направлении Б скорость звука примерно на 150–200 м/с больше скорости звука в направлении А, что позволило оценить коэффициент анизотропии скорости звука в пенополиэтилене, который составил 0,08–0,35, и сделать вывод о его ортотропности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» в рамках научного проекта № ПАВ/20-90-17.*

### Список литературы

1. Бакирова, И. Н. Газонаполненные полимеры : учеб. пособие / И. Н. Бакирова, Л. А. Зенитова. – Казань : Изд-во Казан. гос. технолог. ун-та, 2009. – 105 с.
2. Влияние минеральных наполнителей на свойства химически сшитого пенополиэтилена / А. В. Панкратов, Г. Н. Матюхина, Ю. Т. Панов, О. А. Фридман // Пластические массы. – 2010. – № 7. – С. 32–34.
3. Дроздова, Л. Ф. Обзор современных компрессорных установок и материалов для снижения их шума / Л. Ф. Дроздова, Е. Ю. Чеботарева, А. В. Кудаев // Noise theory and practice. – 2018. – Т. 4, № 2 (12). – С. 11–20.
4. Ковалевский, В. Тепловая изоляция для объектов трубопроводного транспорта нефти / В. Ковалевский // Технологии топливно-энергетического комплекса. – 2006. № 1. – С. 58–63.
5. Перрен, А. А. Неразрушающий контроль полимерных композитных материалов в судостроении / А. А. Перрен, А. М. Баганик // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 3 (53). – С. 24–26.
6. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами / О. П. Богдан, О. В. Муравьева, А. В. Платунов, Д. С. Рысев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 61–68.
7. Гречников, Ф. В. К расчету среднего значения коэффициента анизотропии листовых материалов / Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов, В. М. Зайцев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 154–157.
8. Черепецкая, Е. Б. Экспериментальные исследования анизотропии горных пород с помощью аппаратуры лазерного ультразвукового структуроскопа «ГЕОСКАН-02М» / Е. Б. Черепецкая, В. Н. Иньков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 1. – С. 53–55.

*O. P. Bogdan*, CSc in engineering, associate professor

*D. S. Rysev*, master student

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Research of Sound Velocity Anisotropy in Polyethylene Foam

*The article studies the possibility of estimating the anisotropy of the sound velocity in polyethylene foam by measuring the passage time of an ultrasonic pulse with a frequency of 50 kHz through a sheet in two mutually perpendicular directions. The dependence of sound velocity in polyethylene foam on the direction of sounding is shown, also the anisotropy coefficient is determined, which is 0.08–0.35, and its orthotropy is revealed.*

**Ключевые слова:** polyethylene foam, anisotropy of properties, acoustic method, sound velocity.

УДК 620.179.161

Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц.  
О. В. Муравьева, д-р техн. наук, проф.  
В. В. Муравьев, д-р техн. наук, проф.  
А. А. Хантимирова, студент  
E-mail: ludmila396@rambler.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Исследование сигнала вихретокового преобразователя при контроле терморасширенного графита**

*В статье рассмотрены результаты исследования сигнала с вихретокового преобразователя в виде накладной индуктивной катушки. Проведена оценка изменения сигнала с листов и матов терморасширенного графита различной толщины и плотности. Получено, что модуль полного сопротивления сигнала зависит от плотности и толщины объекта контроля. Обнаружена неравномерность распределения модуля полного сопротивления по площади образцов из матов и тонких листов.*

**Ключевые слова:** терморасширенный графит, вихретоковый контроль, индуктивная катушка, комплексное сопротивление.

### **Введение**

Терморасширенный графит (ТРГ) становится все более и более распространен для применения в различных приложениях, начиная с нефтегазовой промышленности, химического машиностроения и заканчивая атомной промышленностью [1, 2]. Скрытые дефекты, возникающие во время производства, могут привести к последующим проблемам с качеством итоговой продукции и увеличению затрат и рисков. Типовыми дефектами при производстве являются расслоения, складки, пористость, которые приводят к изменению плотности. Чтобы гарантировать качество и надежность, был разработан метод акустического неразрушающего контроля для проверки плотности, обладающий преимуществом в бесконтактности и высокой чувствительности, однако метод чувствителен к внешним акустическим шумам, которые могут существенно повлиять на результат контроля при производстве [3–5].

Вихретоковый метод неразрушающего контроля – широко используемый метод, основанный на принципе электромагнитной индукции. Метод является бесконтактным с высокой скоростью сканирования и применим для обнаружения дефектов, которые могут быть вызваны

изменением электрической проводимости и магнитной проницаемости [6–8]. Изменение плотности в ТРГ приводит к изменению локальной средней проводимости материала и изменению характеристик электрической проводимости материала, эти изменения электрических характеристик можно обнаружить с использованием технологии вихретокового контроля.

Целью работы являлась оценка возможности контроля плотности ТРГ с использованием вихретокового метода неразрушающего контроля.

### Сведения из теории

Вихретоковый контроль применяется для обнаружения большого разнообразия типов дефектов в тонкослойных структурах, таких как нарушение структуры, трещины, расслоения и волнистость поверхности. Для реализации вихретокового контроля ТРГ матов и листов различной толщины и плотности была использована экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Круглый вихретоковый преобразователь без сердечника помещался над образцами из ТРГ с зазором между преобразователем и объектом контроля 0,1 мм. Импеданс катушки измерялся измерителем RLC (МНИПИ Е7-20) на частоте 1 МГц. Данная частота тока возбуждения обеспечивает глубину проникновения электромагнитного поля в образцы из ТРГ 0,7 мм.

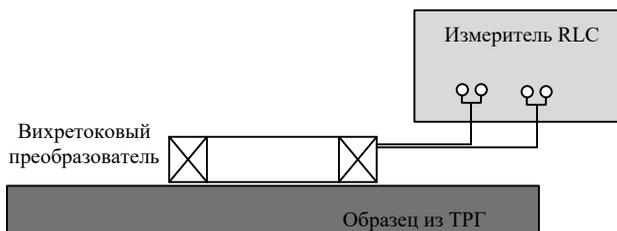


Рис. 1. Экспериментальная установка для вихретокового контроля ТРГ

Вихретоковый преобразователь представляет собой индуктивную катушку с параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1. Параметры вихретокового преобразователя

№	Количество витков	Диаметр, мм	Высота, мм
1	240	11,96	1,5

Для оценки изменения импеданса катушки по площади объекта контроля были проведены измерения в 16 точках по площади объекта согласно рис. 2.

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

Рис. 2. Схема измерения объектов из ТРГ

### Результаты и их обсуждение

Для оценки зависимости полного сопротивления  $Z$  от плотности мата и листа были измерены 17 матов и 26 листов с различной плотностью и толщиной. В процессе измерений в каждом объекте измерялось 16 точек по площади объекта, а затем производилось усреднение результатов измерений.

По результатам оценки зависимости модуля полного сопротивления от плотности мата и листа из ТРГ были построены графики изменения модуля полного сопротивления вихретокового преобразователя от плотности объекта контроля (рис. 3, 4), из которых видно, что при увеличении плотности мата в 6 раз, а листа в 1,3 раза модуль полного сопротивления вихретокого преобразователя уменьшается в 1,3 раза. Погрешность измерения проведенных измерений составила 5 Ом. Наличие экстремума измерений при плотности мата  $132 \text{ кг/м}^3$  связано с неравномерной плотностью исследуемого мата по площади и поверхностными дефектами мата.

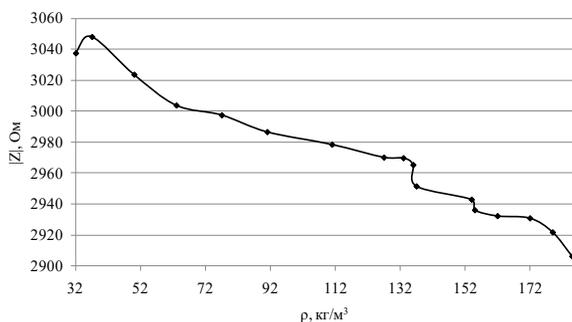


Рис. 3. График изменения модуля полного сопротивления  $|Z|$  вихретокового преобразователя от плотности  $\rho$  мата

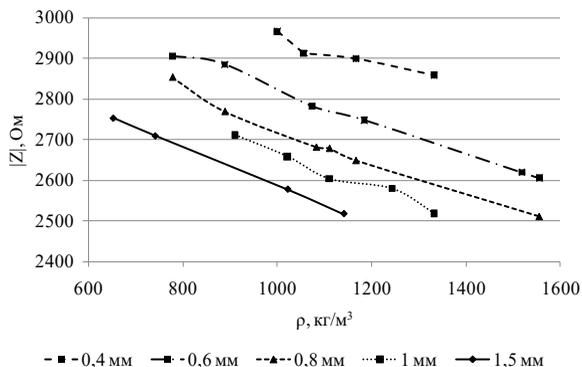


Рис. 4. График изменения модуля полного сопротивления  $|Z|$  вихретокового преобразователя в зависимости от плотности  $\rho$  для листов разной толщины

Из графиков видно, что модуль полного сопротивления вихретокового преобразователя зависит не только от плотности исследуемого объекта, но и от толщины листа. Влияние толщины листа на сигнал вихретокового преобразователя связано с различной плотностью вихревых токов на различных глубинах объекта контроля, в случае малых толщин плотность вихревых токов по толщине объекта контроля высокая, по сравнению с объектами большой толщины. Для ослабления влияния изменений толщины листа при контроле плотности была рассчитана поверхностная плотность объектов контроля  $\rho \cdot T$ , кг/м<sup>2</sup> (рис. 5, 6).

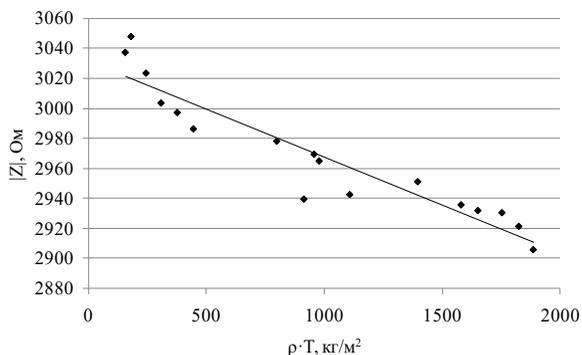


Рис.5 График изменения модуля полного сопротивления  $|Z|$  вихретокового преобразователя в зависимости от поверхностной плотности  $\rho \cdot T$  мата

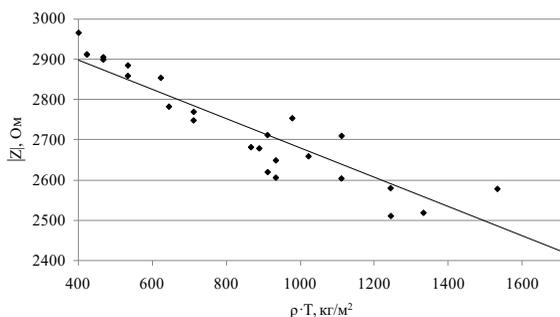


Рис. 6 График изменения модуля полного сопротивления  $|Z|$  вихретокового преобразователя в зависимости от поверхностной плотности  $\rho \cdot T$

Из предложенных зависимостей видно, что модуль полного сопротивления вихретокового преобразователя зависит от поверхностной плотности объекта контроля. Таким образом, для уменьшения влияния толщины объекта контроля необходимо выбирать частоту тока возбуждения достаточно большой, чтобы глубина проникновения электромагнитного поля была меньше толщины листа.

С целью выявления неравномерности свойств в листах ТРГ была проведена оценка распределения комплексного сопротивления по площади листов.

По результатам оценки были рассчитаны относительные изменения сигналов вихретокового преобразователя в зависимости от среднего значения  $Z_{\text{отн}}$ .

$$Z_{\text{отн}} = \frac{Z - Z_{\text{ср}}}{Z_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где  $Z$  – значение сопротивления в точке измерения;  $Z_{\text{ср}}$  – среднее значение сопротивления по площади образца.

Анализ результатов показал, что для матов наблюдается значительный разброс относительного изменения сигнала по площади образца от 11 до 32 %. При этом для мата с толщиной 4,9 мм неравномерность достигает 32 %. Для листов с толщиной от 0,6 мм до 1,5 мм отклонение полученного сигнала составило от 4 до 5 %, а в листе малой толщины 0,4 мм, отклонение сигнала в различных точках достигает до 47 %.

### Выводы

По результатам проведенных исследований сигнала вихретокового преобразователя в зависимости от характеристик объектов из ТРГ было получено, что модуль полного сопротивления сигнала вихретокового преобразователя существенно зависит от плотности мата и листа, а также от толщины листа, что необходимо учитывать при проведении измерений.

Сигнал вихретокового преобразователя имеет отклонения по площади исследуемых образцов, что может быть связано с неравномерной плотностью; так, в образцах матов, обладающих меньшей плотностью, отклонение сигнала существенное и может достигать 32 %.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашиникова» в рамках научного проекта № ПАВ/20-90-17.*

### Список литературы

1. Интеркалированные соединения графита акцепторного типа, новые углеродистые материалы на их основе / Н. Е. Сорокина, И. В. Никольская, С. Г. Иванов, В. В. Авеев // Известия академии наук. Серия химическая. – 2005. – № 8. – С. 1699–1716.
2. Махорин, К. Е. Вспучивание природного графита, обработанного серной кислотой / К. Е. Махорин, А. П. Кожан, В. В. Веселов // Химическая техника. – 1985. – № 2. – С. 3–6.

3. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами / О. П. Богдан, О. В. Муравьева, А. В. Платунов, Д. С. Рысев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 61–68.
4. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 78–88.
5. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 37–44.
6. Enhancement of sensitivity to delamination in eddy current testing of carbon fiber composites by varying probe geometry / K. Mizukami, A. S. bin Ibrahim, K. Ogi, N. Matvieieva, I. Kharabet, M. Schulze, H. Heuer // Composite Structures. 2019. Vol. 226. P. 111227.
7. *Wu, D.* Non-destructive testing for carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP) using a novel eddy current probe / D. Wu, F. Cheng, F. Yang, Ch. Huang // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 177. P. 107460.
8. *Mizukami, K.* A simple inverse analysis method for eddy current-based measurement of through-thickness conductivity of carbon fiber composites / K. Mizukami, Y. Watanabe // Polymer Testing. 2018. Vol. 69. Pp. 320–324.

*L. V. Volkova*, CSc in engineering, associate professor

*O. V. Muravieva*, DSc in engineering, professor

*V. V. Muraviev*, DSc in engineering, professor

*A. A. Khantimirova*, student

E-mail: [ludmila396@rambler.ru](mailto:ludmila396@rambler.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Investigation of the Signal of an Eddy-Current Transducer When Monitoring Thermally Expanded Graphite**

*The article discusses the results of studying a signal from an eddy-current transducer in the form of an overhead inductive coil. An assessment of the change in the signal from sheets and mats of thermally expanded graphite of various thicknesses and densities is carried out. It was found that the amplitude of the signal resistance depends on the density and thickness of the test object. An uneven distribution of the amplitude over the area of samples from mats and thin sheets was found.*

**Keywords:** thermally expanded graphite, eddy current control, inductive coil, complex resistance.

УДК 620.179.1

Г. Я. Дымкин, д-р техн. наук, проф.  
В. Н. Коншина, канд. техн. наук, доц.  
Л. А. Юрченко, аспирант  
E-mail: [mpnk@pgups.ru](mailto:mpnk@pgups.ru)

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **Подготовка персонала по неразрушающему контролю продукции железнодорожного назначения**

*Для обеспечения железнодорожного транспорта квалифицированными кадрами по неразрушающему контролю сформирована система подготовки персонала, включающая образование по основным и дополнительным образовательным программам, профессиональное обучение. В соответствии с требованиями работодателей, часть из которых сформулирована в ГОСТ 34513, основной акцент в этой системе сделан на освоении и развитии технологий неразрушающего контроля конкретных объектов – элементов инфраструктуры, деталей и составных частей подвижного состава.*

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, продукция железнодорожного назначения, профессиональное образование, направления подготовки 12.03.01, 12.04.01 «Приборостроение».

### **Введение**

Традиционно подготовка персонала по неразрушающему контролю в Российской Федерации проводится в рамках направления подготовки «Приборостроение».

Неразрушающий контроль (НК) продукции железнодорожного назначения (ПЖН) (рельсы, подвижной состав) выполняется как при ее изготовлении, так и при эксплуатации. Объемы неразрушающего контроля весьма велики, и общее количество специалистов, занятых НК элементов пути и деталей подвижного состава на предприятиях металлургии, транспортного машиностроения и на железнодорожном транспорте Российской Федерации, превышает 12000 человек (рис. 1).

К этим специалистам относятся как рабочие, так и персонал с высшим образованием. К обеим категориям предъявляются высокие квалификационные требования, поскольку безопасность движения на железнодорожном транспорте обеспечивается широким применением современных компьютеризированных средств НК, которые требуют

квалифицированных специалистов для их обслуживания и расшифровки результатов контроля.

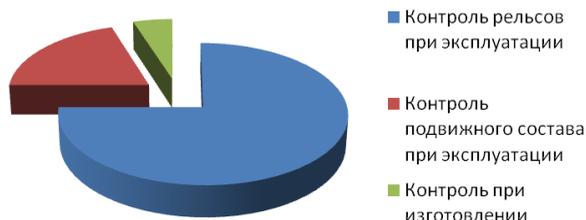


Рис. 1. Распределение специалистов по НК

Следует отметить, что система НК рельсов при эксплуатации в России, в отличие от традиционного для мировой практики сплошного контроля рельсов мобильными средствами НК (вагонами-дефектоскопами или дефектоскопными автомотрисами) и выборочного контроля по их показаниям, включает также сплошной контроль рельсов двухниточными съёмными дефектоскопами и контроль сварных стыков, что приводит к резкому увеличению количества персонала, занятого НК рельсов в процессе эксплуатации. Поскольку полностью автоматизированные системы НК применяются лишь при изготовлении ПЖН и при контроле рельсов мобильными средствами, характерной особенностью НК ПЖН является большая доля ручного контроля, что также предъявляет повышенные требования к квалификации персонала.

Но, несмотря на многочисленность персонала и высокие квалификационные требования, не установлены специальные требования к квалификации персонала по НК, охватывающие все виды ПЖН, сформулированные в нормативных документах или профессиональных стандартах, в отличие от, например, авиации (ГОСТ Р 55252–2012<sup>1</sup>), атомной энергетики (ГОСТ Р 50.05.11–2018<sup>2</sup>), трубопроводного транспорта<sup>3</sup>. Много-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 55252–2012 Воздушный транспорт. Контроль неразрушающий авиационной техники. Квалификация и сертификация персонала. Основные положения.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 50.05.11–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Персонал, выполняющий неразрушающий и разрушающий контроль металла. Требования и порядок подтверждения компетентности.

<sup>3</sup> Профессиональный стандарт 413. Специалист по диагностике линейной части магистральных трубопроводов; Профессиональный стандарт 436. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса

образе видов ПЖН и особенности ее НК не позволяет разработать единый профессиональный стандарт «Специалист по НК ПЖН», а разработанные в последние годы Профессиональные стандарты № 658 «Специалист неразрушающего контроля», № 100 «Работник по контролю за состоянием железнодорожного пути», № 1262 «Специалист по диагностике состояния рельсов и элементов стрелочных переводов железнодорожного пути» предусматривают не все виды деятельности в области НК ПЖН.

Отсутствие специальных нормативных требований, учитывающих особенности НК ПЖН, приводит к тому, что создание и функционирование на железнодорожном транспорте особой системы подготовки персонала по НК, обеспечивающей его необходимую квалификацию, является актуальной задачей.

### **Система подготовки персонала по НК для железнодорожного транспорта**

Система подготовки персонала по НК для железнодорожного транспорта (рис. 2) включает:

- подготовку персонала рабочих профессий. Проводится в учебных центрах и дорожных технических школах железных дорог, колледжах и вузах Федерального агентства железнодорожного транспорта и т.д. на основе программ, утвержденных ОАО «РЖД»;

- подготовку персонала с высшим образованием. Традиционно в России подготовка специалистов с высшим образованием в области НК (как бакалавров, так и магистров) проходит в рамках направления подготовки «Приборостроение» в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами и соответствующими профессиональными стандартами, а также с учетом дополнительных профессиональных компетенций, формулируемых работодателем [1, 2];

- дополнительное профессиональное образование по направлению деятельности, объектам НК, видам и методам контроля осуществляется в двух формах: переподготовка по НК, повышение квалификации.

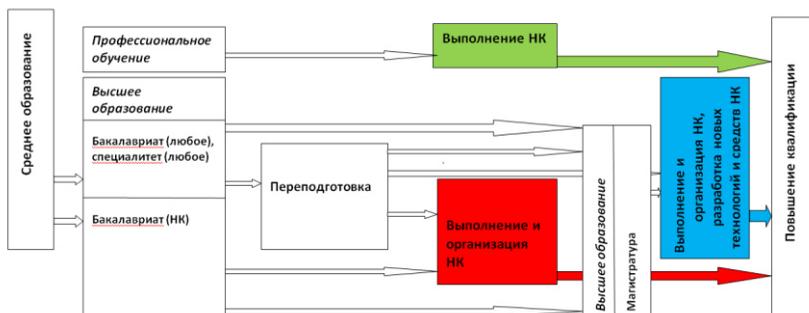


Рис. 2. Система подготовки персонала по НК ПЖН в России

Необходимость и периодичность (1 раз в 3 года – инженерно-технический персонал, 1 раз в 2 года – персонал рабочих профессий) повышения квалификации персонала по НК продукции железнодорожного назначения установлена рядом стандартов, например, ГОСТ 34513<sup>1</sup>, СТО РЖД 11.008<sup>2</sup> и нормативных документов (ПР НК В.1<sup>3</sup>).

Повышение квалификации персонала по НК проводится по программам, которые обычно согласовывает заказчик – функциональные службы дорог, предприятия, производящие ремонт и изготовление продукции транспортного машиностроения.

Таким образом, спецификой подготовки персонала по НК в России является:

- возможность овладения профессией и получения высшего образования в рамках бакалавриата по направлению «Приборостроение», профиль «Приборы и методы контроля качества и диагностики» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом с учетом особенностей НК ПЖН [1, 3];
- периодическое повышение квалификации, необходимость которого определяется рядом нормативных и технологических документов, осуществляемое не только работодателями, но и независимыми от них вузами.

<sup>1</sup> ГОСТ 34513-2018 Система неразрушающего контроля продукции железнодорожного назначения. Общие положения.

<sup>2</sup> СТО РЖД 11.008-2014 Система неразрушающего контроля в ОАО «РЖД» Основные положения.

<sup>3</sup> ПР НК В.1-2012 Правила по неразрушающему контролю вагонов, их деталей и составных частей при ремонте. Общие положения.

Обучение персонала по всем направлениям подготовки для железнодорожного транспорта ведется в 8 вузах, подведомственных Федеральному агентству железнодорожного транспорта, и только в трех из них проводится подготовка персонала с высшим образованием по НК (уровень бакалавриат): Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), и лишь в двух – ПГУПС и ИРГУПС – уровень магистратура.

Поскольку подготовка персонала по НК в указанных трех вузах проводится в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами, то учебные планы подготовки примерно одинаковы и позволяют освоить равный набор компетенций. Дисциплины составляют 210 ЗЕТ из 240 ЗЕТ учебного плана. Остальное время отведено на практики и итоговую аттестацию. Примерное распределение ЗЕТ по модулям дисциплин в ПГУПС приведено на рис. 3 (из модулей исключена физическая культура – 2 ЗЕТ).

Рассмотреть зарубежный опыт такой подготовки бакалавров по НК невозможно, т. к. в европейских университетах подготовка бакалавров по НК отсутствует. Изучение НК в университетах, например, Германии проводится в рамках магистерских программ по машиностроению, строительству, материаловедению и т. д. [4], но только в DRESDEN INTERNATIONAL UNIVERSITY (DIU) существует магистерская программа «Неразрушающий контроль».

На рис. 4 приведено сопоставление программ подготовки магистров по видам учебной нагрузки и количеству зачетных единиц (ЗЕТ). В таблице ниже показано распределение видов занятий по семестрам.

Анализ рис. 4 и таблицы показывает, что за счет более ранней подготовки в области НК (программа бакалавриата) в ПГУПС увеличены ЗЕТ и соответственно продолжительность практик и научно-исследовательской работы при практически полном совпадении номенклатуры изучаемых дисциплин. Также особенностью подготовки магистров в России является то, что работа над магистерской диссертацией начинается еще в первом семестре в рамках проводимой научно-исследовательской работы и практик, поэтому указанное в учебном плане небольшое число ЗЕТ предусмотрено непосредственно для оформления и защиты магистерской диссертации.

Следует также отметить, что особенности НК ПЖН не являются предметом рассмотренной магистерской программы в DIU. Подготовка в рамках промышленного сектора железнодорожный транспорт осуществляется Немецким обществом по неразрушающему контролю в Цен-

тре подготовки в Виттенберге (максимальная длительность подготовки по НК рельсов и стрелочных переводов составляет 65 дней, деталей и составных частей подвижного состава – 37 дней), обязательным условием является наличие соответствующего уровня квалификации по ISO 9712<sup>1</sup>, сертификация в рамках которого в данном докладе не рассматривается.

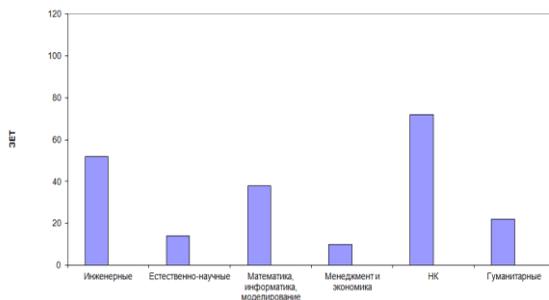


Рис. 3. Распределение ЗЕТ по блокам дисциплин в ПГУПС при подготовке бакалавров

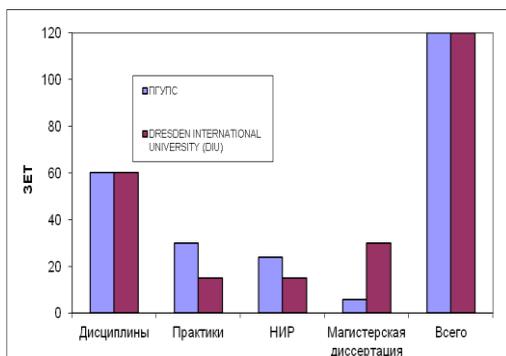


Рис. 4. Сопоставление учебных планов по видам занятий и количеству ЗЕТ

<sup>1</sup> В Российской Федерации действует ГОСТ Р ИСО 9712-2019 Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала.

**Распределение видов занятий по семестрам**

ПГУПС / DIU	Семестр 1	Семестр 2	Семестр 3	Семестр 4
Дисциплины	+/+	+/+	+/	
Практики		+/	+/+	+/
НИР	+/	+/	+/+	+/
Магистерская диссертация				+/+

**Заключение**

Непрерывность, качество и соответствие современным требованиям подготовки персонала НК продукции железнодорожного назначения обеспечивается системой подготовки персонала рабочих профессий по программам, согласованным заказчиками, подготовки персонала с высшим образованием в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом и дополнительным профессиональным образованием, осуществляемым также с учетом требований действующих нормативных документов и заказчиков.

**Список литературы**

1. *Дымкин, Г. Я.* Гармонизация требований образовательных и профессиональных стандартов при подготовке персонала / Г. Я. Дымкин, В. Н. Коншина // Современное образование: содержание, технологии, качество : материалы XXV Междунар. науч.-метод. конф. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 540–544.
2. Трансформация инженерного образования / А. П. Ледаев, И. Г. Морчиладзе, М. М. Соколов, А. П. Кузнецов. – Москва : ВИНТИ РАН, 2012. – 447 с.
3. *Титова, Т. С.* Отражение требований государственных стандартов в дипломных и курсовых проектах : метод. пособие / Т. С. Титова. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2007. – 36 с.
4. *Boller, C.* International academic education in NDT at master level // Book of Abstracts 19th World Conference on Non-Destructive Testing 13–17 June 2016, Munich, Germany, p.110.

G. Y. Dymkin, DSc in engineering, professor  
B. N. Konshina, CSc in engineering, associate professor  
L. A. Yurchenko, postgraduate student  
E-mail: [mpnk@pgups.ru](mailto:mpnk@pgups.ru)  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
St. Petersburg, Russian Federation

## **Personnel Training for Non-destructive Testing of Railway Products**

*The system of personnel training is formed on the railway transport to provide qualified personnel for non-destructive testing, including education according to basic and additional educational programs, professional training. In accordance with the requirements of employers, some of which are sorted out in Standard GOST 34513, the main emphasis in this system is placed on mastering and developing technologies for non-destructive testing of specific objects - elements of the infrastructure, parts and components of the rolling stock.*

**Keywords:** non-destructive testing, railway products, professional education, training directions 12.03.01, 12.04.01 “Instrumentation”.

УДК 620.179.16

*В. С. Егоров*, магистрант  
*Р. Р. Хасанов*, аспирант  
E-mail: [skillet2828@mail.ru](mailto:skillet2828@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Методика расчета коэффициента отражения с учетом физических свойств объекта контроля**

*Предложена методика расчета коэффициента отражения с учетом отличий физических свойств композитной арматуры и искусственного отражателя. Рассчитано максимальное значение коэффициента отражения в зависимости от геометрических размеров искусственного отражателя и объекта контроля. Рассмотрено отличие между подходами расчета коэффициента отражения в зависимости от свойств искусственного отражателя.*

**Ключевые слова:** композитная арматура, волноводный метод, акустический контроль, коэффициент отражения, линейно-протяженный объект, искусственный отражатель.

### **Введение**

Развитие строительного рынка привело к активному внедрению новых материалов в процесс армирования бетонных сооружений. Одним из таких материалов стала композитная арматура, представленная неметаллическими стержнями из углеродных, базальтовых, стеклянных или армидных волокон, пропитанных полимерным связующим. Новизна материала является причиной недостаточного количества методик неразрушающего контроля. В связи с тем, что арматура является линейно-протяженным объектом, длина волны в котором многократно превышает его поперечные размеры, проведение неразрушающего контроля представляется возможным с помощью волноводного акустического метода [1–7]. Для повышения точности контроля производится настройка аппаратуры. Одним из способов калибровки акустического дефектоскопа является его настройка по стандартным образцам [8], и для реализации волноводного контроля композитной арматуры можно использовать тот же подход, настраивая аппаратуру по настроечному образцу с дефектом. Целью данной работы является разработка методики расчета одного из важнейших параметров волноводного акустического контроля – коэффициента отражения. Коэффициент отражения позволяет описать распространение стержневой волны в волноводе и оценить

уровень сигнала от искусственного отражателя. По его рассчитанным значениям можно найти такие значения геометрических и физико-технических параметров, при которых амплитуда этого сигнала будет максимальной [9–12]. Настрочный образец представляет собой пруток композитной арматуры с нанесенным на поверхность искусственным отражателем. Его геометрические размеры, такие как высота и длина, будут непосредственным образом влиять на амплитуду акустического сигнала. Для удобства исполнения, искусственный отражатель в поперечном сечении имеет форму прямоугольника на круглом сечении. На рисунке представлен внешний вид нанесенного дефекта (рис. 1).

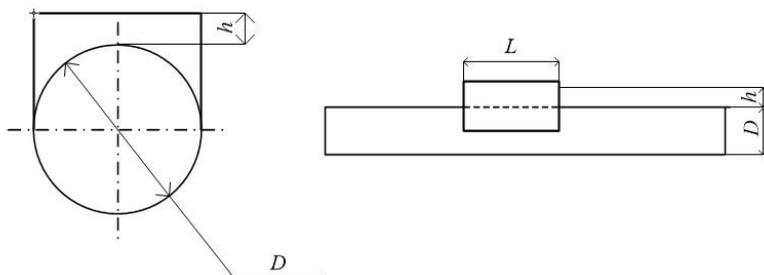


Рис. 1. Внешний вид искусственного отражателя:

$h$  – высота искусственного отражателя,  $D$  – диаметр объекта контроля,  
 $L$  – протяженность искусственного отражателя

### Коэффициент отражения

В ходе распространения акустического импульса по волноводу, наблюдается потеря энергии волны, обусловленная ее отражением от дефекта и неоднородностей непосредственно в объекте контроля [13]. Коэффициент отражения формируется из отношения интенсивности отраженного акустического импульса к интенсивности волны, падающей на границу раздела, между объектом контроля и дефектом. Он зависит от акустических волновых сопротивлений сред [14]. Расчет коэффициентов отражения и прохождения осложняется тем, что искусственный отражатель отличается по плотности и скорости стержневой волны от объекта контроля [15]. В связи с этим необходим вывод этих формул.

Объект контроля с нанесенным на поверхность искусственным отражателем можно рассматривать как систему, состоящую из 3 частей (рис. 2):

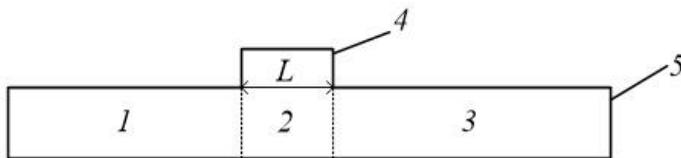


Рис. 2. Распределение зон изменения коэффициента отражения в объекте контроля: 1, 2, 3 – зоны изменения коэффициента отражения и прохождения, 4 – тело дефекта, 5 – тело объекта контроля,  $L$  – линейная протяженность искусственного отражателя

Так как объект контроля с искусственным отражателем является сложной системой, вывод формулы происходит для каждой зоны, в которой изменяются параметры, влияющие на коэффициент отражения.

Значения коэффициента отражения при переходе из зоны 2 в зону 3 рассчитываются по формуле [16]

$$R_{23} = \frac{Z_l - S_2 \rho_2 C_2}{Z_l + S_2 \rho_2 C_2}, \quad (1)$$

где  $Z_l$  – входной импеданс в зоне 3;  $\rho_2$  – плотность в зоне 2;  $C_2$  – скорость распространения стержневой волны в зоне 2.

Входной импеданс в зоне 2 вычисляется по формуле [16]

$$Z_l = (S_2/S)^2 * (S\rho C + i\omega M), \quad (2)$$

где  $S_2$  – площадь поперечного сечения объекта контроля и искусственного отражателя;  $S$  – площадь поперечного сечения объекта контроля;  $\rho$  – плотность объекта контроля;  $C$  – скорость стержневой волны в объекте контроля;  $i$  – мнимая единица;  $\omega$  – циклическая частота;  $M$  – присоединенная масса.

Так как значения площади поперечного сечения зоны 2 и 3 не сильно различаются, присоединенной массой можно пренебречь. В связи с этим формула для входного импеданса в зону 2 принимает вид:

$$Z_l = \frac{S_2^2 * \rho * C}{S}. \quad (3)$$

Импеданс на входе в зону 2 рассчитывается по подобию с входным импедансом в плоский слой между двумя плоскостями [16]:

$$Z_{\text{вх}2} = \rho_2 C_2 S_2 * \frac{e^{-ikl} + R_{23} * e^{ikl}}{e^{-ikl} - R_{23} * e^{ikl}}, \quad (4)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны;  $l$  – линейная протяженность дефекта.

Комплексная экспонента может быть расписана как

$$e^{ix} = \cos(x) + i\sin(x). \quad (5)$$

Зная это, формула (4) принимает следующий вид:

$$Z_{\text{вх}2} = \rho_2 C_2 S_2 * \frac{\cos(kl) - i\sin(kl) + R_{23}(\cos(kl) + i\sin(kl))}{\cos(kl) - i\sin(kl) - R_{23}(\cos(kl) + i\sin(kl))}. \quad (6)$$

Соответственно акустический импеданс рассчитывается как:

$$Z_{\text{а вх}2} = \frac{\rho_2 C_2}{S_2} * \frac{\cos(kl) - i\sin(kl) + R_{23}(\cos(kl) + i\sin(kl))}{\cos(kl) - i\sin(kl) - R_{23}(\cos(kl) + i\sin(kl))}. \quad (7)$$

Произведение волнового числа может быть расписано как

$$kl = \frac{2\pi l}{\lambda} = \frac{2\pi f l}{C} = \frac{\omega l}{C}, \quad (8)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $C$  – скорость распространения стержневой волны в зонах 1 и 3.

Коэффициент отражения при прохождении волны из зоны 1 в зону 2 вычисляется по входному импедансу в эту зону 2 и механическому импедансу в зоне 1:

$$R = R_{12} = \frac{Z_{\text{а вх}2} - (\rho c/S)}{Z_{\text{а вх}2} + (\rho c/S)}. \quad (9)$$

При условии идентичности материалов объекта контроля и искусственного отражателя формула (9) принимает вид:

$$R = \frac{\cos(kl) (1 - S_{31}) + i\sin(kl)(S_{21} - S_{32})}{\cos(kl) (1 + S_{31}) - i\sin(kl)(S_{21} + S_{32})}, \quad (10)$$

где  $S_{31} = S_3/S_1 = 1$  (площадь поперечного сечения зоны 1 и зоны 3 одинакова),  $S_{21} = S_2/S$ ,  $S_{32} = S/S_2$ .

Взяв модуль комплексного числа, формула для коэффициента отражения принимает вид:

$$R = \frac{\frac{S_2^2 - S^2}{S * S_2} * \sin(kl)}{\sqrt{4(\cos(kl))^2 + \sin(kl)^2 * \frac{(S_2^2 + S^2)^2}{S^2 S_2^2}}}, \quad (11)$$

$$R = \frac{(S_2^2 - S^2) * \sin\left(\frac{\omega l}{C}\right)}{\sqrt{4\left(\cos\left(\frac{\omega l}{C}\right)\right)^2 * S^2 S_2^2 + \sin\left(\frac{\omega l}{C}\right)^2 * (S_2^2 + S^2)^2}} \quad (12)$$

Далее с использованием выведенных формул произведен расчет коэффициентов отражения с учетом однородности и неоднородности материалов искусственного отражателя и объекта контроля. Основные геометрические и физико-технические параметры, необходимые для выполнения расчетов, представлены в таблице.

#### Основные геометрические и физико-технические параметры

Параметр	Значение
Диапазон высот искусственного отражателя, мм	0...2
Линейная протяженность искусственного отражателя, мм	0...120
Плотность объекта контроля, кг/м <sup>3</sup>	2170
Плотность искусственного отражателя, кг/м <sup>3</sup>	1700
Скорость стержневой волны в объекте контроля, м/с	5034

#### Влияние параметров искусственного отражателя на коэффициент отражения

Используя полученные ранее формулы, построена частотная зависимость коэффициента отражения из учета физических свойств искусственного отражателя и объекта контроля. При этом диаметр прутка составлял 8 мм, высота дефекта 1 мм, длина дефекта 40 мм. Также получена зависимость коэффициента отражения от линейной протяженности дефекта при различных значениях высот (рис. 3).

Частотная характеристика коэффициента отражения является периодической функцией. Пиковые значения коэффициентов, заданных одинаковыми и разными материалами искусственного отражателя, по частотной оси совпадают и наблюдаются через каждые 487 кГц. При этом максимальное значение коэффициента отражения из учета неоднородности материала в 1,09 раза больше, нежели при условии идентичности физических свойств дефекта и объекта контроля.

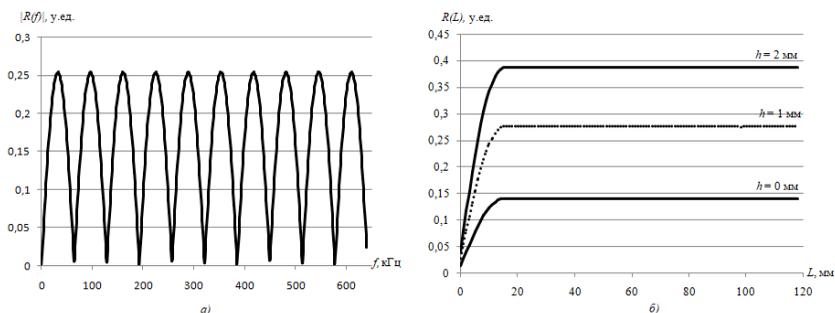


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения  $R(f)$  от частоты  $f$ :  
*а* – частотная зависимость коэффициента отражения при однородности материалов искусственного отражателя и объекта контроля; *б* – зависимость коэффициента отражения  $R(L)$  от протяженности искусственного отражателя при разных высотах  $h$

При увеличении протяженности искусственного отражателя увеличивается и максимальное значение коэффициента отражения. Заметное возрастание значений коэффициента отражения наблюдается при значениях длины дефекта от 0 до 13 мм. В дальнейшем максимум отражения меняется незначительно, что говорит о постоянстве функции. Так же при увеличении высоты искусственного отражателя заметно увеличиваются и значения коэффициента отражения.

В расчете коэффициента отражения учитываются геометрические размеры искусственного отражателя. На рис. 4 представлено соотношение максимальных значений коэффициента отражения  $R(h)$  (из учета однородности и неоднородности материалов искусственного отражателя и объекта контроля) от перепада сечения при изменении высоты искусственного отражателя.

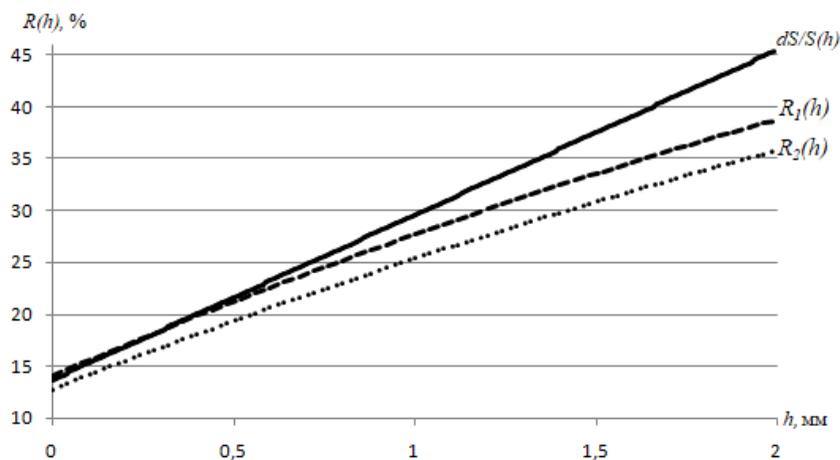


Рис. 4. Отношение максимумов коэффициентов отражения при условии однородности и неоднородности материала и прирост площади в зависимости от высоты искусственного отражателя:  $dS/S(h)$  – прирост площади,  $R_1(h)$  – максимум коэффициента отражения с учетом неоднородности искусственного отражателя и объекта контроля,  $R_2(h)$  – максимум коэффициента отражения с учетом однородности материалов

Максимальные значения коэффициента отражения  $R_1(h)$  в зоне малых высот искусственного отражателя  $h$  совпадают со значениями прироста площади  $ds/S(h)$ , тогда как максимум коэффициента отражения идентичных материалов меньше на 1,17 %. С увеличением высоты искусственного отражателя растет расхождение максимальных значений коэффициента отражения  $R_1(h)$  и  $R_2(h)$  относительно прироста площади: 6,69 % и 9,58 % соответственно.

## Выводы

По результатам работы можно сделать вывод о поведении коэффициента отражения в зависимости от параметров объекта контроля. Так, подобрав значения геометрических и физико-технических параметров, можно добиться максимального значения отражения от искусственного отражателя, что позволит настроить дефектоскоп на отбраковку дефектных образцов по выбранному значению уровня дефекта относительно амплитуды донного импульса.

*Работа выполнена в рамках проекта №FZZN-2020-0011 (Исследование динамики и разработка алгоритмов управления мобильных роботов) по Государственному заданию Министерства образования и науки.*

### Список литературы

1. Пат. 2688877 RU, МПК G01N 29/04(2006.01), С1. Способ определения прочностных характеристик полимерных композиционных материалов : № 2018117638 : заявл. 1105. 2018 : опубл. 22.05.2019 / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов.
2. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 78–88. – DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88.
3. Неразрушающий контроль композитной полимерной арматуры / А. В. Бучкин, В. Ф. Степанова, В. А. Стрижак, Е. Ю. Юрин, Е. И. Никишов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – № 1 (24). – С. 23–35.
4. Влияние водопоглощения на скорость распространения нормальных волн в композитной арматуре / О. В. Муравьева, Р. Р. Хасанов, В. А. Стрижак, С. С. Мкртчян, М. В. Сяктерев // SIBTEST – 2019 : сб. тез. докл. V Междунар. конф. по инновациям в неразрушающем контроле. – Томск, 2019. – С. 67–68.
5. Water absorption effect on the propagation velocity of normal waves in composite rebars / O. V. Muravieva, R. R. Khasanov, V. A. Strizhak, S. S. Mkrтчyan // Materials Science Forum. – 2019. – Т. 970. – Pp. 202-209.
6. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 110–115.
7. Импульсный метод измерения скорости ультразвука / Г. А. Буденков, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Г. А. Полянкин, Я. Ю. Коршунов, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 1998. – № 9. – С. 3–8.
8. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Т. 3 / В. В. Клюев, И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – Москва : Машиностроение, 2004. – 864 с.
9. Михайлов, С. Е. Особенности расчета информативных параметров для волноводного метода акустического контроля / С. Е. Михайлов, В. А. Стрижак, С. С. Мкртчян // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 259–265.
10. Муравьева, О. В. Влияние регулярных перепадов сечения на контролепригодность прутка при контроле акустическим волноводным методом / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. С. 41–49.

11. Буденков, Г. А. Акустика затрубного пространства добывающих и нагнетательных скважин / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, В. А. Стрижак // Дефектоскопия. – 2003. – № 8. – С. 3–10.

12. Муравьева, О. В. Оценка чувствительности метода акустической рефлектометрии к дефектам теплообменных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2017. – № 3. – С. 27–34.

13. Лебедева, Т. Н. Разработка методов акустического контроля прутков из инструментальной стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. – Ижевск : Изд-во СО РАН, 2004. – 20 с.

14. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин // Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. – 234 с.

15. Стрижак, В. А. Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры / В. А. Стрижак // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. С. 5–15.

16. Акустика в задачах : учеб. рук-во для вузов / под ред. С. Н. Гурбатова и О. В. Руденко. – Москва : Наука. Физматлит, 1996. – 336 с.

V. S. Egorov, magister student

R. R. Khasanov, postgraduate student

E-mail: [skillet2828@mail.ru](mailto:skillet2828@mail.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Method for Calculating the Reflection Coefficient Taking into Account the Physical Properties of the Test Object**

*A method for calculating the reflection coefficient is proposed, taking into account the differences in the physical properties of composite reinforcement and artificial reflectors. The maximum value of the reflection coefficient is calculated depending on the geometric dimensions of the artificial reflector and the object of testing. The difference between the approaches for calculating the reflection coefficient depending on the properties of an artificial reflector is considered.*

**Keywords:** composite reinforcement, waveguide method, acoustic testing reflection coefficient, linear-extended objects, artificial reflector.

УДК 640.179.16

С. В. Казанцев<sup>1</sup>, аспирант

E-mail: sergokazancev@mail.ru

В. В. Муравьев<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой

E-mail: pmkk@istu.ru

А. В. Андреев<sup>1</sup>, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», г. Ижевск

## Распространение ультразвуковой головной волны в эксплуатируемых рельсовых плетях

*Представлены тезисы к экспериментальным данным исследования скорости головной волны, распространяющейся в рельсовой плети, содержащей 4 сварных соединения, выполненных электроконтактной сваркой, и дефекты типа вертикального износа головки, образованные из-за недостаточной прочности металла. Скорость головной волны значительно уменьшается в месте стыка рельсов и имеет пик при удалении от него. Скорость головной волны в области дефектов имеет максимальное значение в центре и провалы при удалении от него на 100 мм в продольном направлении рельса в обе стороны. Для возбуждения головной волны в рельсах использовался П-образный ультразвуковой преобразователь с встречно расположенными излучателем и приемником на расстоянии 72 мм.*

**Ключевые слова:** головная ультразвуковая волна, первый критический угол, сварное соединение рельсов, скорость ультразвука, бесстыковой путь.

### Введение

Бесстыковой путь в современном мире все более востребован в связи с его преимуществами над звеньевым путем. Использование бесстыкового пути приводит к снижению затрат на содержание рельсов, на материалы, необходимые для скрепления рельсов, и на тяговое усилие поездов за счет снижения сопротивления движению. Но отсутствие стыков приводит к возникновению температурных напряжений.

Для контроля механического состояния металлоконструкций активно применяется измерение скорости головной волны из-за ее чувствительности, например, к одноосным напряжениям (в 2,7 раза выше по сравнению с поперечной волной для стали 30) [1]. В работах [2, 3] применяются лазерные источники и пьезоэлектрические приемники для контроля напряженного состояния рельсовых плетей бесстыкового пу-

ти. Применение данного метода позволяет достичь точности измерения скорости головной волны до 2 м/с.

С целью исследования распространения головных волн в области сварных соединений и дефектов рельсов был проведен эксперимент по возбуждению головных волн в эксплуатирующейся рельсовой плети с двумя дефектами типа «смятие и вертикальный износ» и четырьмя сварными стыками.

### Основная часть

В ходе исследования были сняты осциллограммы головной волны по длине стометровой рельсовой плети через каждый метр, сигналы в зоне четырех сварных стыков и в зоне двух дефектов типа 41.2 «смятие и вертикальный износ», образованных из-за недостаточной прочности металла. Для возбуждения и приема волны использовался ультразвуковой дефектоскоп DIO1000 PA и П-образный раздельно-совмещенный ультразвуковой преобразователь, излучатель и приемник которого наклонены встречно под углом  $27^\circ$  к плоскости контролируемого изделия, резонансная частота преобразователя 2,5 МГц.

Скорость головной волны вычислялась с помощью измерения разности временной задержки волны в стандартном образце СО-2 и в рельсе по формуле [4]

$$C_{\text{ГОЛ}} = \frac{b}{\left( \frac{b}{C_{\text{СО-2}}} - \Delta t \right)}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{ГОЛ}}$  – скорость головной волны в образце;  $b$  – база прозвучивания преобразователя;  $C_{\text{СО-2}}$  – скорость распространения головной волны в стандартном образце СО-2;  $\Delta t$  – разность времени пробега головной волны в рельсе и в СО-2.

При проведении эксперимента значение скорости головной волны в СО-2 принято за 5900 м/с. Случайная погрешность измерений составила не более 5 м/с [5]. Используемый в работе способ измерения скорости не позволяет найти абсолютное значение скорости в связи с трудностью определения точки выхода преобразователя головной волны, что приводит к получению постоянной погрешности, связанной с определением скорости в эталонном образце (СО-2). Для определения абсолютного значения скорости предлагается использовать измерения скорости головной волны с помощью акустического излучателя и двух разнесенных

пьезоприемников на основе разности временных пробежек от излучателя до первого приемника и от излучателя до второго приемника [6].

Скорость головной волны по длине рельса изменяется скачкообразно от 5890 м/с до 5935 м/с.

В зоне сварного соединения минимальная скорость наблюдается непосредственно в стыке свариваемых рельсов и составляет от 5870 м/с до 5890 м/с для разных стыков. При удалении от стыка на 70–90 мм скорость головной волны увеличивается на 50–70 м/с. При этом П-образным преобразователем измеряется время распространения головной волны на участке 72 мм (база прозвучивания преобразователя).

В области дефектов рельсов типа 41.2 «смятие и вертикальный износ» протяженностью 400 мм максимальная скорость ультразвуковой головной волны наблюдается в центре дефекта. Она примерно на 40 м/с превышает среднюю скорость головной волны по длине рельса. При удалении от центра дефекта на 100 мм в обе стороны по длине рельса скорость головной волны уменьшается на 80–100 м/с, а через 200 мм достигает средней скорости по длине рельса. Такое изменение скорости может быть связано с неравномерностью механических свойств по высоте рельса, полученных в результате термообработки, и с накоплением микродефектов в зоне вертикального износа рельсов.

## Выводы

В ходе исследования была измерена скорость ультразвуковой головной волны в эксплуатирующейся стометровой рельсовой плети. Скорость головной волны по длине рельса изменяется скачкообразно от 5890 м/с до 5935 м/с, что может говорить о неравномерном распределении напряженного состояния.

В зоне сварного соединения минимальная скорость наблюдается непосредственно в стыке свариваемых рельсов и составляет от 5870 м/с до 5890 м/с для разных стыков. При удалении от стыка на 70–90 мм скорость головной волны увеличивается на 50–70 м/с.

В области вертикального износа головки рельса максимальная скорость ультразвуковой головной волны наблюдается в центре дефекта. При удалении от дефекта на 100 мм влево и вправо скорость головной волны уменьшается на 80–100 м/с, а через 200 мм достигает средней скорости по длине рельса.

Данная работа может найти применение в неразрушающем контроле дефектов рельсов типа смятия и вертикального износа и сварных соединений бесстыкового пути.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ Бел-а (проект № 20-58-0015) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследования акустических свойств материалов и изделий».*

### Список литературы

1. *Алешин, Н. П.* Современные информационные автоматизированные системы акустического контроля сварки / Н. П. Алешин // Автоматическая сварка. – 2013. – № 10-11 (726). – С. 67–71.
2. Использование эффекта акустоупругости с применением лазерных источников и пьезоэлектрических приемников ультразвука для неразрушающего контроля напряженного состояния рельсовых плетей бесстыкового пути / О. А. Суслов, А. А. Новиков, А. А. Карабутов, Н. Б. Подымова, А. Н. Жаринов, В. А. Симонова // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 1 (49). – С. 32–43.
3. Лабораторные экспериментальные исследования макета прибора ультразвукового контроля напряжений в рельсовых плетях / О. А. Суслов, А. А. Новиков, А. А. Карабутов, Н. Б. Подымова // Наука и образование транспорту. – 2015. – № 1. – С. 237–241.
4. *Муравьев, В. В.* Распределение остаточных напряжений и скорости головной волны в рельсах / В. В. Муравьев, А. В. Якимов, С. В. Казанцев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 370–376.
5. ГОСТ Р 55724–2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – Введ. 2015-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 28 с.
6. *Карабутов, А. А.* Определение одноосных напряжений в стальных конструкциях лазерно-ультразвуковым методом / А. А. Карабутов, Н. Б. Подымова, Е. Б. Черепецкая // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58, № 3 (343). – С. 146–155.

*S. V. Kazantsev*<sup>1</sup>, postgraduate student

E-mail: [sergokazantsev@mail.ru](mailto:sergokazantsev@mail.ru)

*V. V. Murav'ev*<sup>1,2</sup>, DSc in engineering, professor, head of department

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

*A. V. Andreev*<sup>1</sup>, postgraduate student

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

### **Propagation of Ultrasonic Creep Wave in Operated Continuously Welded Rail**

*Theses are presented to the experimental data on the study of the speed of the creep wave propagating in a hundred-meter continuously welded rail containing a welded joint made by electrocontact welding, and defects such as vertical wear of the*

*head formed due to insufficient durability. The speed of the creep wave decreases significantly at the junction of the rails and has a peak with distance from it. The speed of the creep wave in the area of defects has a maximum value in the center and dips at a distance of 100 mm from it to the left and to the right along the length of the rail. To excite the creep wave in the rails, a U-shaped ultrasonic transducer was used with an oppositely located emitter and receiver at a distance of 72 mm.*

**Keywords:** ultrasonic creep wave, first critical angle, rail weld, ultrasound speed, continuous welded rail.

УДК 577.31, 519.722, 599.323.45, 53.097

Д. С. Лаптев<sup>1</sup>, аспирант  
С. Б. Егоркина<sup>1</sup>, д-р мед. наук, доц.  
В. А. Степанов<sup>2</sup>, канд. техн. наук  
E-mail: vladimirl@udm.ru  
В. В. Белых<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.  
Ш. Н. Худойкулова<sup>3</sup>, ст. преподаватель

<sup>1</sup> Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Россия

<sup>2</sup> Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

<sup>3</sup> Самаркандский государственный медицинский институт,  
Самарканд, Узбекистан

## **Оценка функционального состояния жизнедеятельности организма на основе мультифрактального анализа изменений тканей роговицы под воздействием вращающегося электрического поля**

*В работе приведены результаты мультифрактальной параметризации оцифрованных изображений гистологических срезов роговицы экспериментальных животных с различным психотипом поведения, подвергнутых воздействию вращающегося электрического поля в течение десяти и двадцати дней. Установлены количественные оценки жизнедеятельности организма на основе обобщенных размерностей Реньи и по критерию степени организованности динамических состояний структуры тканей роговицы экспериментальных животных на основе статистического описания её состояний в «норме».*

**Ключевые слова:** психотип, мультифрактал, энтропия, относительная организованность, норма хаотичности, самоорганизация.

### **Введение**

Результаты исследования влияния вихревого электрического поля (ВЭП) на репродуктивную систему самок крыс отмечают структурные изменения плаценты, задержку развития плода и повышение частоты эмбриональной смертности [1].

Для описания природных материалов перспективным является мультифрактальный формализм, статистическая и информационная физика, теория симметрии [2, 3]. Методология мультифрактальной параметризации является способом количественного описания наблюдаемых

структур материалов и описывается спектром обобщенных размерностей Реньи  $D_q$  [4, 5].

Информация остается практически неизменной до тех пор, пока не изменятся свойства симметрии. С понятием энтропии и информации развиваются теоретические представления о «порядке» и «организации» сложных систем в материаловедении. Рост сложности системы происходит за счет увеличения разнородных элементов и связей между ними, на математическом уровне сложность связана с нелинейностью, что вносит элемент неопределенности в поведение системы. Неоднозначность стресс-реакции функциональной системы организма животного на воздействие ВЭП изучалось на основе мультифрактальной параметризации структуры тканей роговицы крысы в работе [6]. На физическом уровне хаотическое поведение сложной системы описывается в статистических терминах: плотность вероятности, корреляция, математическое ожидание, дисперсия и т. д. [7].

Энтропия в физической системе возникла для оценки перехода тепловой энергии в механическую как мера хаотичности (неопределенности) движения молекул. Л. Больцман характеризует энтропию как недостающую информацию в системе и приводит выражение энтропии

$$S = k_B \ln K, \quad (1)$$

где  $K$  – статистический вес макросостояния системы;  $k_B$  – постоянная Больцмана. К. Шенон раскрыл математический смысл энтропии как меры неопределенности некоторой ситуации [8], что позволяет связать информацию и структуру. Информация появляется только после необходимого числа испытаний, а до опыта она является энтропией. Информация, получаемая при выявлении реализации, численно равна первоначальной (до опыта) энтропии  $H = \ln K$ .

Впервые особенности функционирования биологических систем разного уровня и закономерности кодирования и преобразования биологической информации рассматривались в работе И. И. Шмальгаузе-на [9].

Для характеристики меры сложности системы У. Эшби впервые предложил понятие энтропии, поскольку энтропия возрастает с ростом числа возможных исходов  $K$  и является аддитивной величиной [10].

При оценке энтропии учитывается абсолютное количество состояний и вероятность (или частота выборки), с которой система принимает то или иное состояние:

$$H = -\sum_i^k P_i \log_2 P_i, \quad (1)$$

где  $P_i$  – вероятность (или частота) того, что система примет  $i$ -е состояние из  $K$  возможных [11]. Максимум энтропии достигается в случае, когда все состояния равновероятны  $H_{\max} = -\log_2 K$ . Для единственного состояния системы с вероятностью равной 1 энтропия равна нулю.

В процессе самоорганизации системы переход от менее упорядоченного к более упорядоченному состоянию сопровождается изменением энтропии от  $H_{\max}$  до нуля.

Механизмы хаотической динамики лежат в основе диагностического подхода к анализу моделей функциональных систем, а принципы самоорганизации лежат в основе их регулирования: феномен гомеостатической смену режимов управления при определенной «норме хаотичности» смену режимов управления [12]. Информационная оценка функционального состояния жизнедеятельности и свойств системы основана на вычислении энтропии и характера ее изменения во времени [13, 14].

К энтропийным параметрам относят меру абсолютной организации функциональной системы  $\Delta H = H_{\max} - H$  и величину относительной организованности системы  $R = 1 - H / H_{\max}$  [15]. Функциональная система, согласно классификации С. Бира, является вероятностной (стохастической) системой, если  $R \leq 1$ ; система считается детерминированной, если  $R > 0,3$ . Система, для которой  $0,1 < R \leq 0,3$ , является квазидетерминированной (вероятностно-детерминированной) системой.

Критерий относительной степени хаотичности состояния открытой биологической системы, согласно S-теореме Ю. Л. Климонтович, определяется по отношению к состоянию системы, принятому за «физический хаос», степень хаотичности информационной энтропии какого-либо свойства которого максимальна [16].

Разрабатывая теорию самоорганизации сложных систем, И. Р. Пригожин доказал теорему о неравновесных процессах, исходя из которой установившемуся стационарному процессу соответствует минимальное производство энтропии. Этот принцип позволяет определять активные элементы структуры материала и энтропийные параметры системы [17].

Разработка методов и алгоритмов распознавания структурных изменений, количественных критериев оценки «нормы хаотичности» и степеней отклонений от нее в тканях при различных физиологических и патологических состояниях на растровых изображениях срезов роговицы является актуальной задачей как в научном, так и прикладном значении [18, 19].

## Цель работы

Получить количественные оценки относительной организованности и отклонений от нее в тканях роговицы животных с различной прогностической стрессоустойчивостью при воздействии вращающегося электрического поля.

## Объект и метод исследования

Объектом исследования являлись крысы. С помощью методики «Открытое поле» на кафедре «Нормальная физиология» Ижевской государственной медицинской академии животные делились на три психотипа: устойчивый, неустойчивый, амбивалентный. Ставились эксперименты по воздействию вращающегося электрического поля, изменяющегося по синусоидальному закону с частотой 50 Гц на экспериментальных животных в течение десяти и двадцати дней. После воздействия вращающегося электрического поля роговица глаза забиралась и фиксировалась в соответствии с требованиями гистологических исследований. Оптические изображения гистологических срезов роговицы экспериментальных животных с различным психотипом поведения изучались при увеличении объектива  $\times 10$  и  $\times 20$ .

В результате мультифрактальной параметризации изображений гистологических срезов роговицы устанавливался спектр обобщенных размерностей Реньи  $D_q$ , где параметр  $q$  принимает целочисленные значения от  $-\infty$  до  $+\infty$ . В литературе в качестве минимальной и максимальной разреженности множества ограничиваются рассмотрением  $D_{+40}$  и  $D_{-40}$  при  $q = 40$ . Анализировались структурные параметры:

- $D_1 = -\sum P_i \ln P_i$  – информационная энтропия;
- $D_{40} = \ln(1/P_{\max})$ , где  $P_{\max}$  – относительная представленность доминирующей структурной фазы;
- $D_{-40} = \ln(1/P_{\min})$ , где  $P_{\min}$  – относительная представленность редкого дефекта;
- $D_1 - D_{+40}$  – мера упорядоченности множества;
- $D_{-40} - D_{+40}$  – рассматривается как мера хаотичности.

Информация остается практически неизменной до тех пор, пока не изменятся свойства симметрии системы. Степень неоднородности и неупорядоченности любой системы в материаловедении описывается изменением структурной энтропии:  $\Delta S = \Delta S_{\text{конф}} + \Delta S_{\text{эл}} + \Delta S_{\text{магн}}$ , где  $\Delta S_{\text{конф}}$  – изменение энтропии, обусловленное преобразованиями пространственного расположения активных элементов в структуре,  $\Delta S_{\text{эл}}$  и  $\Delta S_{\text{магн}}$  – связаны с происходящими в системе электрическими и магнит-

ными взаимодействиями. Изучение структурной информации изображения физического объекта в евклидовом трехмерном пространстве позволяет выявить фрактальный принцип построения структуры и получить базовые параметры функциональных свойств материалов. Неравновесные фазовые переходы и переходные процессы адаптации в структуре наблюдаются разномасштабными эффектами, в виде скачков энтропии  $D_1$  и меры хаотичности  $\Delta D = D_{-40} - D_{+40}$  при информационных преобразованиях. Активные элементы структуры проявляют устойчивость относительно малых возмущений масштабного параметра  $q$  при информационных преобразованиях, что дает возможность определить информационную энтропию  $D_{li}$  активных элементов структуры и вычислить обобщенную информационную энтропию структуры материала:  $H = -\sum D_{li} = \ln K$ , где  $K$  – информационная емкость системы. Максимальная физическая энтропия наблюдается в закрытой системе в состоянии равновесности (физический хаос), когда все вероятности равны  $p_i = 1/K$ . В этом состоянии информационная энтропия также максимальна и определяется в битах  $H_{\max} = \log_2 K$ . В состоянии деградации или самоорганизации системы её информационная энтропия возрастает или уменьшается. Анализ изменения меры хаотичности  $\Delta D$  структуры изображения при информационных преобразованиях дает информацию о динамическом состоянии открытой системы: максимумам  $\Delta D_i$  соответствуют состояния активных элементов структуры с максимальной информационной энтропией  $i$ -го состояния  $D_{li}^*$ . Масштабы проявления хаоса выражают масштабы взаимодействия элементов структуры, дальний или ближний порядок, что связано с пространственным, конфигурационным изменением структурных элементов и оценивается конфигурационной энтропией  $H^* = \sum D_{li}^*$ , т. е. оценкой накопленного хаоса в структуре.

Мера абсолютной  $\Delta H = H_{\max} - H$  и относительной организованности структуры тканей роговицы животного  $R = 1 - H/H_{\max}$  позволяет оценить динамическое состояние структуры (динамический хаос) по отношению к равновесному состоянию «физического хаоса», при котором теряются функциональные свойства материала. В качестве «нормы хаотичности» рассматривается степень хаотичности состояния «здоровых» биологических объектов, которая дополнительно по отношению к относительной организованности, поскольку степень хаотичности выражается как разность  $S = 1 - R$ .

## Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приводятся энтропийные параметры структуры тканей ро­говицы контрольных животных при разных увеличениях. Абсолютные меры организованности функциональных систем тканей ро­говицы жи­вотных 3к10 и 6к20 близки, относительные оценки организованности систем  $R$  заметно отличаются. Функциональная система тканей ро­говицы животного 8к20 обладает наименьшими энтропийными параметра­ми. Согласно классификации С. Бира, функциональная система тканей ро­говицы детерминированная, динамическое состояние структуры тка­ней ро­говицы контрольных (здоровых) животных определяется как де­терминированный хаос.

**Таблица 1. Информационно-энтропийные параметры состояния структуры тканей ро­говицы контрольных животных**

Увеличение	Крыса №	$H = \sum D_{ji}$	$H_{\max}$	$H^*$	$\Delta H$	$R$
×10	3к10	5,15	7,48	0,57	6,91	0,924
	6к20	6,95	10,06	3,28	6,78	0,674
×20	8к20	6,76	9,79	6,05	3,74	0,380

У крысы 3к10 при увеличении ×10 обобщенная информационная эн­тропия  $H = \sum D_{ji} = 5,15$ . Максимальная информационная энтропия равна  $H_{\max} = 7,48$ , конфигурационная энтропия незначительна  $H^* = 0,57$ . При увеличении ×20 у контрольной крысы 6к20 обобщенная информаци­онная энтропия  $H = \sum D_{ji} = 6,95$ , максимальная информационная энтропия  $H_{\max} = 10,06$ . У контрольной крысы 8к20 обобщенная информаци­онная энтропия  $H = \sum D_{ji} = 6,76$ , максимальная информационная энтропия  $H_{\max} = 9,79$ . Высокий уровень конфигурационной энтропии  $H^* = 6,05$  свидетельствует о том, что часть активных элементов структуры дос­тигла своего максимума информационной энтропии. Можно констати­ровать, что состояние глубоких слоев тканей ро­говицы здоровых жи­вотных имеет меньшую организованность.

Состояние организма здоровых животных, в соответствии с Ю. Л. Климонтович, может определяться относительной организо­ванностью динамического состояния структуры ро­говицы  $\Delta R = 0,380 \dots 0,924$ .

В табл. 2 приводятся энтропийные параметры структуры тканей ро­говицы животных с устойчивым психотипом при разных увеличениях и длительности воздействия.

**Таблица 2. Информационно-энтропийные параметры состояния структуры тканей роговицы животных с устойчивым психотипом**

Крыса №	Увеличение	$H = \sum D_{ji}$	$H_{\max}$	$H^*$	$\Delta H$	$R$
10 дней ВЭП						
8.03.17.10	10	8,2	11,87	0,665	11,2	0,944
8.03.17.20	20	5,74	8,31	0,537	7,77	0,935
20 дней ВЭП						
14ГЭ10	10	6,65	9,63	7,58	2,05	0,21
13ГЭ20	20	5,27	7,63	8,03	-0,4	-0,05

После 10 дней воздействия ВЭП оценки относительной организованности функциональной системы тканей роговицы животного с устойчивым психотипом близки и незначительно превышают «норму организованности». Функциональная система остается детерминированной, в структуре наблюдается детерминированный хаос.

После 20 дней воздействия ВЭП при увеличении  $\times 10$  оценка организованности системы  $R = 0,21$ , функциональная система тканей роговицы животного 14ГЭ10 становится квазидетерминированной, в структуре вероятностно-детерминированный хаос. У животного 13ГЭ20 при увеличении  $\times 20$  мера организованности абсолютная и относительная отрицательны, очевидно, оценки в пределах погрешности близки нулю. Функциональная система тканей стохастическая, в структуре наблюдается стохастический хаос.

В масштабе наблюдений роговицы при увеличении  $\times 10$  в структуре тканей роговицы в интервале длительности воздействия от 10 ВЭП до 20 ВЭП происходит смена режима функционирования и изменяются функциональные свойства системы тканей при  $R_{кр} = 0,3$ . Возникает переход от детерминированной к квазидетерминированной функциональной системе тканей роговицы. В масштабе наблюдений роговицы при увеличении  $\times 20$  в структуре роговицы произошло дважды изменение функциональных свойств и функциональной системы тканей при  $R_{кр} = 0,3$  и  $R_{кр} = 0,1$ .

Обобщенная и максимальная информационная энтропии, абсолютная и относительная организованность структуры роговицы снижаются. Возрастает конфигурационная энтропия, т. е. накопление хаотичности в структуре роговицы.

В табл. 3 приводятся энтропийные параметры структуры тканей роговицы животных с неустойчивым психотипом при разных увеличениях и длительности воздействия.

**Таблица 3. Информационно-энтропийные параметры тканей роговицы животных с неустойчивым психотипом**

Крыса №	Увеличение	$H = \sum D_{li}$	$H_{\max}$	$H^*$	$\Delta H$	$R$
10 дней ВЭП						
4.03.17.10	10	6,63	9,73	1,94	7,79	0,801
2.03.17.20	20	8,87	12,84	2,05	10,78	0,840
20 дней ВЭП						
15ГЭ10	10	7,71	11,16	3,02	8,14	0,729
15ГЭ20	20	6,06	8,77	1,25	7,52	0,857
3.06.17.20	20	7,40	10,71	4,03	6,68	0,624

Воздействие в течение 10 и 20 дней ВЭП на животных с неустойчивым психотипом не обнаруживает смену режима функционирования системы и функциональных свойств структуры при увеличениях  $\times 10$  и  $\times 20$ . Функциональная система тканей остается детерминированной, динамическое состояние структуры тканей роговицы – детерминированный хаос. С увеличением длительности воздействия ВЭП при увеличении  $\times 10$  все энтропийные параметры в структуре роговицы возрастают, наблюдается только снижение относительной организованности. С увеличением длительности воздействия ВЭП при увеличении  $\times 20$  в результате бифуркации наблюдается как снижение, так и возрастание энтропийных параметров: относительная организованность  $R$  возрастает, а конфигурационная энтропия  $H^*$  понижается у животного 15ГЭ20 или относительная организованность  $R$  снижается, при этом возрастает конфигурационная энтропия  $H^*$  у животного № 3.06.17.20 (табл. 3).

В табл. 4 приведено сравнение относительной организованности функциональных систем по классификации С. Бира и функциональной системы тканей роговицы экспериментальных животных после полевого воздействия с учетом психотипа.

**Таблица 4. Относительная организованность функциональных систем по классификации С. Бира и функциональной системы тканей роговицы с учетом психотипа животного**

Функциональная система	$R$	Устойчивый психотип		Неустойчивый психотип	
		$1 - H/H_{\max}$	Крыса №	$1 - H/H_{\max}$	Крыса №
Стохастическая	0...0,1	0	13ГЭ20	–	–
Квазидетерминированная	0,1...0,3	0,21	14ГЭ10	–	–
Детерминированная	0,3...1,0	0,944	8.03.17.10	0,801	4.03.17.10
		0,935	8.03.17.20	0,840	2.03.17.20
				0,729	15ГЭ10
				0,857	15ГЭ20
				0,624	3.06.17.20

Относительная степень организованности функциональной системы тканей роговицы животных в результате полевого воздействия разделяется по группам оценок в соответствии с классификацией функциональных систем по С. Биру.

Оценка функционального состояния жизнедеятельности организма контрольных животных на основе относительной организованности выявляет детерминированный хаос мультифрактального отображения структуры тканей роговицы, который описывается распределением Парето структурных элементов. Пределы устойчивости мультифрактального множества определяется законом Парето 20 / 80. Исходя из закона Парето, можно выразить границы устойчивости жизнедеятельности животных: «норма организованности»  $\Delta R = 0,8 \dots 0,2$ ; «норма хаотичности»  $\Delta S = 0,2 \dots 0,8$ . Внутренним фактором, влияющим на «норму», является психотип животного, а внешним фактором – длительность воздействия ВЭП. Из табл. 4 следует, что верхняя граница нормы организованности животных с устойчивым психотипом выше, чем у животных с неустойчивым психотипом. Поэтому после 10 дней воздействия ВЭП их оценка относительной организованности  $R > R_{кр}$  и состояние становится неустойчивым. Состояние организма животного с неустойчивым психотипом после 10 дней воздействия ВЭП достигает критического уровня устойчивости. После 20 дней воздействия ВЭП состояние организма животного с устойчивым психотипом достигает нижней границы устойчивости  $R_{кр} = 0,2$  и наблюдается квазидетерминированный хаос отображения структуры. Стохастический хаос отображения структуры соответствует «физическому хаосу» и наблюдается при состоянии  $0 \leq R < 0,1$ .

Бифуркация состояний организма животного с неустойчивым психотипом наблюдается после 20 дней воздействия ВЭП, но оценки относительной организованности структуры не выходят за границы устойчивости, т. е. ресурс жизнедеятельности организма животного с неустойчивым психотипом больше, чем ресурс жизнедеятельности животного с устойчивым психотипом.

## Выводы

Метод мультифрактальной параметризации изображения тканей роговицы является информативным:

- для исследования взаимодействия ВЭП и организма животного в целях диагностики и контроля смены режимов функционирования;
- для получения количественных оценок состояния динамического хаоса в структуре тканей роговицы и прогнозирования ресурса жизнедеятельности организма.

Исходя из закона Парето установлены предельные границы устойчивости жизнедеятельности животных:

- «норма организованности»  $\Delta R = 0,8...0,2$ ;
- «норма хаотичности»  $\Delta S = 0,2...0,8$ .

### Список литературы

1. *Зайнаева, Т. П.* Влияние вращающегося электрического поля на систему «мать – плацента – плод» у крыс с разной прогностической стрессоустойчивостью / Т. П. Зайнаева, С. Б. Егоркина // Экология человека. 2016. – № 8. – С. 3–7.
2. *Встовский, Г. В.* Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / Г. В. Встовский, А. Г. Колмаков, И. Ж. Бунин. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 115 с.
3. *Встовский, Г. В.* Элементы информационной физики / Г. В. Встовский. – Москва : МГИУ, 2002. – 260 с.
4. *Божокин, С. В.* Фракталы и мультифракталы / С. В. Божокин, Д. А. Паршин. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 128 с.
5. Фрактальный анализ рентгенограмм / В. П. Иванников, В. Г. Суфиянов, В. В. Белых, В. А. Степанов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2009. – № 3. – С. 150–154.
6. Исследование структурных изменений в тканях роговицы экспериментальных животных в условиях вращающегося электрического поля методом фрактальной параметризации / Д. С. Лаптев, С. Б. Егоркина, В. А. Степанов, В. В. Белых // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17. – № 4. С. 32–40. – DOI: [10.22213/2410-9304-2019-4-32-40](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2019-4-32-40).
7. *Белых, В. В.* Применение обобщенного распределения Парето для определения структурных параметров графита в чугунах / В. В. Белых, В. В. Муравьев, В. А. Степанов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 52–61.
8. *Шенон, К.* Работы по теории информации и кибернетике / К. Шенон. – Москва : Иностранная литература, 1963. – 829 с.
9. *Шмальгаузен, И. И.* Кибернетические вопросы биологии / И. И. Шмальгаузен. – Новосибирск : Наука, 1968. – 224 с.
10. *Эшби, У.* Введение в кибернетику / У. Эшби. – Москва : Иностранная литература, 1959. – 432 с.
11. *Крамаренко, С. С.* Особенности использования энтропийно-информационного анализа для количественных признаков биологических объектов / С. С. Крамаренко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2005. – Т. 7, № 1. – С. 242–247.
12. *Хадарцев, А. А.* Теоретические основы новых медицинских технологий / А. А. Хадарцев // Вестник Международной академии наук (Русская секция). – 2006. – № 1. – С. 22–28.
13. Изучение зависимостей между показателями вариационной пульсометрии, энтропии ритма сердца, временного и спектрального анализов variability ритма сердца в норме и при ишемической болезни сердца / Н. Ю. Дурно-

ва, Я. П. Довгалевский, А. Н. Бурлака, А. Р. Киселев, Н. В. Фурман // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2011. – Т. 7. – № 3. – С. 608–611.

14. *Минина, Е. Н.* Анализ кардиогеомодинамического функционирования с использованием энтропийного подхода и метода фазовой / Е. Н. Минина, Л. С. Файнзильберг // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2016. – № 4. – С. 5–17.

15. *Бир, С.* Кибернетика и менеджмент / С Бир. – Москва : ДомКнига, 2010. – 280 с.

16. *Климонтович, Ю. Л.* Введение в физику открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – Москва : Янус-К, 2002. – 284 с.

17. *Белых, В. В.* Использование информационной энтропии структуры стали для определения качества и ресурса её функциональных свойств / В. В. Белых, В. В. Муравьев, В. А. Степанов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 15-24. – DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-15-24.

18. Показатели объема тканей роговицы в норме и при кератоконусе / А. Н. Куликов, Е. В. Кудряшова, В. Н. Гаврилук, Д. С. Мальцев // Современные технологии в офтальмологии. – 2019. – № 5 (30). – С. 292.

19. *Абовян, А. А.* Роль матричной металлопротеиназы-9 в диагностике кератоконуса / А. А. Абовян, А. А. Зильфян // Современные технологии в офтальмологии. – 2018. – № 5. – С. 263–265.

*D. S. Laptev*<sup>1</sup>, postgraduate student

*S. B. Egorkina*<sup>1</sup>, DSc in medicine, senior researcher

*V. A. Stepanov*<sup>2</sup>, CSc in engineering, associate professor

E-mail: [vladimir1@udm.ru](mailto:vladimir1@udm.ru)

*V. V. Belykh*<sup>2</sup>, CSc in engineering, associate professor

*Sh. N. Khudoykulova*<sup>3</sup>, senior lecturer

<sup>1</sup> Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Samarkand State Medical Institute, Samarkand, Uzbekistan

## **Assessment of Functional State of Vital Activity of a Body Based on Multifractal Analysis of Changes in Corneal Tissues under the Influence of a Rotating Electric Field**

*The paper presents the results multifractal parameterization of digitized images histological the cornea sections of experimental animals with different behavior psychotypes exposed to a rotating electric field for ten and twenty days. Quantitative assessments of the vital activity of the organism based on generalized Renyi dimensions and on the criterion of the degree organization the dynamic States of experimental animals the corneal tissues the structure based on a statistical description of its States in the “norm” are established.*

**Keywords:** psychotype, multifractal, entropy, relative organization, norm of randomness, self-organization.

УДК 550.38

Г. В. Ломаев, д-р техн. наук, проф.

М. С. Емельянова, магистрант

E-mail: [ems1988@mail.ru](mailto:ems1988@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

## Генератор магнитных полей для магнитобиологических опытов

В статье предложен генератор магнитных полей для проведения магнитобиологических опытов, позволяющий многократно уменьшить время опыта. Генератор создает в рабочем пространстве  $(x, y, z)$  магнитное поле, градиентное в одной плоскости  $(x, y)$  и постоянное в другой (например,  $y, z$ ), для любого значения ординаты  $x$  рабочего пространства биологического опыта, при этом поле может устанавливаться с инверсией и проходить через линию «магнитного вакуума».

**Ключевые слова:** магнитобиология, магнитное поле, «магнитный вакуум», катушки Гельмгольца.

### Введение

Магнитное поле – важный инструмент для научных исследований и промышленных приложений, таких как физика твердого тела, химия, медицина и физика высоких энергий. Для реализации медико-биологических исследований используется два вида магнитного поля (МП): непрерывное и импульсное. По сравнению с первым, импульсное имеет гораздо более высокую напряженность поля и будет играть практическую роль в исследованиях, связанных с высокой напряженностью поля. Для реализации исследований с медико-биологическими объектами используются слабые магнитные поля, связанные с получением «магнитного» вакуума, при котором значение поля близко к нулю [1–6].

Известно, что слабые магнитные поля создаются с использованием катушек Гельмгольца (КГ), которые также создают эталонные магнитные поля, поэтому если соблюсти геометрические размеры при изготовлении КГ для магнитобиологических опытов, то можно получить значение «вакуума» магнитного поля с очень большой точностью. В этом случае основная погрешность задания магнитного поля, а в дальнейшем получение точки «магнитного вакуума», будет определяться погрешностью измерителя тока [6, 7].

Целью работы являлось создание генератора магнитного поля для реализации магнитобиологических опытов в режиме «магнитного вакуума» с получением зависимости «доза-эффект».

### Сведения из теории

Модуль магнитной напряженности поля Земли в пространстве координат  $(x, y, z)$  равен

$$H_3 = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}, \quad (1)$$

где  $x, y$  – декартовы координаты в плоскости горизонта;  $z$  – вертикальная координата;  $H_x, H_y, H_z$  – вектора напряженности поля на эти оси.

Вектор поля лежит в плоскости Север – Юг под углом к горизонту, который зависит от географических координат. Для Ижевска это  $73^\circ$ . В опытах с гипогеомагнитными полями модуль вектора поля необходимо либо уменьшать до нуля, т. е. создавать так называемый магнитный вакуум, либо частично скомпенсировать. Последнее важно для определения зависимости «доза – эффект» в экологии. В классических опытах задача решается с помощью трех пар катушек Гельмгольца, оси которых расположены параллельно проекциям поля Земли на координаты  $(x, y, z)$ .

В своих исследованиях мы используем одну пару КГ, ось которой параллельна вектору поля Земли. Если опыт проводится в квадратных КГ, тогда одна из их граней расположена в плоскости Север – Юг, а ее ось под углом  $73^\circ$ . Магнитобиологические опыты в экологии требуют повторения большого числа экспериментов при определении зависимости «доза – эффект». Это «растягивает» опыты на длительное время. Например, для получения десяти точек зависимости динамики онтогенеза от величины магнитного поля в опытах с эмбрионами цыплят требуется более 210 суток (время развития эмбриона 21 сутки). Ускорение процедуры можно осуществить путем параллельного эксперимента. Но это требует значительного увеличения финансовых вложений. А в ряде случаев приходится жертвовать качеством получаемой информации, уменьшая статистическую выборку.

При разработке генератора для магнитобиологических опытов стоит учитывать:

- генерирование МП разных степеней ослабления в эксперименте с биообъектами разного уровня организации;
- обеспечение магнитного поля в одном опыте с инверсией направления в разных частях пространства и с переходом через линию «магнитного вакуума» по координате  $x$ .

- диапазон изменений магнитного поля генератора не должен быть меньше величины поля Земли, т. е. 50 мкТл (примерно 45 А/м);
- величина поля для постоянного значения координаты  $z$  по направлению  $y$  должна устанавливаться с заданной погрешностью, которая в свою очередь обуславливается особенностью биологического опыта.

### Принцип построения генератора магнитного поля

Если расположить проводник перпендикулярно плоскости Север – Юг, то одна из проекций вектора поля Земли будет равна нулю ( $H_z = 0$ ). Кроме того, необходимо расположить одну из плоскостей генератора перпендикулярно вектору поля Земли (для Ижевска  $73^\circ$ ), т. е. и вторую проекцию сделать равной нулю ( $H_x = 0$ ). При выполнении этих условий поле  $H$  будет параллельно полю Земли ( $H_3 = H_y$ ).

Результаты расчета магнитного поля  $H(x, 0)$  в пространстве между проводниками, удаленными на расстояние 1 м друг от друга, для различных токов (в нашем случае  $I_1$  и  $I_2$ ) приведены на графике (рис. 1).

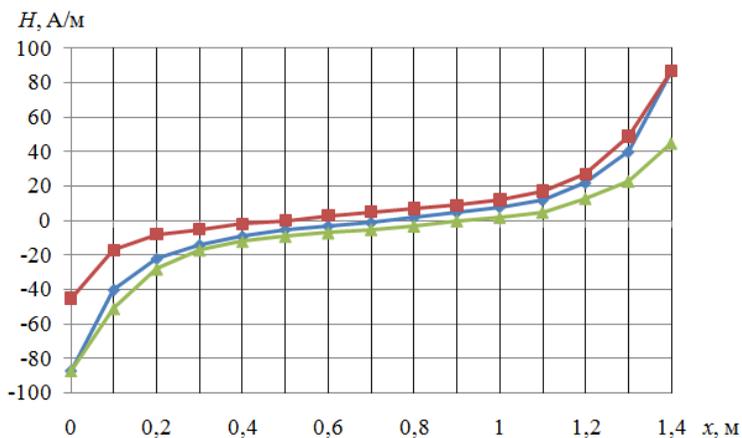


Рис. 1. Поле между проводниками при различных токах:

- ◆—  $I_1=I_2$ ,
- $I_1=0,5I_2$ ,
- ▲—  $I_2=0,5I_1$ .

Как видно из приведенных графиков, в пространстве между проводниками есть зона с полями, близкими к нулю, которые можно перемещать, меняя токи в проводниках. Рассмотренный принцип позволяет рассчитать величину токов  $I_1$  и  $I_2$  (а значит и напряженности магнитного

поля от проводников) в каждом конкретном варианте, исходя из необходимой степени ослабления магнитного поля Земли, градиента и точки положения на оси  $x$  «магнитного вакуума».

### Результаты и их обсуждение

Для создания установки, генерирующей градиентное поле, используются две пары катушек Гельмгольца, расположенные соответствующим образом в пространстве.

Экспериментальная кривая распределения магнитного поля в генераторе и за его пределами с учетом вертикальной составляющей МП Земли представлена на рис. 2.

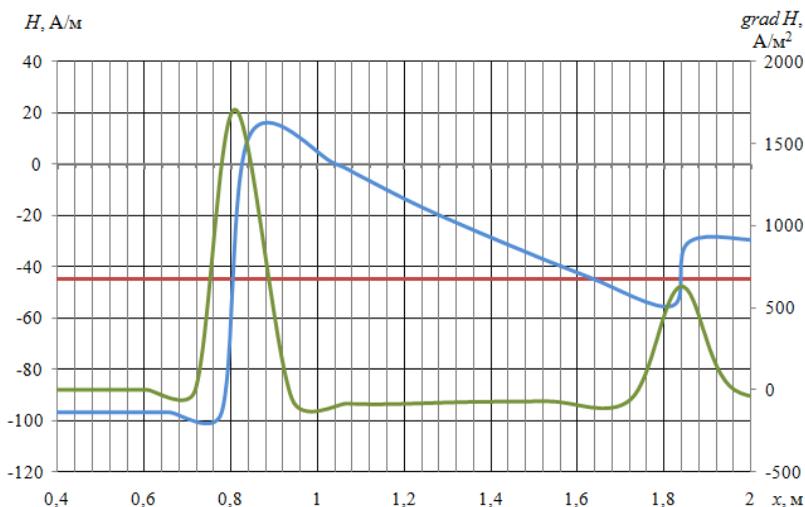


Рис. 2. График распределения МП в генераторе:  
— значение напряженности МП Земли,  
— изменение нормальной составляющей МП,  
— градиент напряженности МП

Из представленной зависимости видно изменение нормальной составляющей МП в рабочем объеме генератора с переходом через инверсию поля.

### Выводы

Таким образом, для решения задачи проведения опыта при длительных сроках онтогенеза эмбриональной стадии биообъекта разработан

многоуровневый генератор на основе градиентного источника магнитного поля, позволяющий создать градиент магнитного поля в горизонтальной плоскости при постоянной вертикальной составляющей. Применение многоуровневого генератора позволило бы сократить время экспериментов более чем в пять раз.

*Работа выполнена при поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашикова» в рамках научного проекта № ШАВ/20-67-21.*

### Список литературы

1. Бинги, В. Н. Первичный физический механизм биологических эффектов слабых магнитных полей / В. Н. Бинги // Биофизика. – 2016. – Т. 61, № 1. – С. 170–176.
2. Карауш, С. А. Влияние металлических фасадных систем на геомагнитное поле внутри помещений / С. А. Карауш // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 1 (38). – С. 83–87.
3. Розов, В. Ю. Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации / В. Ю. Розов, Д. Е. Пелевин, Е. Д. Кундиус // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 3. – С. 59–67.
4. Создание однородного магнитного поля с помощью системы аксиальных катушек для калибровки магнитометров / В. Е. Баранова, П. Ф. Баранов, С. В. Муравьев, С. В. Учайкин // Измерительная техника. – 2015. – № 5. – С. 52–56.
5. Майер, В. В. Демонстрация действия магнитного поля на магнитный диполь / В. В. Майер // Физическое образование в вузах. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 56–62.
6. Методика сокращения продолжительности магнитобиологических опытов в гипогеомагнитных полях / Г. В. Ломаев, М. С. Емельянова, А. С. Соловьева, Я. Ю. Кочарян // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 2 (26). – С. 102–106.
7. Влияние слабых магнитных полей в разные фазы регенерации планарий / Х. П. Тирас, О. Н. Петрова, С. Н. Мякишева, С. С. Попова, К. Б. Асланиди // Биофизика. – 2015. – Т. 60, № 1. – С. 158–163.

*G. V. Lomaev*, DSc in engineering, professor

*M. S. Emelyanova*, magister student

E-mail: [ems1988@mail.ru](mailto:ems1988@mail.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Magnetic Field Generator for Magnetobiological Experiments**

*The article proposes a generator of magnetic fields for conducting magnetobiological experiments, which allows to reduce the experiment time many times. The generator creates a magnetic field in the working space  $(x, y, z)$ , which is gradient in one plane  $(x, y)$  and constant in the other (for example,  $y, z$ ), for any value of the ordinate  $x$  of the working space of biological experience, and the field can be set with inversion and pass through the line of “magnetic vacuum”.*

**Keywords:** magnetobiology, magnetic field, “magnetic vacuum”, Helmholtz coils.

УДК 537.613

Г. В. Ломаев, д-р техн. наук, проф.

П. А. Шихарев, магистрант

E-mail: [pashaplay@mail.ru](mailto:pashaplay@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Моделирование магнитных полей в строительных сооружениях с элементами конструкции, содержащими ферромагнетики**

*В работе рассматриваются вопросы искажения магнитного поля Земли в строительных сооружениях. В настоящее время хорошо известно явление возникновения гипогомагнитных полей внутри строительных сооружений и их негативное влияние на живые организмы. Механизмы появления искажения магнитного поля Земли в настоящее время изучены недостаточно полно. С помощью 3D-моделирования результирующих магнитных полей возле арматурных прутков и анализа численных значений магнитного поля заранее, на стадии строительства, прогнозируется возможность выявления опасных магнитопогенных зон в жилых сооружениях.*

**Ключевые слова:** геомагнитное поле, искажение, опасные зоны, жилые сооружения, влияние на здоровье.

### **Введение**

Магнитное поле Земли (МПЗ) является природным фактором, в котором существуют все живые организмы, включая и людей. Однако не смотря на свое естественное происхождение, оно может оказывать негативное влияние ввиду своей неосязаемости органами чувств человека. Здоровье людей в урбанизированной среде, проживающих в условиях помещений жилых зданий 24 часа или пребывающих в условиях помещений общественных зданий и рабочих мест до 8 часов, находится в прямой зависимости от отклонений показателей геомагнитного поля (ГМП), соответствующих критериям «хорошей погоды» природных условий невозмущенного состояния атмосферы открытого пространства (в поле) для данного региона по ГОСТ Р 51724–01 [1].

Изменения показателей геомагнитного поля в помещениях жилых и общественных зданий напрямую зависят от ферромагнитных материалов в конструкции, технологий нормализации ГМП на этапах проектирования, строительства и эксплуатации зданий, а также от бесконтрольного использования предметов, содержащих железо, в условиях прожи-

вания и пребывания [2]. Современные результаты исследований подтверждают опасности для жизнедеятельности человека и его пребывания в условиях отклонений ГМП от естественных показателей [3].

### **Сведения из теории**

Кратковременное воздействие однократного и повторяющегося ослабления ГМП вызывает в организме здоровых людей выраженные компенсаторно-приспособительные реакции. Регистрируется значимое увеличение низкочастотного вклада в общую мощность спектра кардиоритма с 26 % до 38 %; увеличение в 1,3–2,4 раза активности альфаритма при электроэнцефалографии и уменьшение по данным реоэнцефалографии на 18–25 % кровенаполнения сосудов головного мозга, что подтверждает влияние ослабленного магнитного поля Земли на функциональное состояние сердечно-сосудистой и центральной нервной систем. В условиях ослабленного ГМП увеличиваются негативные воздействия на организм человека внешних факторов природного и техногенного происхождения [4].

При долгом нахождении человека в условиях искаженного магнитного поля, а в частности гипогомагнитного (ГГМП), проявляется ряд серьезных негативных воздействий на организм. К таким воздействиям относятся ослабление иммунитета (при ослаблении магнитного поля в 2 раза и более), заболевания сердечно-сосудистой системы, сбои в репродуктивной системе (при ослаблении поля в 4 раза и более), перестройка биологических ритмов организма, начало адаптационных преобразований, нарушение в работе эндокринной системы.

Теоретические вопросы проблемы «гипогомагнитное поле – человек» рассматриваются в магнитобиологии – разделе биологии, а также исследуются такими науками, как экология (электромагнитная) и медицина (спортивная и космическая).

### **Описание эксперимента**

Источниками опасных зон по фактору ГМП являются строительные сооружения, возведенные по монолитной или каркасной технологии [5]. При строительстве таких сооружений используются каркасы из арматуры, обладающие высокой магнитной проницаемостью и способностью концентрировать в своем сечении магнитное поле Земли. В объемах, ограниченных такими каркасами, поле Земли является ослабленным, а также меняет направление вектора.

Для проведения численного моделирования была выбрана программная среда GMSH, позволяющая моделировать распределение векторов напряженности магнитного поля в трехмерном пространстве [6].

Для выполнения поставленных при моделировании задач необходимо в программе GMSH создать 3 объема, отвечающих за воздух (Box 1) и 2 магнита (Box 2, Box 3) (Листинг 1). Магниты здесь необходимы для симуляции северного и южного магнитных полей. Граничные условия для магнитов задаются таким образом, чтобы в пространстве между ними было значение напряженности магнитного поля 43,5 А/м.

Параметры магнитной проницаемости  $\mu_r = 30$  и коэрцитивной силы  $H_C = 15000$  А/м для арматурного прутка заданы в соответствии с изменениями реальных арматурных прутков А500С № 20, использующихся при строительстве.

Размеры арматурного прутка выбраны следующие: длина 4 м, диаметр 0,025 м, расстояние между прутками 0,075 м.

#### Листинг 1. Задание объемов воздуха и магнитов

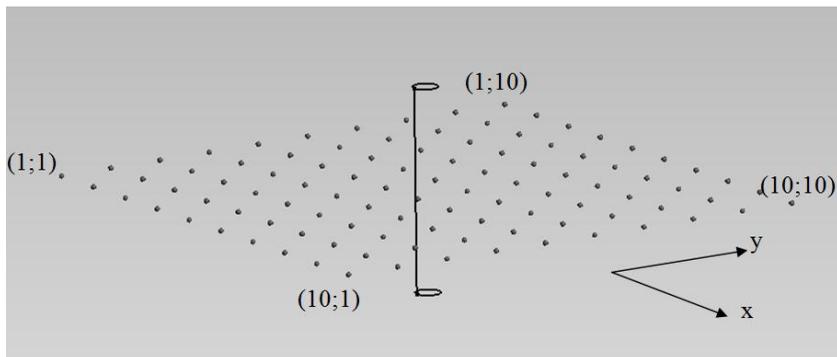
```
// Gmsh project created on Fri Dec 13 15:26:52 2019
//+
SetFactory("OpenCASCADE");
Box(1) = {-25, -25, -25, 100, 50, 100};
//+
Box(2) = {-24, -24.5, -24, 98, 1, 98};
//+
Box(3) = {-24, 23.5, -24, 98, 1, 98};
//+
Delete {
Volume{1};
}
```

В качестве объектов для исследования были выбраны следующие модели:

1. Арматурный прутки, намагниченный против МПЗ.
2. Четыре арматурных прутки, намагниченных чередующимся образом (1-й и 3-й арматурные прутки намагничены вдоль МПЗ, 2-й и 4-й намагничены против).
3. 36 арматурных прутков, расположенных в форме прямоугольника, который соответствует расположению арматурных прутков в конструкции жилых сооружений (пилоны или опоры).

Считаем, что основным источником намагниченности арматурных прутков является сам производитель, поставляющий арматурные прутки на место строительства без нормализации искажений и отклонений ГМП без проведения выходного контроля и размагничивания, методы и средства которых известны. Этот фактор связан с применением мощных промышленных электромагнитов при погрузке для транспортирования на место строительства арматурных прутков.

Итоговая модель (модель номер 1) с разбитой координатной сеткой приведена на рисунке. Расстояние между каждыми двумя близлежащими точками равняется 0,2 м.



Плоскость, из которой экспортируются значения напряженности результирующего магнитного поля

### Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования приведены в табл. 1–3. Отсчет расстояния ведется от центра модели по осям абсцисс и ординат, перпендикулярным арматурным пруткам.

Таблица 1. Результаты моделирования напряженности магнитного поля возле модели № 1 (Результирующее магнитное поле)

	Напряженность магнитного поля в А/м									
1	-35	-36	-30	-30	-15	-33	-33	-33	-33	-37
2	-29	-29	-27	-2	-24	26	24	-23	-23	-31
3	-31	-24	44	44	55	26	24	24	-17	-28
4	-28	-28	24	22	237	865	69	54	-8	-29
5	-28	-22	107	279	214	265	252	54	-8	-8
6	-19	-14	24	163	413	576	259	28	-1	-25
7	-31	-19	163	7	7	48	48	-24	-17	-25
8	-28	-35	-36	-11	-11	-11	48	-24	-17	-25
9	-35	-33	-25	-26	-11	-11	-25	-25	-30	-37
10	-35	-33	-25	-25	-26	-26	-36	-36	-37	-40
Координата	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Таблица 2. Результаты моделирования напряженности магнитного поля  
возле модели № 2**

	Напряженность магнитного поля в А/м									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-28	0	4	-47	-42	-50	-60	-69	-62	-62
2	9	0	48	-33	-33	-82	-116	-103	-109	-76
3	65	48	48	-33	-56	-54	-115	-106	-166	-166
4	40	609	273	3735	-127	-127	-225	-847	-166	-211
5	27	609	216	-1398	-56	3651	-614	-614	-672	-229
6	203	203	1026	-8075	3099	2651	-13287	-745	-672	-229
7	488	208	1026	423	205	794	-85	-393	-293	-293
8	143	208	1026	-92	-1618	48	-102	-393	-393	-233
9	-6	143	26	-92	-12	-102	-102	-81	-393	-233
10	41	-6	-46	-92	-44	-52	-102	-81	-42	-84
Координата	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Таблица 3. Результаты моделирования напряженности магнитного поля  
возле модели № 3**

	Напряженность магнитного поля в А/м									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	677	619	2522	1542	1909	2464	458	1259	786	1140
2	1850	1850	1120	3307	493	831	458	1259	786	725
3	147	147	1120	2	605	222	595	458	786	989
4	284	480	249	2	605	170	329	434	520	1073
5	2657	256	367	379	157	170	-50	151	113	2471
6	3047	488	290	83	157	90	21	-50	113	-443
7	393	393	488	10	10	10	-188	-361	-1425	-2060
8	-2707	-70	59	14	10	-156	-156	-469	-1425	-1943
9	-4306	15	21	-43	-53	-252	-998	-587	-415	-2153
10	1462	393	53	3082	-79	-661	-1511	-935	-2211	1668
Координата	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Возле модели № 1 – арматурного прутка, намагниченного против МПЗ, – имеются гипогеомагнитные поля (относительно предельно допустимого уровня 33 А/м в г. Ижевске) в радиусе от 0,4 до 1 метра. Это связано со встречным направлением линий магнитной индукции МПЗ и магнитного поля арматурного прутка [7].

Возле модели № 2 – четырех арматурных прутков, намагниченных чередующимся образом, – имеются наиболее опасные нулевые значения напряженности магнитного поля на расстоянии 1 метра.

Внутри модели № 3 имеется гипогеомагнитное поле в самом центре модели. Также видна смена направления векторов напряженности магнитного поля.

Моделирование результирующих магнитных полей возле арматурных полей подтверждает наличие ослабленных магнитных полей в кон-

струкциях с их применением. Таким образом, предварительное моделирование магнитных полей перед строительством общественных зданий для выявления возможных ослаблений магнитных полей носит жизненно важный характер.

### **Выводы**

В объемах жилых и рабочих зданий и сооружений, построенных по монолитной технологии, предполагающей наличие ферромагнитных элементов в конструкции, могут возникать и возникают искаженные магнитные поля. По результатам моделирования с помощью специализированных компьютерных программ имеется возможность отслеживания, а значит и предупреждения возможности возникновения магнитопатогенных участков в жилых и рабочих помещениях для сохранения здоровья людей.

*Работа выполнена при поддержке ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашикова» в рамках научного проекта № ШАВ/20-67-21.*

### **Список литературы**

1. ГОСТ Р 51724–2001 Экранированные объекты, помещения, технические средства. Поле гипогомагнитное. Методы измерений и оценки соответствия уровней полей техническим требованиям и гигиеническим нормативам. – Текст : электронный // Библиотека нормативной документации. – URL: <https://gost.ruscable.ru/Index/8/8481.htm> (дата обращения: 18.04.2020).
2. *Ломаев, Г. В.* Гипогомагнитная экология и безопасность современных строительных сооружений / Г. В. Ломаев, Ю. Г. Рябов, Д. С. Кулешова // Магнитные явления : сб. ст. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. – С. 201–205.
3. Магнитопатогенные зоны в строительных сооружениях / Г. В. Ломаев, Д. С. Кулешова, Ю. Г. Рябов, Ю. В. Мышкин, Й. Орбан // Магнитные явления : сб. ст. Вып. 4. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. С. 109–122.
4. *Копанев, В. И.* Влияние гипогомагнитного поля на биологические объекты / В. И. Копанев, А. В. Шакула. Ленинград : Наука : Ленингр. отд-ние, 1985. 72 с.
5. *Репин, А. А.* Причины ослабления геомагнитного поля в многоэтажных зданиях / А. А. Репин, Ю. Г. Рябов, Г. В. Ломаев // Стандарты и качество. 2020. № 995. С. 104–108.
6. *Розов, В. Ю.* Моделирование статического геомагнитного поля внутри помещений современных жилых домов / В. Ю. Розов, С. В. Левина // Техническая электродинамика. – 2014. – № 4. – С. 8–10.
7. *Розов, В. Ю.* Исследование явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях / В. Ю. Розов, Д. Е. Пелевин, С. В. Левина // Электротехника и электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 72–76.

G. V. Lomaev, DSc in engineering, professor

P. A. Shikharev, postgraduate student

E-mail: [pashaplay@mail.ru](mailto:pashaplay@mail.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Modeling of Magnetic Fields in Construction Structures with Structural Elements Containing Ferromagnets**

*The paper deals with the distortion of the Earth's magnetic field in construction buildings. At present, the phenomenon of the occurrence of hypogeomagnetic fields inside building structures and their negative impact on living organisms is well known. The mechanisms of the appearance of the distortion of the Earth's magnetic field are currently not fully understood. The aim of the work is to develop models for the occurrence of distortions of the Earth's magnetic field, identify the factors of its appearance and ways to eliminate it.*

**Keywords:** geomagnetic field, distortion, hazardous areas, residential buildings, health effects.

УДК 620.179.16

А. А. Понькина<sup>1</sup>, аспирант  
О. В. Муравьева<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, проф.  
Л. В. Волкова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.  
Т. С. Чухланцева<sup>1</sup>, магистрант  
E-mail: fotinaa@list.ru

<sup>1</sup> Ижевский государственный технический университет имени  
М. Т. Калашникова  
<sup>2</sup> ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН»

### **Влияние волновой толщины стенки листа на эюры смещений нормальных волн Лэмба**

*Проведены теоретические исследования влияния толщины и рабочей частоты на эюры смещений в листах для симметричной и антисимметричной мод нормальных волн Лэмба. Предложены рекомендации по выбору оптимального силового воздействия преобразователя для достижения максимальной эффективности при измерениях толщины стенки листа. Так, для моды  $A_0$  компонента смещений  $W_{A_0}$  преобладает над  $U_{A_0}$  на всем диапазоне относительной толщины пластины. А для моды  $S_0$  при относительной толщине  $k,d \geq 1,8$  смещение  $W_{S_0}$  преобладает над  $U_{S_0}$ .*

**Ключевые слова:** волны Лэмба, листы, дисперсионные кривые, изменение толщины.

#### **Введение**

Волны Лэмба широко используются при контроле листов и труб благодаря возможности обнаружения дефектов на больших расстояниях от преобразователя. Преимущество использования нормальных волн Лэмба в том, что некоторые моды могут быть чувствительны к изменению толщины стенки трубы [1–7].

Для возбуждения-приема волн Лэмба используются различные типы преобразователей (пьезопреобразователи по методу клина, электромагнитно-акустические преобразователи, преобразователи с сухим точечным контактом) [8–10]. Каждый из указанных преобразователей позволяет сформировать силовое воздействия как в виде вертикальной, так и в виде горизонтальной силы. При этом эффективность возбуждения-приёма волн Лэмба определяется соотношением горизонтальной и вертикальной составляющей в эюре смещений волн Лэмба определенной моды. Распределение осевой и горизонтальной компо-

нент смещений по толщине пластины определяется геометрическими параметрами объекта контроля, его упругими свойствами и рабочей частотой преобразователя.

Цель работы – изучение влияния толщины и рабочей частоты на эпюры смещений волн Лэмба и их соотношение на поверхности пластины с целью оценки эффективности возбуждения-приема волн Лэмба.

### Методы исследования

Нормальные волны Лэмба характеризуются многообразием типов (мод) – осесимметричных продольных (S), антисимметричных изгибных (A) и SH-волн различных порядков. Для нормальных волн характерна геометрическая дисперсия скорости, т. е. зависимость фазовой и групповой скорости волн от произведения частоты колебаний и поперечных размеров листа. Дисперсионные кривые являются основной характеристикой нормальных волн [11–13].

На рис. 1 приведены схематичные изображения деформации листа толщиной  $2d$  в  $z$ -направлении при распространении в нем симметричных S0 и антисимметричных A0 волн нулевого порядка. Каждая из мод характеризуется двумя компонентами смещений – осевой горизонтальной  $U$  и вертикальной по толщине  $W$ .

Исследование влияния толщины и рабочей частоты на эпюры смещений волн Лэмба и их соотношение на поверхности пластины основано на теоретическом анализе решений для осевой горизонтальной и вертикальной компонент смещений для симметричных и антисимметричных волн Лэмба с использованием формул И. А. Викторова [14].

Смещения в волнах Лэмба определяются толщиной листа, рабочей частотой, номером моды, фазовыми и групповыми скоростями мод, также положением точки наблюдения по толщине листа. Изменение осевых горизонтальных и вертикальных смещений по толщине принято строить в зависимости от волновой толщины листа, соответствующей отношению толщины листа и длины волны данной моды волн Лэмба на данной частоте, при этом необходимым является знание дисперсионных кривых фазовых и групповых скоростей волн Лэмба. Для расчета фазовых и групповых скоростей волн Лэмба по дисперсионным кривым использовалась специализированная программа Elastic Waveguide Tracer [15].

Расчеты проведены для листов с различным соотношением  $k_1d$  ( $k_1$  – волновое число волны Лэмба данной моды,  $d$  – полутолщина листа) для материала сталь со следующими свойствами: модуль Юнга  $E = 210$  ГПа, модуль сдвига  $G = 82$  ГПа, плотность материала  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>.

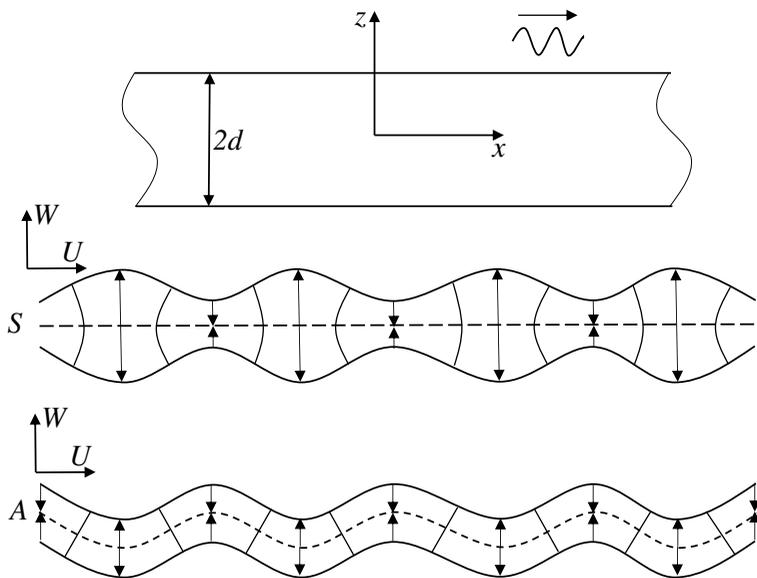


Рис. 1. Схематичное изображение деформации листа

### Результаты и их обсуждение

Эпюры смещений  $U$  и  $W$  для симметричной  $S_0$  и антисимметричной  $A_0$  мод по толщине при  $k_1 d = 1,8$  представлены на рис. 2. Видно, что эпюры смещений каждой из компонент для каждой из мод ведут себя неравномерно по толщине листа. Ввиду того, что возбуждение-прием акустических волн осуществляется либо с поверхности листа (пьезопреобразователи), либо с тонкого приповерхностного слоя (ЭМА-преобразователи), далее будем анализировать смещения на поверхности  $z = d$ .

На рис. 3 представлены зависимости компонент смещений на поверхности пластины в зависимости от ее волновой толщины  $k_1 d$ . Видно, что для моды  $S_0$  вертикальная компонента  $W_{S_0}$  преобладает над горизонтальной компонентой  $U_{S_0}$  в диапазоне от  $k_1 d = 1,8$  и выше. Для моды  $A_0$  компонента смещений  $W_{A_0}$  преобладает над  $U_{A_0}$  примерно в полтора раза на всем диапазоне относительной толщины пластины.

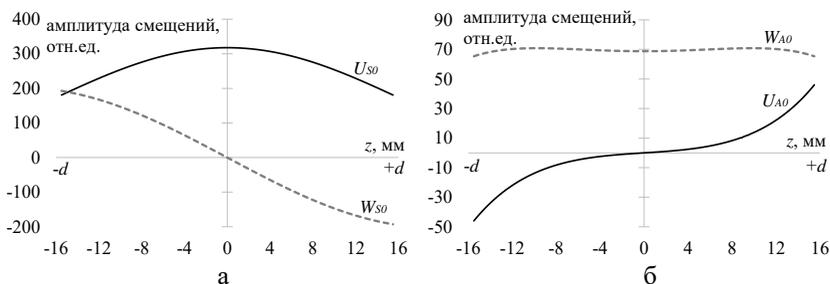


Рис. 2. Эпюры смещений  $U$  и  $W$  для симметричной S0 (а) и антисимметричной A0 (б) мод по толщине при  $k_1 d = 1,8$

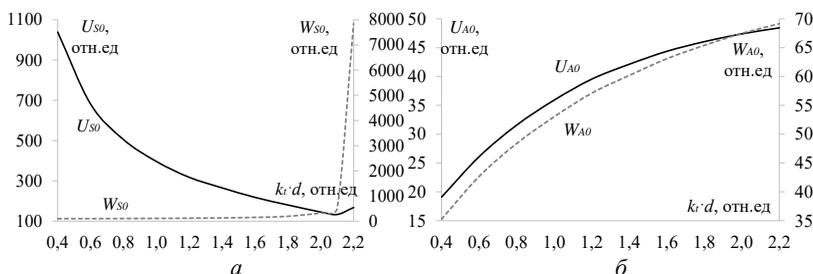


Рис. 3. Зависимость амплитуд нормальной  $W$  и касательной  $U$  компонент смещений для симметричной S0 (а) и антисимметричной A0 (б) от соотношения  $k_1 d$

Соотношение нормальных и касательных смещений для мод S0 и A0 представлены на рис. 4. При относительной толщине  $k_1 d = 1,6$  соотношения смещений для мод S0 и A0 равны. Начиная с  $k_1 d \geq 1,8$  смещение  $W_{S0}$  преобладает над  $U_{S0}$ . Диапазоны  $k_1 d$  для максимальной эффективности возбуждения мод A0 и S0 с использованием различных компонент смещений  $k_1 d$  приведены в таблице.

**Диапазоны  $k_1 d$  для максимальной эффективности возбуждения мод A0 и S0 с использованием различных компонент смещений**

Диапазон $k_1 d$	Мода A0		Мода S0	
	Компонента $U_{A0}$	Компонента $W_{A0}$	Компонента $U_{S0}$	Компонента $W_{S0}$
	—	0,4–2,2	<1,8	$\geq 1,8$

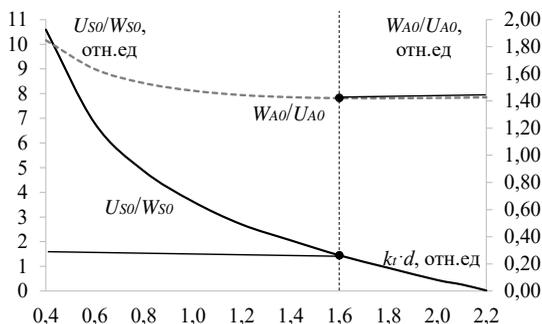


Рис. 4. Зависимость отношений амплитуд нормального и касательного смещений для симметричных и антисимметричных волн от соотношения  $k_d$

## Выводы

Таким образом, исследованные зависимости могут быть использованы для оптимального выбора силового воздействия при возбуждении-приеме волн Лэмба различных мод и различных частот для достижения максимальной эффективности преобразования.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

## Список литературы

1. Khalili, P., Cawley, P. Excitation of single-mode Lamb waves at high-frequency-thickness products // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2015. Vol. 63, no. 2. Pp. 303-312.
2. Matuszyk, P. J. Modeling of guided circumferential SH and Lamb-type waves in open waveguides with semi-analytical finite element and perfectly matched layer method // Journal of Sound and Vibration. 2017. Vol. 386. Pp. 295-310.
3. Nagy, P. B., Simonetti, F., Instanes, G. Corrosion and erosion monitoring in plates and pipes using constant group velocity Lamb wave inspection // Ultrasonics. 2014. Vol. 54, no. 7. Pp. 1832-1841.
4. Rose, J. L. Ultrasonic guided waves in solid media. Cambridge university press, 2014. – 530 p.
5. Wu, J., Tang, Z., Lü, F., Yang, K. Ultrasonic guided wave focusing in waveguides with constant irregular cross-sections // Ultrasonics. 2018. Vol. 89. Pp. 1-12.
6. Ильяшенко, А. В. Теоретические аспекты применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике слоистых анизотропных сред / А. В. Ильяшенко, С. В. Кузнецов // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 3–21.

7. *Муравьева, О. В.* Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 3–11.

8. *Петров, К. В.* Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, М. Ю. Соков, О. В. Муравьева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 135–146.

9. *Стрижак, В. А.* Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 159–166.

10. *Перов, Д. В.* Локализация отражателей в пластинах при ультразвуковом контроле волнами Лэмба / Д. В. Перов, А. Б. Ринкевич // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 27–41.

11. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. – 234 с.

12. *Муравьев, В. В.* Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Л. В. Волкова // Сталь. – 2016. – № 10. – С. 75–79.

13. *Аббакумов, К. Е.* Дисперсионное уравнение для продольной волны в слоистой среде с неоднородными граничными условиями при различных направлениях распространения / К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 22–30.

14. *Викторов, И. А.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – Москва : Наука, 1966. – 169 с.

15. Программа для исследования волноводного распространения акустических сигналов "Elastic Waveguide Tracer" : св-во о гос. рег. программы для ЭВМ РФ. Номер регистрации (свидетельства): RU 2013615397. Дата регистрации: 14.02.2013. Авторы: Муравьев, В. В., Муравьева, О. В., Трефилов, Д. В.

A. A. Ponkina<sup>1</sup>, postgraduate student  
O. V. Murav'eva<sup>1,2</sup>, DSc in engineering, professor  
L. V. Volkova<sup>1</sup>, CSc in engineering, associate professor  
T. S. Chukhlantseva<sup>1</sup>, magister student  
E-mail: fotinaa@list.ru

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Udmurt Federal Research Centre UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

## **Effect of Sheet Wall Thickness on Displacement Diagrams of Normal Lamb Waves**

*Theoretical studies of the effect of thickness and operating frequency on displacement diagrams in sheets for symmetric and antisymmetric modes of normal Lamb waves are carried out. Recommendations for choosing the optimal force action of the transducer to achieve maximum efficiency when measuring the sheet wall thickness are offered. Thus, for the A0 mode, the displacement component  $W_{A0}$  prevails over  $U_{A0}$  over the entire range of relative plate thickness. And for the S0 mode with a relative thickness of  $k_d \geq 1,8$ , the  $W_{S0}$  offset prevails over  $U_{S0}$ .*

**Keywords:** Lamb waves, sheets, dispersion curves, change in thickness.

УДК 620.179.162

А. О. Рыжова, аспирант  
С. А. Бехер, д-р техн. наук, проф.  
E-mail: [annalodo@yandex.ru](mailto:annalodo@yandex.ru)

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

## Оценка возможности контроля плотности посадки прессовых соединений ультразвуковым методом

*Проведены экспериментальные исследования на разработанных и изготовленных образцах натяга и осях колесных пар с надетыми внутренними кольцами подшипников эхо-методом. Экспериментально определены коэффициенты отражения продольных волн от границы деталей для различных значений натяга и в реальных условиях эксплуатации.*

**Ключевые слова:** неподвижные разъемные соединения, посадка с натягом, контроль качества соединений с натягом, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль.

### Введение

От надежности неподвижных разъемных соединений, создаваемых за счет посадки с натягом, зависит долговечность железнодорожных транспортных средств. В частности, ослабление плотности посадки внутреннего кольца подшипника приводит к отказам буксовых узлов колесных пар. При ремонте вагонов натяг колец подшипников на ось определяют до прессовой посадки по разности диаметров: шеек осей и колец. Допустимый диапазон значений натяга по РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017 (Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм) составляет 45–110 мкм. При плановых видах ремонта осей колесных пар для исключения образования задиров на их шейках в результате многократного снятия и повторного монтажа внутренних колец подшипников кольца допускается не снимать. При этом натяг должен удовлетворять требованиям нормативной и технической документации. Для повышения надежности соединения колец с осью, обеспечения безопасности движения, сокращения времени простоя подвижного состава и уменьшения расходов на внеплановый ремонт необходимо совершенствование существующих и разработка новых методов и приборов контроля натяга [1–3].

Для оценки технического состояния соединений с натягом оптимально применение акустических методов, основанных на зависимости коэффициента отражения ультразвуковых волн от границы «кольцо подшипника – шейка оси» от плотности посадки. Способ уже экспериментально опробован в [4] при контроле соединений цилиндрической формы с толщиной охватывающей детали 43 мм. Коэффициент отражения рассчитывался путем сравнения отношений амплитуд первого и второго эхо-сигналов от внутренней поверхности охватывающей детали в свободном состоянии и от границы сопрягаемых поверхностей в готовом соединении. На амплитуду регистрируемых волн существенное влияние оказывают отклонения формы реальных поверхностей от номинальных, наличие дефектов в контролируемых соединениях и непостоянство шероховатости поверхностей соединяемых деталей. Поэтому методики требуют уточнения и верификации для каждого конкретного типа соединений.

Целью работы является исследование принципов распространения акустических волн в соединении внутреннего кольца подшипника с осью при разной плотности посадки для оценки возможности контроля разъемных неподвижных цилиндрических соединений, изготавливаемых методом прессовой посадки.

### **Физическая модель прессового соединения**

Соединение с натягом представляет собой границу раздела двух сред, разделенных зазором, обусловленным шероховатостью, конусностью и овальностью сопрягаемых поверхностей. Толщина зазора  $s$  определяет акустические свойства границы раздела сред и может характеризовать натяг в контролируемом соединении.

При излучении акустических волн амплитудой  $A_0$  под прямым углом к границе раздела сред приемным преобразователем (ПЭП) фиксируется последовательность акустических импульсов, многократно отраженных от границы раздела и от поверхности ввода. В плоской модели амплитуда импульса  $A_k$  пропорциональна амплитуде импульса  $A_{k-1}$  и зависит от коэффициента затухания, коэффициента отражения от границы раздела сред  $R_1$  и коэффициента отражения от поверхности ввода  $R_2$ . В относительных логарифмических единицах (дБ) отношение амплитуд импульсов будет определяться выражением [5]:

$$N = 20 \cdot \text{Lg} \left( \frac{A_k}{A_0} \right) = \alpha \cdot k, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента затухания, длины пути ультразвуковой волны в кольце и коэффициента

отражения от поверхности ввода:

$$\alpha = 20 \cdot \text{Lg}(R_1) + 20 \cdot \text{Lg}(R_2 \cdot e^{-\delta \cdot 2 \cdot l}). \quad (2)$$

Выражение (1) связывает коэффициент пропорциональности амплитуды  $\alpha$  и порядкового номера импульса  $k$  с коэффициентом отражения от границы раздела сред  $R_1$ , который в свою очередь зависит от толщины слоя  $s$  [6]:

$$R = \sqrt{\frac{(z_3 - z_1)^2 + \left(\frac{z_1 \cdot z_3}{z_2}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s}{C}\right)}{(z_3 + z_1)^2 + \left(\frac{z_1 \cdot z_3}{z_2}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot h}{C}\right)}}, \quad (3)$$

где  $z_1$  – акустическое сопротивление материала первой среды, равное для стали 46 МПа·с/м;  $z_2$  – акустическое сопротивление среды зазора, принимаемое для масла равным 1,3 МПа·с/м, а для воздуха – 0,00043 МПа·с/м;  $s$  – толщина зазора, м;  $\lambda_2$  – длина акустической волны во второй среде, м.

Таким образом, экспериментально определенный коэффициент пропорциональности зависимости амплитуды эхо-импульса  $N$  от номера импульса  $k$  в выражении (2) с помощью выражения (3) позволяет оценить толщину контактного слоя соединения  $s$ .

### Описание эксперимента

Эксперименты проводились на специально разработанных образцах с известными значениями натягов. Они представляют собой соединения колец подшипников 36-42726Е2М по ГОСТ 18572–2014 и стальных валов, имитирующих оси. Кольца и валы подбирались таким образом, чтобы обеспечить минимальные, максимальные и средние натяги в эксплуатации.



Рис. 1. Схема испытания образца натяга эхо-методом

Исследования проводились эхо-методом прямым совмещенным ПЭП с рабочей частотой 5,0 МГц. Универсальным эхо-импульсным дефектоскопом генерировался сигнал, которым прозвучивались образцы продольными волнами с поверхности катания в радиальном направлении (рис. 1). Регистрировалась серия эхо-импульсов, переотраженных от границы кольца с осью и поверхности ввода.

### Результаты и их обсуждения

Зависимости амплитуд эхо-импульсов, выраженных в децибелах (дБ), от их порядкового номера удовлетворительно описываются линейной зависимостью с коэффициентом корреляции более 0,9 (рис. 2). Методом наименьших квадратов рассчитаны коэффициенты пропорциональности  $\alpha$  для различных значений натяга. Наименьший наклон зависимости наблюдается для свободного кольца подшипника – 1,9 дБ.

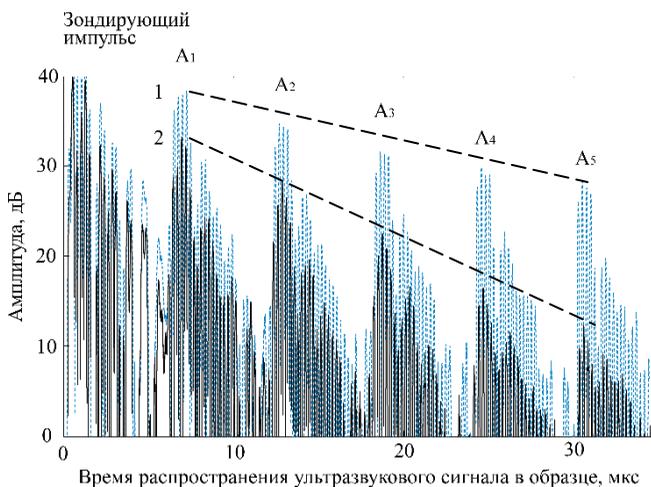


Рис. 2. Серия переотраженных импульсов при прозвучивании:  
1 – кольца в свободном состоянии, 2 – образца натяга

Наклон зависимости для кольца в свободном состоянии определяется затуханием, непрямолинейностью поверхности ввода, раскрытием ультразвукового пучка. Разность между коэффициентами пропорциональности для соединений с натягом и для свободного кольца прямо пропорциональна логарифму коэффициента отражения от границы кольца с осью  $R_1$ :

$$\text{Lg}(R_1) = \frac{\alpha_\Delta - \alpha_0}{20}, \quad (4)$$

где  $\alpha_\Delta$  и  $\alpha_0$  – коэффициенты пропорциональности (наклон) зависимости амплитуд донных сигналов от их порядкового номера для образца натяга и для свободного кольца, соответственно.

Коэффициенты отражения для границ в образцах натяга по (4) составили:  $R_1(40 \text{ мкм}) = 0,66$ ,  $R_1(80 \text{ мкм}) = 0,58$ ,  $R_1(120 \text{ мкм}) = 0,62$ .

Исходя из этого средняя расчетная толщина зазора, заполненного маслом, в исследуемых образцах составляет:  $s(40 \text{ мкм}) = 0,27$ ,  $s(80 \text{ мкм}) = 0,19$ ,  $s(120 \text{ мкм}) = 0,23$ .

Полученные значения толщины зазора с учетом притирания поверхностей соответствуют их шероховатостям  $Ra$ , которые для кольца не превышают 1,25 мкм, а для вала 0,8 мкм.

Результаты контроля в условиях вагоноремонтного депо ультразвуковым методом реальных соединений колец и осей со слабым натягом приведены на рис. 3 (поз. 2). Часть проконтролированных соединений имеет коэффициент пропорциональности близкий к коэффициенту пропорциональности для свободного кольца, что может быть связано с отличием формы оси от цилиндрической формы: конусностью и овальностью. Косвенным подтверждением этого факта является то, что при проведении серии измерений на деталях с малым натягом среднее квадратическое отклонение коэффициента пропорциональности всегда превышает аналогичную величину для соединений с более высоким натягом.

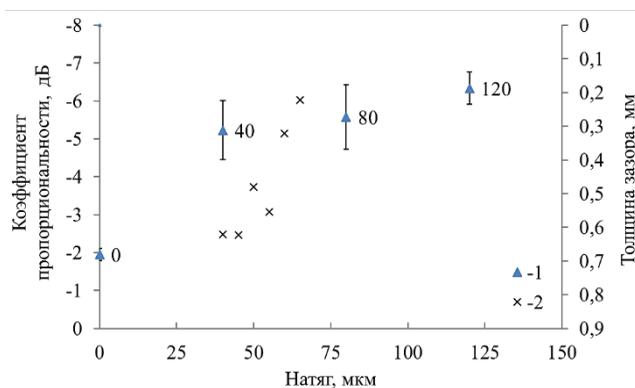


Рис. 3. График зависимости коэффициента пропорциональности и толщины зазора от значения натяга: 1 – образцов, 2 – реальных объектов

## Выводы

Предложена и реализована методика измерения коэффициента отражения от границы прессового соединения, основанная на сравнении коэффициента пропорциональности амплитуд эхо-сигналов от порядкового номера на контролируемом соединении и свободном кольце подшипника. На настроечных образцах экспериментально установлены значения коэффициентов отражения. Наибольший градиент коэффициента отражения на настроечных образцах соответствует диапазону натягов от 0 до 40 мкм. В реальных условиях производства отклонения поверхности оси от цилиндрической формы оказывают существенное влияние на толщину зазора и, следовательно, акустические характеристики соединения. Следовательно, ультразвуковой метод может быть использован для оценки плотности прилегания деталей, обнаружения превышений допустимых значений овальности и конусности.

## Список литературы

1. *Муравьев, В. В.* Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. С. 40–46.
2. *Муравьев, В. В.* Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, М. А. Лапченко // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 3–16.
3. *Муравьев, В. В.* Оценка остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, Е. Н. Балобанов // Дефектоскопия. – 2013. – № 7. – С. 22–28.
4. Ультразвуковой контроль качества соединений с натягом / Г. А. Буденков, В. П. Иванников, А. В. Кабакова, В. А. Стрижак // Дефектоскопия. – 2009. № 8. – С. 73–81.
5. *Муравьев, В. В.* Акустическая тензометрия и структуроскопия тонких стальных проволок : монография / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Платунов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – 108 с.
6. *Муравьев, В. В.* Расчет процесса передачи акустического сигнала через трибосопряжение внутреннего кольца подшипника и оси колесной пары / В. В. Муравьев, Т. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2007. – № 2. – С. 16–26.

A. O. Ryzhova, postgraduate student  
S. A. Bekher, DSc in engineering, professor  
E-mail: [annalodo@yandex.ru](mailto:annalodo@yandex.ru)  
Siberian Transport University STU, Novosibirsk, Russian Federation

## **Evaluation of the Possibility of Testing the Fit Density of Press Joints by Ultrasonic Method**

*Experimental studies were carried out on developed and manufactured samples of tension and axles of wheel pairs with inner rings of bearings using the echo method. The coefficients of reflection of longitudinal waves from the boundary of parts for different values of tension and under real operating conditions are determined experimentally.*

**Keywords:** fixed split joints, tight fit, tight fit quality control, non-destructive testing, ultrasonic testing.

УДК 620.179.16

*М. Ю. Соков*<sup>1</sup>, аспирант  
*Н. Ю. Елькин*<sup>1</sup>, *К. А. Владимиров*<sup>1</sup>, магистранты  
*О. В. Муравьева*<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, проф.  
E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

<sup>1</sup> Ижевский государственный технический университет имени

М. Т. Калашникова

<sup>2</sup> ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», г. Ижевск

## **Спектральный метод контроля трубной резьбы с использованием электромагнитно-акустического преобразователя**

В статье исследована возможность обнаружения дефектов в резьбе наконечников труб. Исследования выполнены на наконечниках труб с резьбой, которые имеют дефект профиля резьбы – треугольник сечения зуба резьбы не симметричен (сточен). Также показана зависимость коэффициента выявляемости дефекта от частоты зондирующего импульса сигнала.

**Ключевые слова:** электромагнитно-акустический преобразователь, зондирующий импульс, зеркально-теневой метод, резьба, дефект, коэффициент выявляемости.

### **Введение**

Трудность обнаружения дефектов в сложном профиле трубной резьбы, разнообразие материалов и типоразмеров деталей существенно затрудняют универсализацию методов неразрушающего контроля (НК). Среди известных методов НК резьбы следует отметить вихретоковый и магнитопорошковый, обеспечивающие достаточно высокую чувствительность [1–4]. Использование акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях [5–6] позволяет существенно снизить трудоемкость контроля, а также уменьшить ограничения минимальных размеров контролируемой резьбы, связанные с размерами измерительного преобразователя.

Цель работы: исследование возможностей обнаружения дефектов в трубной резьбе зеркально-теневым методом на многократных отражениях с использованием спектрального метода анализа сигналов.

### Используемые подходы

Исследования возможности обнаружения дефектов в резьбовом наконечнике трубы осуществляется с помощью экспериментальной установки, позволяющей реализовать акустический зеркально-теневой метод контроля многократных отражений. Разработка специализированного проходного электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП) для контроля деталей с резьбой, анализ создаваемого им магнитного поля и поля вихревых токов и предварительная оценка их эффективности выполнены ранее [7–9].

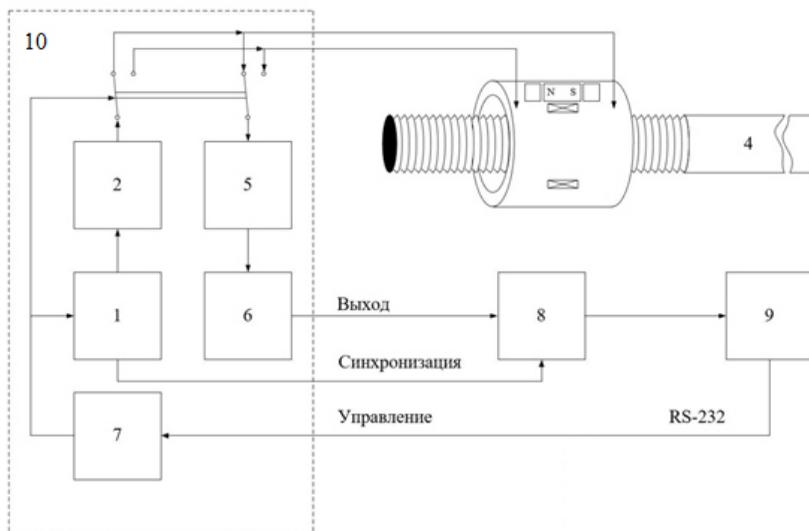


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки для проведения контроля резьбовых наконечников труб:

- 1 – генератор синхроимпульсов; 2 – генератор зондирующих импульсов;
- 3 – проходной ЭМАП; 4 – исследуемый образец с резьбой; 5 – полосовой фильтр; 6 – высокочастотный усилитель; 7 – плата управления с установкой;
- 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 9 – персональный компьютер (ПК);
- 10 – дефектоскоп ДЭМА-П

Структурная схема экспериментальной установки, реализующей метод, представлена на рис. 1. Установка работает следующим образом: с генератора 2 подается зондирующий импульс (ЗИ) на специализированный проходной ЭМА-преобразователь 3, навинчиваемый на участок трубы с резьбой. Переотраженная по толщине стенки трубы с резьбой

УЗ-волна регистрируются тем же проходным преобразователем, преобразующим принятые акустические колебания в электрические импульсы, которые через фильтр 5 и усилитель 6 поступают на плату АЦП 8. Далее данные с АЦП передаются на ПК 9 для их дальнейшей обработки.

Для экспериментальных исследований изготовлены образцы из трубы М 32 x 2,5 ГОСТ 3262-75 из стали 20 с резьбой по ГОСТ 6357-73. Геометрические параметры объектов контроля: диаметр – 32 мм, длина резьбы – 40 мм, шаг резьбы – 2,5 мм, высота профиля резьбы – 1 мм. На одном из образцов был создан искусственный дефект – несимметричный треугольник сечения зуба резьбы.

### Результаты и обсуждение

Исследования проводились на дефектных и бездефектных образцах при различной частоте зондирующего импульса (ЗИ) 1 МГц, 1,3 МГц, 1,5 МГц и 2,2 МГц.

Вид осциллограмм принятого сигнала на дефектной и бездефектной резьбе представлен на рис. 2 и 3, соответственно.

Спектр принятых сигналов анализировался в специализированной программе WinПОС Professional. В качестве примера на рис. 4 приведены спектры акустического сигнала дефектного и бездефектного участков резьбы при частоте зондирующего импульса 1 МГц в линейном и логарифмическом масштабах.

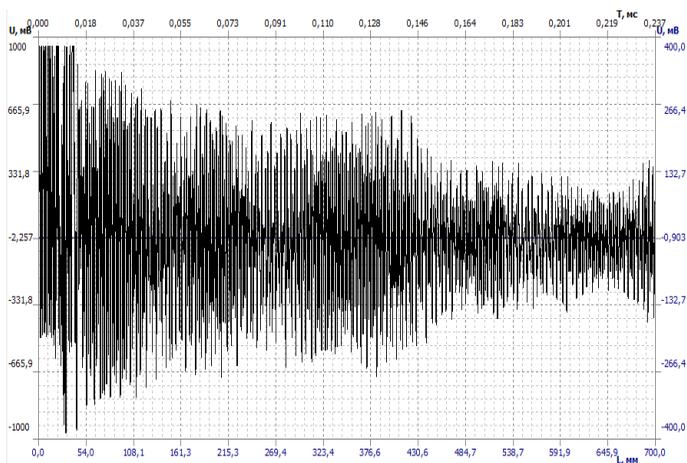


Рис. 2. Вид осциллограмм принятого сигнала на бездефектном участке резьбы

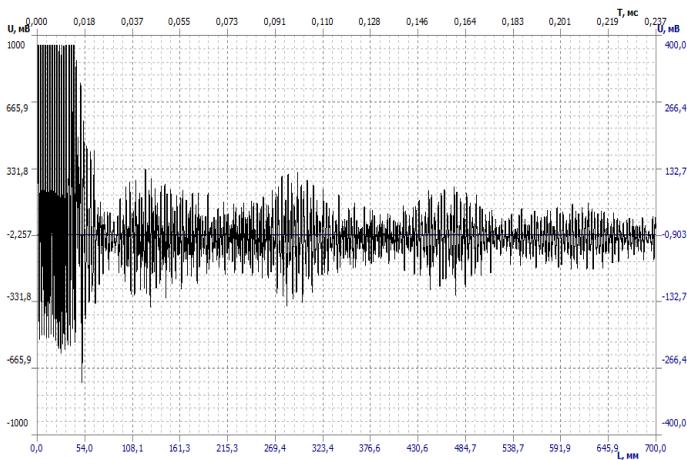


Рис. 3. Вид оциллограмм принятого сигнала на дефектном участке резьбы

Вне зависимости от частоты зондирующего импульса в спектре акустического сигнала присутствуют пять основных составляющих: 0,8 МГц, 1 МГц, 1,2 МГц, 1,3 МГц и 1,7 МГц различных амплитуд. При этом наблюдается смещение максимума спектральной составляющей в сторону более низких частот даже при увеличении резонансной частоты зондирующего импульса.

Наблюдается также уменьшение отдельных спектральных составляющих для дефектного участка резьбы относительно бездефектного. В частности, для зондирующего импульса с частотой 1 МГц спектральная составляющая сигнала на 0,8 МГц ослабляется на 6 дБ, 1 МГц – на 12 дБ, 1,3 МГц – на 6 дБ, 1,7 МГц – на 22 дБ.

В качестве информативного параметра зеркально-теневого метода введем понятие спектрального коэффициента выявляемости.

При контроле резьбы зеркально-теневым методом с использованием многократных отражений коэффициент выявляемости находится как отношение основных составляющих спектра при наличии дефекта и в отсутствии дефекта:

$$K_B = \frac{U_D}{U_0}, \quad (1)$$

где  $U_D$  – амплитуда спектральной составляющей сигнала при наличии дефекта;  $U_0$  – амплитуда спектральной составляющей в отсутствие дефекта.

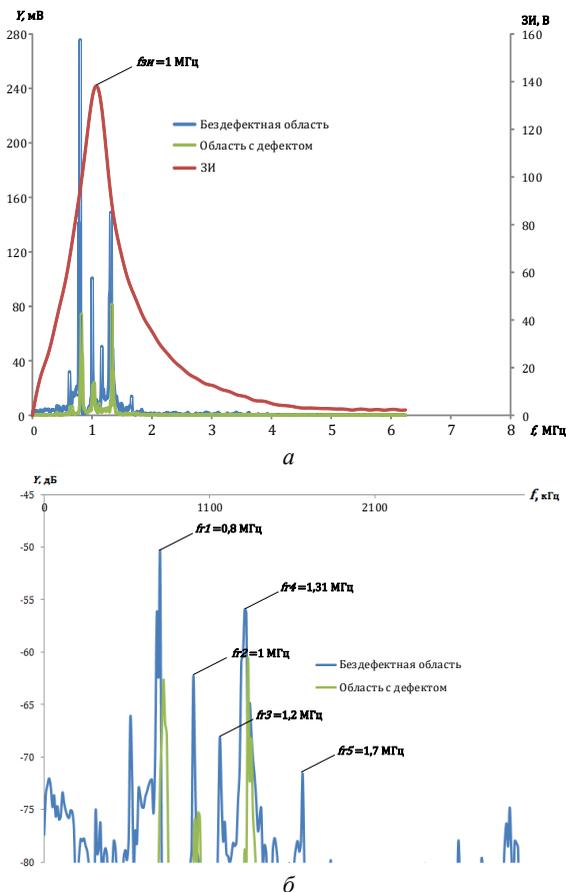


Рис. 4. Спектр акустического сигнала дефектного и бездефектного участков резьбы при частоте зондирующего импульса 1 МГц в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента выявляемости от частоты зондирующего импульса для различных спектральных составляющих.

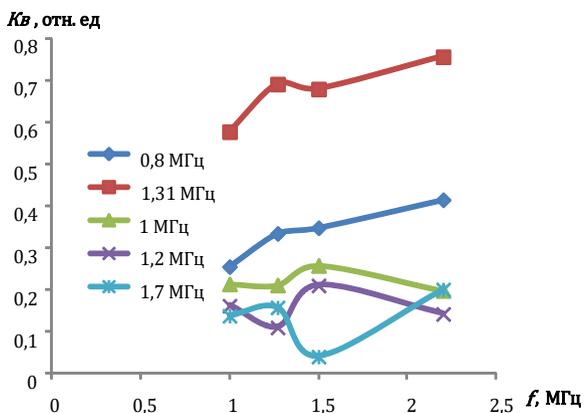


Рис. 5. Зависимости коэффициента выявляемости от частоты ЗИ для пяти основных составляющих спектра акустического сигнала

На основании полученных зависимостей наиболее оптимальной частотой ЗИ для контроля данной резьбы является частота 1 МГц, позволяющая получить максимальное ослабление основных составляющих сигнала на дефектном образце. При этом повышение частоты ЗИ выше 2 МГц позволяет также использовать высокочастотные составляющие сигнала в качестве дополнительных параметров контроля. Для выявления дефектов наиболее информативными являются составляющие спектра 1,2 МГц и 1,7 МГц. Составляющая 1,7 МГц в большей степени ослабляется дефектной резьбой при частоте ЗИ 1,5 МГц.

### Выводы

Таким образом, в работе показана возможность контроля наружной резьбы труб акустическим зеркально-теневым методом с использованием многократных отражений спектральным методом с определением коэффициента выявляемости на отдельных спектральных составляющих сигнала.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 1.2405.2017/4.6) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

### Список литературы

1. Структуроскопия изделий из полимерных материалов с помощью анализа мгновенного спектра ультразвуковых сигналов / В. К. Качанов, И. В. Соколов, В. В. Первушин, Д. В. Тимофеев // Дефектоскопия. – 2019. – № 6. – С. 3–10.
2. Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий / Г. М. Сучков, Р. П. Мигушенко, О. Ю. Кропачек, С. Ю. Плесенцов, З. В. Билык, Ю. Е. Хорошайло, С. А. Ефименко, Б. Салам // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 14–21.
3. *Бабкин, С. Э.* Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком / С. Э. Бабкин // Дефектоскопия. – 2020. – № 4. – С. 32–39.
4. *Муравьев, В. В.* Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости / В. В. Муравьев, К. А. Тапков, С. В. Леньков // Дефектоскопия. – 2019. – № 1. – С. 10–16.
5. *Муравьев, В. В.* Оценка накопленной поврежденности шеек осей колесных пар вагонов ультразвуковым методом с использованием рэлеевских и головных волн / В. В. Муравьев, Л. В. Гущина, С. В. Казанцев // Дефектоскопия. – 2019. – № 10. – С. 14–23.
6. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 37–44.
7. *Петров, К. В.* Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, М. Ю. Соков, О. В. Муравьева // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2018. – № 2. – С. 135–146.
8. *Муравьева, О. В.* Формирование акустического поля проходного преобразователя в деталях с резьбой / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков, Ю. В. Мышкин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – № 4. – С. 45–56.
9. *Булдакова, И. В.* Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением / И. В. Булдакова, Л. В. Волкова, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 4–8.

M. Y. Sokov<sup>1</sup>, postgraduate  
N. Y. Elkin<sup>1</sup>, K. A. Vladimirov<sup>1</sup>, magister student  
O. V. Muravieva<sup>1,2</sup>, DSc in engineering, professor  
E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

## **Spectral Method for Testing the Pipe Threads Using an Electromagnetic-Acoustic Transducer**

*The article explores the possibility of detecting defects in pipes. The studies were carried out on a pipe with a thread, in which there is a defect - the triangle of the thread tooth is not symmetrical (worn out), inconsistency with the thread profile. The dependence of the defect detection coefficient on the frequency of the probing signal pulse is shown.*

**Keywords:** electromagnetic-acoustic transducer, probing pulse, mirror-shadow method, thread, defect, detection rate.

УДК 620.179

*К. А. Тапков*<sup>1</sup>, ведущий инженер

*В. В. Муравьев*<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

<sup>1</sup> Ижевский государственный технический университет имени

М. Т. Калашникова

<sup>2</sup> ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», г. Ижевск

## **Развитие усталостной трещины в головке рельса**

*Исследован процесс зарождения и развития усталостной трещины в головке рельса при прохождении подвижного состава с грузовой тележкой ЦНИИ-ХЗ, массой 93 тонны брутто. Выявлено, что при уровне напряжений, соответствующих приемочным требованиям согласно ГОСТ 51685–2013, зарождение трещины происходит при наработке 1846 млн тонн брутто, а переход рельса в острodefектную категорию происходит при наработке 1883 млн тонн брутто. Показано, что повышение уровня остаточных технологических напряжений приводит к уменьшению пропущенного тоннажа до перехода рельса в острodefектное состояние.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, рельс, усталостные трещины, остаточные напряжения.

### **Введение**

Одним из наиболее опасных является дефект в виде усталостной трещины в головке рельса [1–3], который может появиться при эксплуатации рельса. Рельс имеет сложное напряжённо-деформированное состояние, включающее как внутренние напряжения (остаточные технологические напряжения, температурные напряжения), так и влияние циклического воздействия подвижного состава, что требует описания прикладываемых нагрузок.

Целью работы явилось моделирование процесса зарождения и развития трещины в головке рельса в условиях напряжённо-деформированного состояния и циклического воздействия со стороны подвижного состава.

### **Исходные положения**

Сила, прикладываемая подвижным составом через колесо к поверхности катания рельса, имеет вертикальное направление при равномерном движении поезда на горизонтальном прямом участке. Для расчета

числа циклов при усталости рельса масса вагона принимается значением 93 т, что является максимальной грузоподъемностью тележки ЦНИИ-ХЗ (брутто). В таком случае статическая нагрузка, приходящаяся на каждое колесо, составляет 11,625 т (113,925 кН). При этом пятно контакта представляет собой эллипс размерами 12,6×9,6 мм [4], что эквивалентно площади 95 мм<sup>2</sup>.

В то же время даже на прямолинейных участках может присутствовать боковая нагрузка, создаваемая гребнем колеса при наезде колеса на рельс под некоторым углом. Значение этой силы на прямолинейных участках пути может достигать значений 66 кН [4], что сопоставимо со значением статической нагрузки на рельс, и потому учёт этой силы также необходим для адекватного построения модели.

Необходимо отметить, что при прохождении подвижного состава нагрузка на рельс имеет резкопеременный характер. При этом значение силы динамического нагружения превосходит статическую силу в 1,6 раза [4].

При моделировании выбрано стандартное значение количества шпал 2000 шт. на 1 километр пути, значение модуля деформации грунта принято за 70 МПа [2]. Модель представляет собой участок рельса длиной 2 м, при этом крайние шпалы и подошва рельса на них жёстко закреплены. Изгибные моменты, возникающие вследствие наличия продольных напряжений в рельсе (как температурных, так и остаточных технологических), не учитываются. Влияние постели, находящейся под подошвой рельса вне шпалы, также не учитывается.

Размер сетки конечных элементов переменный: вблизи поверхности катания размер элементов колеблется от 0,2 мм до 0,5 мм, в остальной области от 1 до 3 мм. Погрешность расчёта модели составляет 5 %. Моделирование выполнялось в программной среде *COMSOL Multiphysics*.

Результатом расчёта модели выступает расположение трещины при заданном количестве циклов. Одним нагрузочным циклом является прохождение одного колеса. На практике наработка рельса оценивается в миллионах тонн брутто. Перерасчёт количества циклов к миллионам тонн брутто осуществляется по следующей формуле:

$$m(\text{брутто}) = \frac{m_{\text{в}} \cdot N_1 \cdot 4}{n}, \quad (1)$$

где  $m$  (брутто) – пропущенный тоннаж, т;  $m_{\text{в}}$  – масса вагона с грузом, т;  $N_1$  – количество циклов нагружения;  $n$  – количество колёс вагона, множитель 4 обусловлен двумя факторами. Во-первых, путь является дуниточным, в результате чего пропущенный тоннаж увеличивается в два раза, во-вторых, по каждой нитке пути проходит  $n/2$  колёс, однако мно-

житель  $n$  находится в знаменателе, и множитель 2 переносится в числитель. При расчёте масса  $m_b$  грузовой тележки с вагоном и грузом ЦНИИ-ХЗ была принята значением 93 т (максимальная масса брутто для данного типа тележек). Описание прикладываемой нагрузки со стороны подвижного состава, количество колёс на вагон  $n = 8$ .

### **Зарождение и рост усталостной трещины**

Механизм разрушения исследовался по  $S-N$  кривой, аппроксимированной согласно данным для рельсовой стали Э76ХФ. В таком случае предел прочности составил  $\sigma_b = 1180$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 800$  МПа, предел выносливости  $\sigma_{-1} = 370$  МПа.

Проведен расчет числа циклов рельса при отсутствии температурных напряжений, но при наличии значений технологических напряжений:  $-77$  МПа в головке рельса,  $-125$  МПа в шейке рельса и  $106$  МПа в подошве рельса, что соответствует расхождению паза в  $2$  мм [5–11].

При описанном выше уровне остаточных технологических напряжений зарождение трещины происходит при  $7,94 \cdot 10^7$  циклов, что равносильно наработке  $1846$  млн тонн брутто. Очаг трещины расположен на глубине  $3,8$  мм и на расстоянии  $1,9$  мм от вертикальной оси симметрии рельса. Также образуется еще один очаг на глубине  $3,9$  мм и на расстоянии  $0,2$  мм от вертикальной оси симметрии рельса.

При  $8,1 \cdot 10^7$  циклов, что равносильно наработке  $1883$  млн тонн брутто, очаги в головке сливаются в одну трещину размером порядка  $5,1$  мм. В связи с тем, что данная поперечная трещина, относящаяся к дефекту 21.2 согласно каталогу дефектов рельсов НТД/ЦП-2-93, проходит через ось симметрии рельса, такой рельс относится к категории остродефектных и подлежит дальнейшей замене.

Для анализа наличия либо отсутствия зависимости между уровнем остаточных технологических напряжений и возникновением трещины была создана модель рельса со значениями напряжений по элементам, не превышающим половины от первоначально принятых. Таким образом, напряжения в головке, шейке и подошве соответственно составили:  $-38,5$  МПа,  $-62,5$  МПа,  $53$  МПа. В этом случае зарождение трещины происходит при  $8,55 \cdot 10^7$  циклов, соответственно при наработке  $1987$  млн тонн брутто, что превышает число циклов до появления трещины при наличии максимально допустимых напряжений. Зарождение трещины происходит на глубине  $3,5$  мм от поверхности катания, на расстоянии  $2,0$  мм от вертикальной оси симметрии рельса.

Размера в  $4$  мм трещина достигает при  $8,65 \cdot 10^7$  циклов, что соответствует наработке  $2011$  млн тонн брутто. В связи с тем, что трещина про-

ходит через середину рельса, согласно НТД/ЦП-2-93 рельс переходит в категорию остродефектных.

Помимо моделей с 50% уровнем остаточных технологических напряжений от первоначального, для анализа была создана модель рельса со значениями напряжений по элементам, превышающим первоначальный уровень в 1,5 раза. Таким образом, напряжения в головке, шейке и подошве соответственно составили:  $-115,5$  МПа,  $-187,5$  МПа,  $159$  МПа. Зарождение трещины происходит при  $7,25 \cdot 10^7$  циклов, что соответствует наработке 1685 млн тонн брутто, что меньше числа циклов до появления трещины в случае первоначального значения напряжений. Образуются два очага трещин на глубине 3,5 мм и расстоянии от вертикальной оси симметрии рельса в 0,6 мм и 1,7 мм соответственно.

При числе циклов  $7,35 \cdot 10^7$ , что соответствует наработке 1709 млн тонн брутто, общая длина трещины составляет 3,8 мм, и образовавшаяся поперечная трещина проходит через центр рельса. Таким образом, рельс признается остродефектным.

### Выводы

Обнаружена прямая зависимость между числом циклов до зарождения трещины и уровнем остаточных технологических напряжений. Так, при уровне напряжений  $-77$  МПа в головке,  $-125$  МПа в шейке рельса и  $106$  МПа в подошве рельса зарождение усталостной трещины происходит при пропущенном тоннаже 1846 млн тонн брутто, при уровне напряжений, превышающем первоначальный в 1,5 раза, зарождение трещины происходит при наработке 1685 млн тонн брутто, при уровне напряжений 0,5 от первоначального зарождение трещины происходит при наработке 1987 млн тонн брутто. Также необходимо отметить, что при этом практически не изменяется скорость роста усталостной трещины, оцениваемой по тангенсу угла наклона (мм/цикл).

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ Бел-а (проект № 20-58-0015) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследования акустических свойств материалов и изделий».*

### Список литературы

1. Щепотин, Г. К. Прогнозирование отказов рельсов и аварийных ситуаций / Г. К. Щепотин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4 (51). – С. 5–11.
2. Величко, Д. В. Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали / Д. В. Величко, А. А. Севостьянов, Е. С. Антерейкин // Вестник

Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (48). – С. 5–11.

3. *Markovic, N., Brajovic, L., Malovic, M.* Methods for determination of residual stress in rail // XVIII Scientific-expert conference on Railways RAILCON'18. 11-12 Oct. 2018, Niš, Serbia. 2018. Pp. 113-116.

4. Расчёты предельного состояния рельсов на основе моделирования их ресурса по дефектам 21.1, 21.2, 53.1, 59 / А. Ю. Абдурашитов, Д. В. Овчинников, В. А. Покацкий, П. В. Сычёв // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 6. – С. 24–29.

5. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова, Л. В. Гущина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 13–23.

6. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость // В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 37–44.

7. ГОСТ 51685-2013.

8. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 78–88. – DOI: [10.22213/2413-1172-2019-1-78-88](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2019-1-78-88).

9. *Волкова, Л. В.* Использование многократного зеркально-теневого метода при ультразвуковом контроле пера подошвы рельса / Л. В. Волкова, А. В. Платунов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 38–45. – DOI: [10.22213/2413-1172-2019-4-38-45](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2019-4-38-45).

10. *Муравьева, О. В.* Формирование акустического поля проходного преобразователя в деталях с резьбой / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков, Ю. В. Мышкин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 45–56. – DOI: [10.22213/2410-9304-2018-4-45-56](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2018-4-45-56).

11. Исследование двухосного напряженного состояния в рельсах Р65 методом акустоупругости / В. В. Муравьев, А. В. Якимов, Л. В. Волкова, А. В. Платунов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17, № 1. – С. 19–25. – DOI: [10.22213/2410-9304-2019-1-19-25](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2019-1-19-25).

*K. A. Tapkov*<sup>1</sup>, engineer

*V. V. Muravev*<sup>1,2</sup>, DSc in engineering, professor, head of department

E-mail: [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

## **Rise of Fatigue Crack in the Head of the Rail**

*The process of crack birth and rise in the head of the rail with the train load with CNII-X3 (93 tons) is described. It is founded, that in case if stresses, which fits to the GOST 51685-2013, crack birth happens after operational time of 1846 million tons, and rail become in dangerous defect category after operational time of 1883 million tons. Also, it is found that rise of residual stresses after rail producing decreases rail lifetime for safety usage.*

**Keywords:** math modeling, rail, fatigue crack, residual stresses.

УДК 620.179.16

*Р. Р. Хасанов*, аспирант

E-mail: [beif@mail.ru](mailto:beif@mail.ru)

*М. В. Сяктерев*, магистрант

E-mail: [maks.syakterev@mail.ru](mailto:maks.syakterev@mail.ru)

*В. С. Егоров*, студент

E-mail: [skillet2828@mail.ru](mailto:skillet2828@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Стенд для контролируемого нагрева при испытаниях композитной арматуры**

В работе приведено описание экспериментальной установки для исследований скорости распространения и затухания стержневых волн при нагревании в композитной арматуре эхо-импульсным методом. Рассмотрено оборудование для возбуждения, приема и регистрации акустических сигналов, распространяемых в стержнях композитной арматуры. Установка позволяет разогревать фрагмент композитной арматуры длиной 1 м в течение 45–120 минут с непрерывной регистрацией температуры. Точность установления температуры не хуже 0,1 °С.

**Ключевые слова:** композитная арматура, волноводный метод, акустический контроль, линейно-протяженные объекты.

### **Введение**

Композитная арматура – это неметаллические стержни из стеклянных, базальтовых, углеродных или арамидных волокон, пропитанных термореактивным или термопластичным полимерным связующим с последующим отверждением [1]. В качестве типичных измеряемых характеристик используют предел прочности при растяжении, модуль упругости, предел прочности при изгибе, плотность, степень армирования и т. д., но возможны изменения в композитной арматуре, которые происходят и после ее изготовления, в частности, не закончившиеся термохимические процессы в структуре композитной арматуры. Существуют методы дефектоскопии композитной арматуры, основанные на волноводном методе контроля [2, 6]. Волноводный метод основан на способности низкочастотных акустических волн распространяться по волноводу на значительные расстояния [7–11]. Цель работы – разработка стенда, обеспечивающего нагрев композитной арматуры, с одновременным измерением скорости акустической волны для проведения исследований незавершенных процессов отверждения и полимеризации, а

также исследования на возможные изменения структуры арматуры при воздействии температур (до 70 °С).

### Волноводный метод неразрушающего контроля композитной арматуры

Волноводный метод неразрушающего контроля, реализуемый с помощью дефектоскопа АДНШ, возможно применить для структуроскопии и дефектоскопии стеклопластиковой композитной арматуры, при котором информативным параметром является скорость распространения стержневых волн [12–17]. Метод реализуется при помощи послыски в объект контроля акустического импульса с последующей регистрацией отраженного эхосигнала тем же датчиком. Блок-схема дефектоскопа представлена на рис. 1.

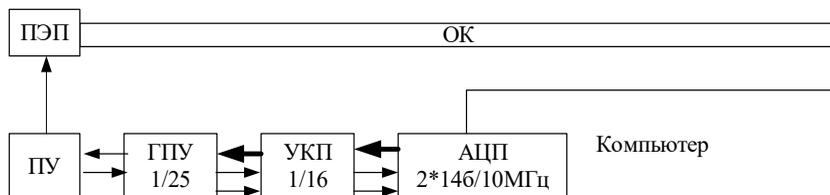


Рис. 1. Структурная схема дефектоскопа АДНШ/АДНКТ:  
ПЭП – пьезоэлектрический приемник; ПУ – переходное устройство; ГПУ – блок генератора и усиления; УКП – блок усиления и коммутации; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Эхограмма композитной арматуры длиной 844 мм содержит зондирующий и серию донных импульсов (рис. 2). Измерение времени производится в автоматическом режиме между первым и вторым донным импульсом при инверсии второго донного импульса. Эхограммы обрабатываются с применением специального программного обеспечения, реализующего линейную интерполяцию по семи точкам с последующим определением времени сдвига между импульсами по максимуму корреляционной функции. Возбуждение и прием выполняется с помощью пьезоэлектрического преобразователя, работающего в совмещенном режиме.

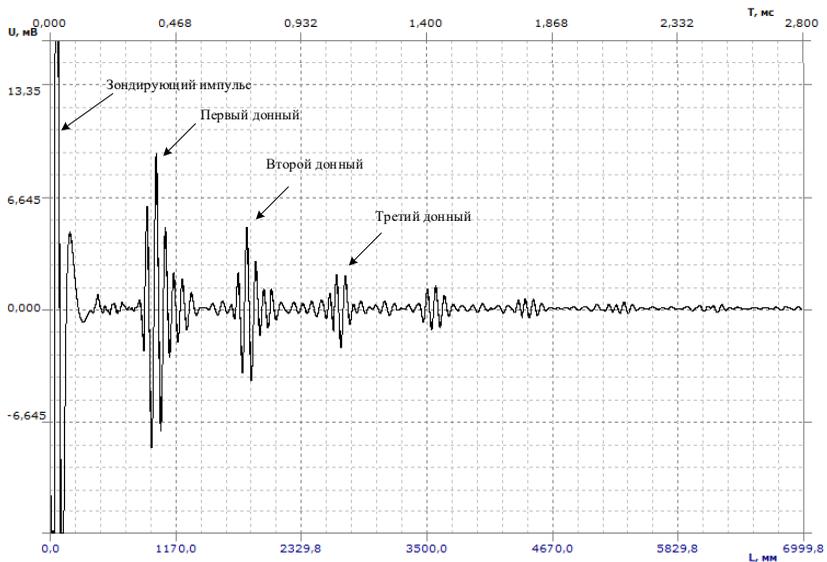


Рис. 2. Эхограмма волноводного контроля АКП

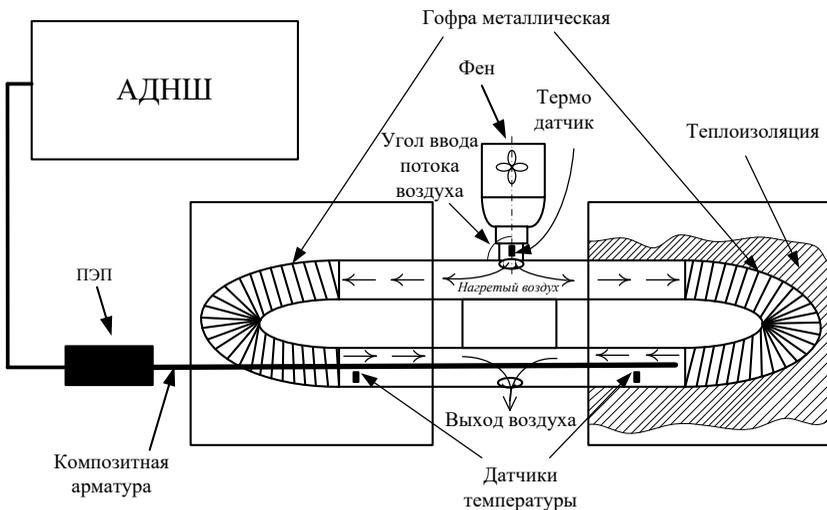


Рис. 3. Блок-схема установки

### Экспериментальная установка

На рис. 3 показана экспериментальная установка и схема ее нагрева. Установка состоит из двух камер, верхняя камера предназначена для успокоения воздушного потока, в нижнюю камеру устанавливается испытуемый образец. Обе камеры помещены в теплоизолированный корпус. Нагретый воздух подается в верхнюю камеру, где разделяется на 2 потока. Проходя по левому и правому каналу, нагретый воздух попадает в нижнюю камеру и удаляется через нижнее отверстие. Температура воздуха в установке контролируется двумя электронными термометрами с ценой деления каждого 0,1 °С, что позволяет оценивать среднюю температуру воздуха в камере нагрева арматуры и контролировать отсутствие градиента теплового поля рядом с образцом от правого и левого воздуховода.

В качестве нагревателя использовался профессиональный строительный фен GHG-660 Professional (таблица) с возможностью задания температуры с шагом в 10 °С и индикатором температуры воздушного потока.

#### Характеристики строительного фена Bosch GHG-660 Professional

Мощность, Вт	2300
Минимальная рабочая температура, °С	50
Максимальная рабочая температура, °С	660
Максимальный воздушный поток, л/м	500
Шаг задания температуры, °С	10

### Проведение эксперимента

Один торец арматуры погружается в экспериментальную установку, на противоположный торец устанавливается ПЭП. Сверху в отверстие вставляется строительный фен, нагнетающий нагретый воздух, расходящийся по всей установке. Контроль равномерности нагрева осуществляется двумя термодатчиками, установленными по длине с разных сторон объекта контроля, что дает возможность контроля неравномерности нагрева и получения средней температуры.

Регулировка градиента температуры между концами арматуры осуществляется за счет смещения фена от перпендикулярного положения к воздуховоду.

Процесс нагревания производится в режиме минимальной мощности. В начале эксперимента фен устанавливается на температуру воздушного потока 50 °С. С помощью дефектоскопа АДНШ при увеличении показания температуры с термодатчиков на 1 °С снимаются эхограммы распространения стержневых волн (рис. 2). После достижения

средней температуры  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в камере нагрева арматуры температура воздуха на выходе фена увеличивается на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После достижения температуры воздуха в камере нагрева  $66\text{ }^{\circ}\text{C}$  температура на выходе фена уменьшается до  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и продолжается сохранение эхограмм с каждым уменьшением температуры в камере нагрева на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После достижения в камере нагрева  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  нагревательный фен снимается и продолжается сохранение эхограмм до падения температуры до  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлен процесс нагрева стэнда в течение времени. С левой стороны отложена шкала температуры нагрева воздуха в установке, по горизонтали – время нагрева, на шкале справа – разница температур с левого и правого термодатчиков. На рисунке видно, что процесс нагрева поделен на этапы, ограниченные точками изменения температуры нагрева воздушного потока. До линии *A* температура нагрева воздуха феном  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на участке *AB* нагрев  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на участке *BC* нагрев  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на участке *CD* нагрев  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Видно, что дисбаланс температур при нагревании не превышает  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а после пятидесяти градусов (участок *E*) режим охлаждения протекает с ростом разницы температур в камере с образцом. Дисбаланс температур вызван неконтролируемым процессом охлаждения при изменении направления движения воздуха в установке для замещения горячего воздуха холодным воздухом под действием самотёка (рис. 4).

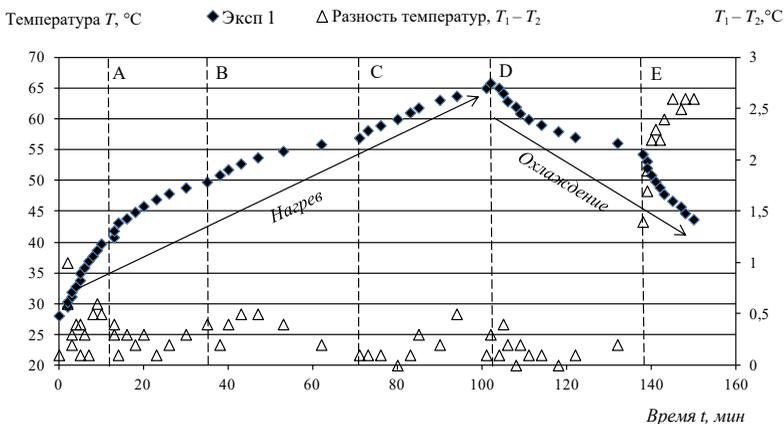


Рис. 4. Процесс нагрева с течением времени

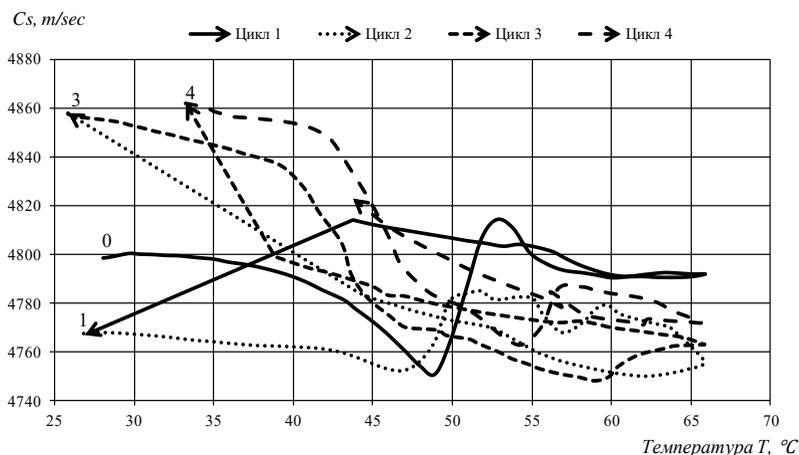


Рис. 5. Зависимость скорости стержневой волны от температуры

Средняя скорость нагрева составила  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Разница температур между двумя датчиками температуры при нагреве колебалась в диапазоне  $0\text{--}0,6 \text{ }^\circ\text{C}$  (на стадии охлаждения после участка *E* – до  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

На рис. 5 показан набор зависимостей скорости стержневой волны от температуры при 4 циклах ее нагревания. По вертикали отложена скорость распространения стержневых волн  $C_s$ , м/с, по горизонтали – температура в камере с арматурой. Цифрами на начальных участках линий показаны циклы нагреваний образца. Разворот линии после точки  $66 \text{ }^\circ\text{C}$  соответствует началу процесса остывания. Колебания скорости составили  $100 \text{ м/с}$  ( $2,1 \%$ ). Неповторяющийся цикл говорит о наличии процессов в композитной арматуре, вызванных ее нагреванием.

## Выводы

Разработана экспериментальная установка, предназначенная для исследований скорости распространения и затухания стержневых волн при нагревании в композитной арматуре эхо-импульсным методом. Экспериментальная установка позволяет нагревать образцы в диапазоне температур  $20\text{--}66 \text{ }^\circ\text{C}$ . Процесс нагрева контролируется двумя термометрами с ценой деления  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  и разницей в показаниях  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Цикл измерения составляет 160 минут. Точность измерения скорости –  $1,5 \text{ м/с}$ .

*Работа выполнена в рамках проекта №FZZN-2020-0011 (Исследование динамики и разработка алгоритмов управления мобильных роботов) по Государственному заданию Министерства образования и науки.*

### Список литературы

1. ГОСТ 31938–2012 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия (с Поправкой). – Текст : электронный // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : [сайт]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200101115> (дата обращения: 11.12.2019).
2. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 78–88.
3. Пат. 2688877 RU, МПК G01N 29/04 (2006.01), С1. Способ определения прочностных характеристик полимерных композиционных материалов : № 2018117638 : заявл. 1105. 2018 : опубл. 22.05.2019 / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов.
4. Неразрушающий контроль композитной полимерной арматуры / А. В. Бучкин, В. Ф. Степанова, В. А. Стрижак, Е. Ю. Юрин, Е. И. Никишов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – № 1 (24). – С. 23–35.
5. Влияние водопоглощения на скорость распространения нормальных волн в композитной арматуре / О. В. Муравьева, Р. Р. Хасанов, В. А. Стрижак, С. С. Мкртчян, М. В. Сяктерев, О. В. Муравьева // SIBTEST – 2019 : сб. тез. докл. V Междунар. конф. по инновациям в неразрушающем контроле. – Томск, 2019. – С. 67–68.
6. *Muravieva, O. V., Khasanov, R. R., Strizhak, V. A., Mkrтчyan, S. S.* Water absorption effect on the propagation velocity of normal waves in composite rebars // Materials Science Forum. 2019. Vol. 970. Pp. 202-209.
7. *Буденков, Г. А., Недзвецкая, О. В., Стрижак, В. А.* Акустика затрубного пространства добывающих и нагнетательных скважин / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, В. А. Стрижак // Дефектоскопия. – 2003. – № 8. – С. 3–10.
8. Эффективность использования стержневых и крутильных волн для контроля пруткового проката / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, Т. Н. Лебедева // Дефектоскопия. – 2004. – № 3. – С. 3–8.
9. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Б. А. Буденков, Т. Н. Лебедева, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 50–55.
10. *Муравьева, О. В.* Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2013. – № 2. – С. 43–51.
11. *Муравьева, О. В.* Оценка чувствительности метода акустической рефлектометрии к дефектам теплообменных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2017. – № 3. – С. 27–34.
12. Импульсный метод измерения скорости ультразвука / Г. А. Буденков, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Г. А. Полянкин, Я. Ю. Коршунов, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 1998. – № 9. – С. 3–8.
13. Технология акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Му-

рашов, А. В. Пряхин // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 4. – С. 51–56.

14. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 110 – 115.

15. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Фокеева // Дефектоскопия. – 2014. – № 8. – С. 43–51.

16. Опыт приемочного акустического контроля и упрочнения насосных штанг при сервисном обслуживании / Г. А. Буденков, О. В. Коробейникова, Н. А. Кокорин, В. А. Стрижак // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – № 4. – С. 14–19.

17. Акустический волноводный контроль линейно протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. – 234 с.

*R. R. Khasanov*, postgraduate student

E-mail: [beif@mail.ru](mailto:beif@mail.ru)

*M. V. Syakterev*, master student

[maks.syakterev@mail.ru](mailto:maks.syakterev@mail.ru)

*V. S. Egorov*, student

E-mail: [skillet2828@mail.ru](mailto:skillet2828@mail.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Stand for Controlled Heating during Testing of Composite Fittings**

*The paper describes an experimental setup for studying the propagation speed and attenuation of rod waves when heated in a composite armature by the echo-pulse method. The equipment for excitation, reception and registration of acoustic signals propagated in the rods of composite reinforcement is considered. The installation allows heating a fragment of composite reinforcement 1 m long for 45-120 minutes with continuous temperature recording. The accuracy of setting the temperature is not worse than 0.1 °C.*

**Keywords:** composite reinforcement, waveguide method, acoustic control, linear-extended objects.

### Секция 3. Радиотехника, связь, информационные технологии

УДК 004.896

*Ali Rawan*, master student

E-mail: [eng.rawan.sy@gmail.com](mailto:eng.rawan.sy@gmail.com)

*Al Akkad M. Aiman*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: [aimanakkad@yandex.ru](mailto:aimanakkad@yandex.ru)

Department of Computer Science

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation<sup>1</sup>

## Machine Learning in Robotic Grasping Tasks: A Survey

*Recently machine learning techniques, including deep learning and reinforcement learning, have been considered as the milestone in the field of computer vision and vision-based robot tasks, such as grasping. This survey presents a set of recent approaches in the field of object pick-and-place tasks and object grasping tasks. These approaches are categorized into two groups, deep-learning-based approaches, and reinforcement-learning-based approaches. Task-oriented grasping decisions for humans, are made intuitively, while it is a big challenge for robots to achieve the grasping tasks as proficient as humans. Several conditions affect the performance of robot grasping such as changes in environment and illumination, existence of a huge number of objects with different properties, complex backgrounds, and occlusion between objects. Machine learning techniques are implemented in robotic systems to improve the capability of these robots to handle these conditions and guarantee high performance.*

**Keywords:** robotics, machine learning, deep learning, reinforcement learning, grasping tasks, object detection.

### 1. Introduction

In the last few years, the use of robots in grasping and pick-and-place tasks is rapidly increased, either in the industrial fields [1] or the other life activities such as assistive robots [2].

Grasping task requires a set of decisions depend on the aim of the manipulation task. Fig. 1 [4] shows that a robot grasps the same object in two different ways according to the manipulation task; wherein Fig. 1a the task is hammering, while in image Fig. 1b it is sweeping. This type of grasping known as task-oriented grasping [3, 4].

---

<sup>1</sup> © Али Р., Аль Аккад М. А., 2020

For human, these decisions are made intuitively, in contrast, it is a big challenge for robots to achieve the grasping tasks as proficient as humans. Several conditions affect the performance of robot grasping such as changes in environment and illumination, a huge number of objects with different properties, complex backgrounds, occlusion between objects, etc. [5]

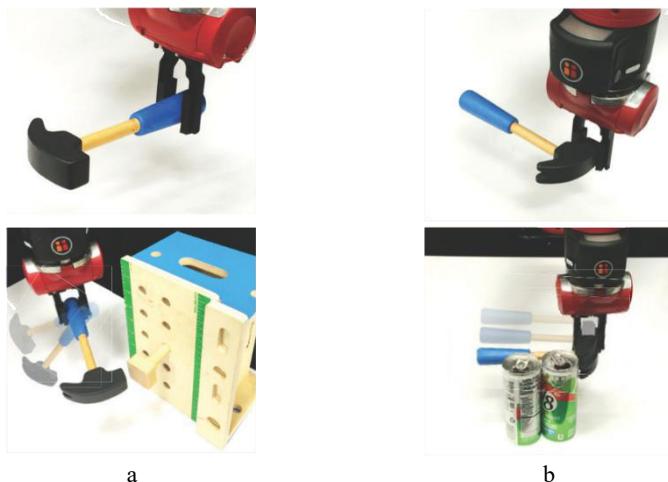


Fig. 1. Example of task-oriented grasping

Therefore, machine learning techniques are implemented in robotic systems to improve the capability of these robots to handle these conditions and guarantee high performance. Variety approaches have emerged with great breakthroughs in machine learning algorithms.

Deep learning (DL) is part of machine learning techniques. Based on algorithms for learning multiple levels of representation in order to model complex relationships among data. Inspired by the biological nervous system, deep learning model consists of a network of parallel and simultaneous mathematical operations are performed directly on the available data to obtain a set of representational heuristics between the input and output data. These heuristics are then used in decision making [6, 7].

Reinforcement learning (RL) is an area of machine learning inspired by behaviorist psychology. RL is a type of dynamic programming that trains algorithms using a system of reward and punishment. In another expression, a robot with a reinforcement learning algorithm learns by interacting with its environment. It receives rewards by performing correctly and penalties for

performing incorrectly. The robot, over time, makes decisions to maximize its reward and minimize its penalty using the dynamic programming [8, 9].

In this survey, a set of most recent researches related to the implementation of DL and RL in the field of robotic grasping tasks are discussed.

## 2. Deep Learning in Object Grasping

A lot of advancements were made in the latest year in the field of vision-based techniques in robotic grasping using deep learning. S Wang et al. proposed a model for robotic grasping based on fully Convolutional Neural Network (CNN) using high-resolution RGB-D images (400×400) for each pixel. The proposed method uses one encoder extracts the features from the original image, such as color image, depth image, grasp position map, grasp angle map, and grasp width map; and one decoder which outputs these pixel-wise parameters. According to this implementation, the results show a high accuracy of about 94.42 % for image-wise and 91.02 % for object-wise and fast prediction time about 8 ms. Also, this model offers the ability to generate a robotic grasping for various objects without training directly [10].

Y. Xu, et al. present a GraspCNN approach using a single CNN. The proposed algorithm is a grasp pose localization algorithm to detect oriented diameter circle back to 6D grasp pose in a point cloud directly from the RGB image. In basic this method combined in design between the standard CNN and YOLO model to achieve the best object detecting performance in a clustered environment. AS a result of demonstrations this model shows a 96.5 % accuracy, high speed, and stability [11].

Z. Zhao, et al. developed a grasp network approach that was a mix between two types of networks. The first one Grasp Prediction Networks (GPNs) depends on the standard CCNs and Mixture Density Networks (MDNs). This GPNs uses for prediction samples based on depth image mapping to a set of features for the Gaussian Mixture Model (GMM) from groups of grasp points can decide which candidate group can be a sample. The second one Grasp Evaluation Networks (GENs) which integrates the GPNs work by evaluating the candidate groups and select the optimal one. The experimental results show a high quality of grasping with GPNs and a high resolution of evaluating with GENs. However, the cost of these designs and implementation is high compared with other methods also there are lots of limits in dealing with depth image mapping [12].

P. Sharma, et al. address the design approach in how to improve 3D object detection for a robot arm by utilizing 2D machine learning methods. The design methods consider the 3D parameters of the images into 2D sets of information, and process the object detection to obtain high accuracy performance of identification and distance information for the Navigation and grasp

of the robot arm. Deep Convolutional Neural Network (DCNN) is proposed with the usage of RGB-D images, which includes one 2D-image in RGB, and the other in-depth image form. Two methods are proposed, one will be using two parallel DCNN model and another method will be using three parallel DCNN model. Afterwards, the parallel models need to be concatenated to get 3D-object detection [13].

Y. Song, et al. introduced an effective single-state grasp detection network based on region proposal networks from Faster R-CNN. The proposed approach consists of two steps; firstly, multiple oriented reference anchors are generated. Then, the grasp rectangles are regressed and classified based on these anchors. The performance of this approach is evaluated based on the Cornell grasp dataset and the Jacquard dataset, and the experiment results show high grasp detection accuracies [14].

### 3. Reinforcement Learning

While collecting robotic grasping dataset via human labeling can be quite challenging, as there may be multiple grasping regions in the object and human notions of grasping are biased by semantics. Therefore, some researchers try to train robotic grasping models through trial-and-error experiments which can auto-collect a huge amount of training data.

D. Kalashnikov, et al. suggest a closed-loop vision-based grasping method using a scalable self-supervised deep reinforcement learning algorithm. The introduced method can exploit over 580k real-world grasp attempts to train a deep neural network Q-function with over 1.2M parameters to perform closed-loop, real-world grasping that generalizes to 96 % grasp success on previously unknown objects. Unlike the static learning behaviors that choose a grasp point and then execute the desired grasp, this method enables closed-loop vision-based control, whereby the robot continuously updates its grasp strategy based on the most recent observations to optimize long-horizon grasp success. Experiment results prove that the proposed method can be generalized effectively for complex real-world grasping tasks [15].

A. Zeng, et al. introduced a new approach to achieve a synergy between pushing and grasping. This approach is based on a pixel-wise version of deep networks that combines deep reinforcement learning with affordance-based manipulation. Experiment outcomes prove that the system learns to perform complex sequences of pushing and grasping on a real robot intractable training times [16].

A. Rajeswaran, et al., considering a set of 4 object manipulation tasks of human-like five-fingered hand, shown in Fig. 2 [17], developed a model-free reinforcement learning model augmented with human demonstrations collected in virtual reality [17].

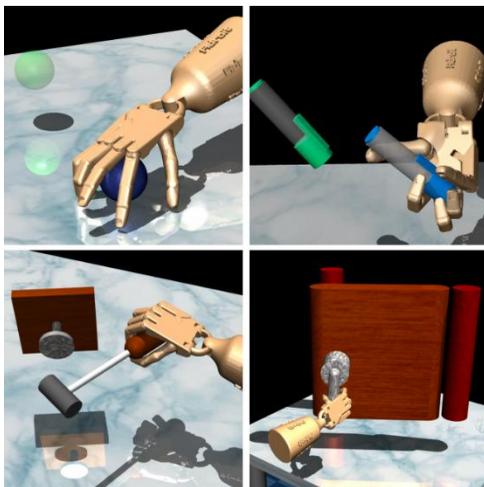


Fig. 2. Grasping Tasks that robot supposed to achieve

#### 4. Conclusion and Future Work

In this survey, a set of most recent researches in the field of robot grasping task were investigated. Several conditions affect the performance of robot grasping such as changes in environment and illumination, existence of a huge number of objects with different properties, complex backgrounds, and occlusion between objects. Therefore, machine learning techniques are implemented to improve the capability of these robots to handle these conditions and guarantee high performance. Two main categories are considered, which are deep learning and reinforcement learning. It can be concluded that deep learning techniques are more common compared with reinforcement learning. However, the latter one is more suitable for grasping of unknown objects or if it is somehow difficult to collect a sufficient dataset. As a future work, 3D object grasping according to the matching between the object's splines and the robot palm splines will be studied. Both DL and RL techniques will be investigated to figure out which of them is the suitable option to obtain an accurate and efficient grasping performance.

#### References

1. *Solowjow, E.* Industrial robot grasping with deep learning using a programmable logic controller (PLC) / E. Solowjow, I. Ugalde, Y. Shahapurkar, J. Aparicio, J. Mahler, V. Satish, K. Goldberg, H. Claussen. 2020. arXiv: 2004.10251.
2. *Rakhimkul, S.* Autonomous object detection and grasping using deep learning for design of an intelligent assistive robot manipulation system / S. Rakhimkul,

A. Kim, A. Pazyzbekov, A. Shintemirov // 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC) (6-9 Oct. 2019). Bari, Italy : IEEE, 2019. Pp. 3962-3968. DOI: 10.1109/SMC.2019.8914465.

3. *Al Akkad, M. A.* Complexity reduction for two human-like ambidextrous robotic hands control // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (18-20 April 2019). Tomsk, Russia : IEEE, 2019. Pp. 1-7. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729631.

4. *Fang, K.* Learning task-oriented grasping for tool manipulation from simulated self-supervision / K. Fang, Y. Zhu, A. Garg, A. Kurenkov, V. Mehta, L. Fei-Fei, S. Savarese. 2018. arXiv: 1806.09266.

5. *Li, Y.* A review: machine learning on robotic grasping / Y. Li, Q. Lei, C. P. Cheng, G. Zhang, W. Wang, Zh. Xu // Proceedings SPIE. Vol. 11041. Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018) (15 March 2019). 2019. 110412U. International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2522945.

6. *Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E.* ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Advances in neural information processing systems. 2012. Vol. 25. No. 2. DOI: 10.1145/3065386.

7. *Druzhkov, P., Kustikova, V. D.* A survey of deep learning methods and software tools for image classification and object detection // Pattern Recognition and Image Analysis. 2016. Vol. 26. No. 1. Pp. 9–15. DOI: 10.1134/S1054661816010065.

8. *Mathe, S., Pirinen, A., Sminchisescu, C.* Reinforcement learning for visual object detection // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (27-30 June 2016). Las Vegas : USA : IEEE, 2016. Pp. 2894-2902. DOI: 10.1109/CVPR.2016.316.

9. *Sutton, R. S., Barto, A. G.* Reinforcement learning: An introduction. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge, USA : MIT Press, 2018. 552 pp.

10. *Wang, S.* Efficient fully convolution neural network for generating pixel wise robotic grasps with high resolution images / S. Wang, X. Jiang, J. Zhao, X. Wang, W. Zhou, Y. Liu // 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Dali, China : IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ROBIO49542.2019.8961711.

11. *Xu, Y.* GraspCNN: Real-Time Grasp Detection Using a New Oriented Diameter Circle Representation / Y. Xu, L. Wang, A. Yang, L. Chen // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 159322-159331. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2950535.

12. *Zhao, Z.* Grasp prediction and evaluation of multi-fingered dexterous hands using deep learning / Z. Zhao, W. Shang, H. He, Z. Li // Robotics and Autonomous Systems. 2020. Vol. 129. P. 103550. DOI: 10.1016/j.robot.2020.103550.

13. *Sharma, P., Valles, D.* Deep convolutional neural network design approach for 3D object detection for robotic grasping // 2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC) (6-8 Jan. 2020). Las Vegas, USA : IEEE, 2020. Pp. 0311-0316. DOI: 10.1109/CCWC47524.2020.9031186.

14. *Song, Y.* A novel robotic grasp detection method based on region proposal networks / Y. Song, L. Gao, X. Li, W. Shen // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2020. Vol. 65. P. 101963. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101963.

15. *Kalashnikov, D.* QT-Opt: scalable deep reinforcement learning for vision-based robotic manipulation / D. Kalashnikov, A. Irpan, P. Pastor, J. Ibarz, A. Herzog,

E. Jang, D. Quillen, E. Holly, M. Kalakrishnan, V. Vanhoucke, S. Levine. 2018. arXiv: 1806.10293.

16. Zeng, A. Learning synergies between pushing and grasping with self-supervised deep reinforcement learning / A. Zeng, S. Song, S. Welker, J. Lee, A. Rodriguez, T. Funkhouser // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (1-5 Oct. 2018). Madrid, Spain : IEEE, 2018. Pp. 4238-4245. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593986.

17. Rajeswaran, A. Learning complex dexterous manipulation with deep reinforcement learning and demonstrations / A. Rajeswaran, V. Kumar, A. Gupta, G. Vezzani, J. Schulman, E. Todorov, S. Levine. 2017. arXiv: 1709.10087.

*Р. Али, магистрант*

E-mail: [eng.rawan.sy@gmail.com](mailto:eng.rawan.sy@gmail.com)

*М. А. Аль Аккад, канд. техн. наук, доц.*

E-mail: [aيمانakkad@yandex.ru](mailto:aيمانakkad@yandex.ru)

Кафедра «Программное обеспечение»

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Машинное обучение в роботизированных задачах захвата: обзор**

*В последнее время методы машинного обучения, включая глубокое обучение и обучение с подкреплением, были признаны важной вехой в области компьютерного зрения и основанных на зрении задач робототехники, таких как захватывание. В этом обзоре представлены новейшие подходы в области задач выбора и размещения объектов и задач захвата объектов. Эти подходы подразделяются на две группы: подходы, основанные на глубоком обучении, и подходы, основанные на подкреплении. Задачи захвата людьми решаются интуитивно, в то время как для роботов является большой проблемой решить этих задач так же хорошо, как это делают люди. На эффективность захвата робота влияют несколько условий, такие как изменение окружающей среды и освещенности, наличие огромного количества объектов с различными свойствами, сложные фоны и окклюзия между объектами. Методы машинного обучения применяют в робототехнических системах для улучшения способности роботов справляться с этими условиями и гарантировать высокую производительность.*

**Keywords:** робототехника, машинное обучение, глубокое обучение, обучение с подкреплением, задачи захвата, обнаружение объекта.

---

УДК 621.391

*А. К. Атланова, П. Д. Чащина, студенты*

*В. В. Титов, магистрант*

*И. А. Кайсина, аспирант*

*А. В. Абилов, канд. техн. наук, доц., декан факультета*

*М. А. Ламри, аспирант*

*E-mail: kafsts@istu.ru*

Кафедра «Сети связи и телекоммуникационные системы»

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Обзор возможной реализации автономного полета малых БПЛА на базе Clever с поддержкой ретрансляции данных**

*В статье предложен программно-аппаратный комплекс на базе малого учебного БПЛА Clever с возможностью применения ретрансляции данных среди нескольких летающих узлов, а также автономного полета в замкнутых пространствах. При совместном использовании ретрансляции данных между всеми летающими узлами и алгоритмов для автономного полета появляется возможность практической реализации автономного полета группы малых БПЛА, что является актуальной задачей промышленного сектора РФ на сегодняшний день.*

**Ключевые слова:** БПЛА, самоорганизующиеся сети, передача данных, автономный полет.

### **Введение**

Концепт роя дронов взят из наблюдений за коллективными животными. Но его нынешняя реализация упускает момент, что стая (или рой) зачастую принимает ситуативные решения, выстроенные на строго локальной информации – визуальном восприятии – наиболее перспективной сенсорной характеристике. Снабжение дронов камерой и лидаром, служащим в качестве пространственного маркера, поможет не только осуществить полностью автономный полет без заранее проложенного оператором маршрута, но и позволит машине «ощущать» друг друга и держаться на расстоянии, на котором им не будут мешать создаваемые воздушные потоки. Опираясь на данные lead drone, группа может ориентироваться в пространстве и подстраиваться под необходимую скорость. Рой дронов можно осуществить благодаря стандартному описанию маршрута – совокупности набора координат и заданной скорости.

Рисование маршрута происходит в программном обеспечении для управления дронами совместно с пилотами и операторами – UgCS. Изначально квадрокоптеры снабжены стандартным GPS-модулем, подключаемым к разъемам «GPS» и «I2C» полетного контроллера. Но для более точного позиционирования рекомендуется использовать GPS RTK (Real Time Kinematic) и сопрягаемый приемник на каждой машине.

Для взаимодействия каждого узла (каждого малого БПЛА) необходимо организовать связь между ними, для этого может использоваться подключение *ad-hoc*, которое ориентировано на децентрализованную беспроводную сеть без постоянной структуры. Программное обеспечение для *ad-hoc*-подключения, а также алгоритмов автономного полета может быть реализовано на базе микрокомпьютера Raspberry Pi 3, который является частью малых учебных БПЛА, например, Clever.

### Обзор малого БПЛА Clever

Clever 4 – это квадрокоптер с открытым кодом. Он оснащен полетным контроллером [3] COEX Pix , который позволяет использовать более пяти режимов полета: Stabilized, Position, Manual, Altitude, Acro и др. Для автономного полета в основном используется режим Offboard, который характеризуется управлением квадрокоптера извне (с помощью микроконтроллера).

Как описано выше, на борту БПЛА Clever присутствует микрокомпьютер Raspberry Pi 3 [7]. Питание микрокомпьютера осуществляется с помощью, непосредственно подключения её к плате распределения питания. Также к плате распределения питания припаяны контакты от регуляторов оборотов двигателя, приемника радиосигнала пульта управления и полетного контроллера. Квадрокоптер питается от аккумулятора на 4200 мАч. Полного заряда аккумулятора хватает на 13–15 минут полета и одновременной реализации ретрансляции (питания микроконтроллера).

Настройка и калибровка квадрокоптера производится в программе QGroundControl в несколько этапов:

- Выбор прошивки, в зависимости от полетного контроллера и целей использования малого БПЛА.
- Выбор формы рамы и типа малого БПЛА.
- Калибровка датчиков: компас, гироскоп, акселерометр, уровень горизонта.
- Настройка пульта управления: рыскание, тангаж, крен. Установка тумблера для экстренного отключения моторов и для переключения режимов полета.

- Настройка питания. Калибровка делителя напряжения. Калибровка регуляторов (ESC).
- Настройка реактй квадрокоптера на внештатные ситуации.
- Установка PID-коэффициентов.

Первоначальная настройка квадрокоптера определяет стабильность дальнейшей работы.

### **Реализация подключения ad-hoc для возможности дальнейшей ретрансляции данных в самоорганизующейся сети**

Ad-hoc – это вид беспроводных сетей, имеющий децентрализованную структуру [6]. В такой сети не существует заданной топологии, она может изменяться динамически. Каждый узел такой сети равноценен и участвует в маршрутизации, передавая данные другим узлам. В нашем случае в качестве узлов выступают БПЛА, следовательно, можно говорить о сети FANET [5]. Особенностью данной сети является высокая скорость узлов и более частая смена топологии, по сравнению с другими видами ad-hoc-сетей [6]. В случае использования микрокомпьютеров Raspberry Pi 3 связь устанавливается по протоколу Wi-Fi 802.11g с максимальной пропускной способностью 54 Мб/сек. Используется канал шириной 20 МГц в диапазоне 2,4 ГГц. Ретрансляция данных в рассматриваемой ad-hoc-сети может быть реализована при помощи протоколов маршрутизации, таких как OLSR, AODV или B.A.T.M.A.N. Adv [5].

### **Возможности применения машинного обучения в рое малых БПЛА**

Сам алгоритм обработки изображения и принятия решения реализуем на языках Python и R [7]. Для точности полета рекомендуется использовать semantic или instance segmentation [1] (в зависимости от пространства и объектов вокруг роя) – разделение объектов класса по отдельности, опираясь на определение насыщенности пикселей. С помощью технологии оптического потока [2] и ArUCO-кодов микроконтроллер выстраивает карту автономного полета, позволяющую аппарату совершать полет без участия оператора. Для обеспечения более точного и безопасного полета можно также использовать камеру глубины – ее особенность заключается в том, что она записывает видео, в каждом пикселе которого хранится расстояние до объектов. Суть нейронной сети, как уже было сказано, определить и разделить контуры – так называемые маски [1]. С этим справятся многослойные сверточные сети [4], в частности – архитектура Mask R-CNN.

### Заключение

В статье рассмотрена возможная реализация автономного полета малых БПЛА на базе Clever с поддержкой ретрансляции данных. Выделено, что применение ad-hoc-подключения может позволить ретранслировать данные между узлами в сети, а алгоритмы машинного обучения обеспечат возможность автономного полета.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06076*

### Список литературы

1. *Szeliski, R.* Computer vision: algorithms and applications. London : Springer, 2010. DOI: [10.1007/978-1-84882-935-0](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0).
2. *Tao, M. W., Bai, J., Kohil, P.* SimpleFlow: a non-iterative, sublinear optical flow algorithm // Computer Graphics Forum. 2012. Vol. 31. No. 2-1. Pp. 345-353. DOI: [10.1111/j.1467-8659.2012.03013.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.03013.x).
3. *Ebeid, E., Skriver, M., Terkildsen, K. H., Jensen, K., Schultz, U. P.* A survey of open-source UAV flight controllers and flight simulators // Microprocessors and Microsystems. 2018. Vol. 61. Pp. 11-20. DOI: [10.1016/j.micpro.2018.05.002](https://doi.org/10.1016/j.micpro.2018.05.002).
4. *Bishop, C. M.* Pattern recognition and machine learning. New York : Springer-Verlag, 2006. 738 p.
5. Экспериментальное исследование эффективности протокола маршрутизации В.А.Т.М.А.Н. в сети с топологией точка-точка для FANET / И. А. Кайсина, В. В. Титов, Д. С. Васильев, Д. С. Мейтис, А. В. Абилов, А. Е. Кайсин // Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 259–267.
6. Экспериментальное исследование ретрансляции мультиточковой передачи данных по стандарту WiFi 802.11g на частоте 2,4 ГГц в режиме Ad-Hoc / И. А. Кайсина, В. В. Титов, Д. С. Васильев, А. В. Абилов, А. Е. Кайсин // Приборостроение в XXI веке – 2019. Интеграция науки, образования и производства. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. – С. 236–244.
7. *Choi H., Geeves M., Alsalam B. and Gonzalez F.* Open source computer-vision based guidance system for UAVs on-board decision making // IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT. 2016. С. 1-5.

*A. K. Atlanova, P. D. Chashchina*, students

*V. V. Titov*, master student

*I. A. Kaisina*, postgraduate student

*A. V. Abilov*, CSc in engineering, associate professor, dean of faculty

*M. A. Lamri*, postgraduate student

E-mail: [kafsts@istu.ru](mailto:kafsts@istu.ru)

Department of Communication Networks and Telecommunication Systems  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **An Overview of the Possible Implementation of an Autonomous Flight of Small UAVs Based on Clever with Data Relay Support**

*The article offers a software and hardware complex based on a small training UAV Clever with the possibility of using data retransmission among several flying nodes, as well as autonomous flight in confined spaces. With the joint use of data retransmission between all flying nodes and algorithms for autonomous flight, it becomes possible to implement the autonomous flight of a group of small UAVs, which is an urgent task of the industrial sector of the Russian Federation today.*

**Keywords:** UAV, self-organizing networks, data transmission, autonomous flight.

УДК 531.383

*И. А. Вихляев*, магистрант

Е-mail: [ivanvih@mail.ru](mailto:ivanvih@mail.ru)

*К. В. Шишаков*, д-р техн. наук, доц.

Е-mail: [shishakovk@mail.ru](mailto:shishakovk@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Обработка сигналов твердотельного волнового гироскопа с постоянной частотой дискретизации**

*Проведены эксперименты по обработке сигналов с частотой, не кратной частоте колебаний резонатора. Проанализированы полученные результаты. Сделаны выводы о применимости такого способа для изделий с малым временем включения. Сделаны выводы о необходимых дополнениях в вычислительном устройстве для улучшения показателей и применения для систем с более высокой точностью.*

**Ключевые слова:** твердотельный волновой гироскоп, постоянная частота дискретизации, обработка сигналов, дрейф, шум.

### **Введение**

На сегодняшний день твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) является важным направлением в построении гироскопических систем [1]. Работа ТВГ основана на силах Кориолиса в колеблющейся полусферической оболочке. При вращении основания вокруг оси симметрии возбужденная в резонаторе стоячая волна начинает поворачиваться относительно резонатора и относительно инерциального пространства. Тогда, зная угол поворота стоячей волны относительно резонатора, можно найти угол поворота основания.

Конструктивно ТВГ состоит из чувствительного элемента, системы возбуждения колебаний и системы съема информации, а также устройства обработки сигналов.

Система съема информации о колебаниях резонатора состоит из набора информационных электродов, с которых на блок входных усилителей поступает сигнал. Противолежащие электроды соединены попарно, ортогональные пары информационных электродов подключены к прямому и инвертирующему входам суммирующего усилителя одного канала блока входных усилителей [2]. В результате имеем два ортогональных канала измерения углового положения стоячей волны, один из которых формирует сигнал пропорциональный косинусу двойного угла

ориентации стоячей волны, а второй – синусу двойного угла [3]. При этом частота изменения сигналов привязана к частоте колебаний резонатора.

Целью работы является рассмотрение обработки сигналов ТВГ с постоянной частотой дискретизации.

### Основная часть

Когда частота напряжения на резонаторе кратна основной частоте колебаний с коэффициентом  $k$ , тогда сигналы синусового и косинусового каналов будут описываться следующими выражениями [3]:

$$U_c(t) = [A \cos \theta \sin(\omega t + \tau) + B \sin \theta \cos(\omega t + \tau)] \cos(k\omega t + \psi) + k[A \cos \theta \cos(\omega t + \tau) - B \sin \theta \sin(\omega t + \tau)] \sin(k\omega t + \psi),$$

$$U_s(t) = [A \sin \theta \sin(\omega t + \tau) - B \cos \theta \cos(\omega t + \tau)] \cos(k\omega t + \psi) + k[A \sin \theta \cos(\omega t + \tau) - B \cos \theta \sin(\omega t + \tau)] \sin(k\omega t + \psi),$$

где  $A$  и  $B$  – амплитуды основных и квадратурных колебаний;  $\theta$  – угловая ориентация волны;  $\omega$  – основная частота колебаний резонатора;  $\tau$  – временная фаза колебаний;  $\psi$  – фаза.

Генератор, управляемый напряжением (ГУН), генерирует сигнал, поступающий на делитель частоты. Из него выделяется частота, поступающая на вход тактирования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для оцифровки сигнала, и несущая частота для поддержания колебаний резонатора (рис. 1). Все частоты кратны частоте колебаний резонатора.



Рис. 1. Структурная схема обработки сигналов ТВГ

Частота дискретизации АЦП настроена так, что происходит оцифровка одного колебания резонатора. На основании полученной информации вычислительное устройство оценивает параметры колебаний ре-

зонатора, в том числе и частоту, и отправляет на ГУН сигнал рассогласования  $\tau_2 = 2\tau$  (на рис. 1 – управляющий сигнал), рассчитанный по следующей формуле [3]:

$$\tau_2 = \arctg(Dfs / Dfc),$$

где  $Dfs$ ,  $Dfc$  – сигналы синусного и косинусного каналов.

### Эксперимент

Эксперимент заключался в изменении несущей частоты. Это изменяло частоту напряжения на резонаторе и частоту оцифровки сигнала АЦП. Изменение частоты привело к тому, что оцифровывалось больше одного периода колебаний резонатора либо меньше.

Также контур поддержания амплитуды не мог корректно поддерживать амплитуду колебаний, что приводило к их затуханию и дополнительным шумам. Поэтому были проведены эксперименты как с включенным контуром поддержания амплитуды, так и без него.

Изменение частоты относительно частоты колебаний резонатора составило примерно  $\pm 60$  Гц.

Схема приобрела вид, изображенный на рис. 2.

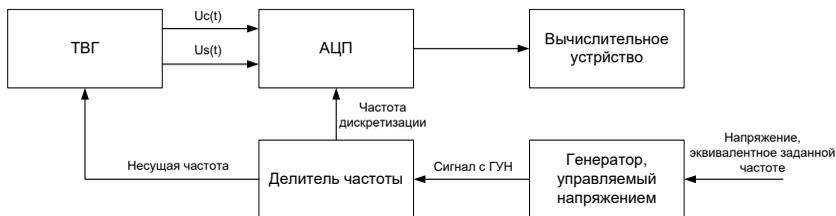


Рис. 2. Структурная схема обработки сигналов ТВГ на заданной частоте

Методика измерений заключалась в том, что происходило возбуждение чувствительного элемента до определенной амплитуды колебаний. Затем на специальном стенде вращения происходило его вращение для измерения шума и дрейфа в различных угловых положениях, пока амплитуда не упадет до малых значений, когда оценить параметры не удалось.

### Результаты эксперимента

Оценивались параметры шума и дрейфа электрического угла. Эти параметры являются важными, поскольку в дальнейшем на основании электрического угла оцениваются остальные точностные параметры [4].

В ходе эксперимента сначала были получены данные для системы, работающей в нормальном режиме, т. е. когда частота напряжения на резонаторе совпала с частотой колебаний резонатора (рис. 3).

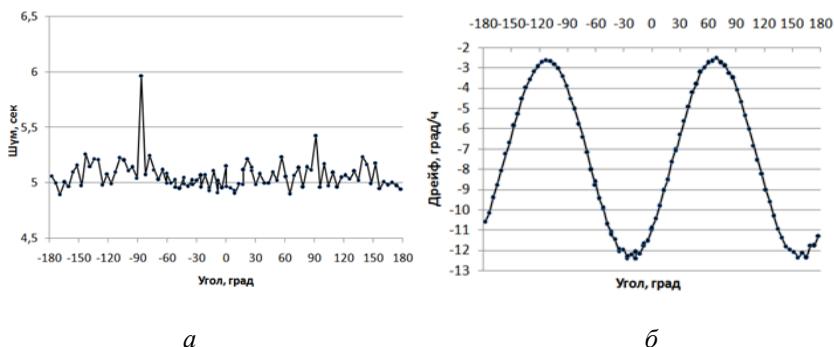


Рис. 3. Параметры ТВГ в обычном режиме работы: шум электрического угла (а); дрейф (б)

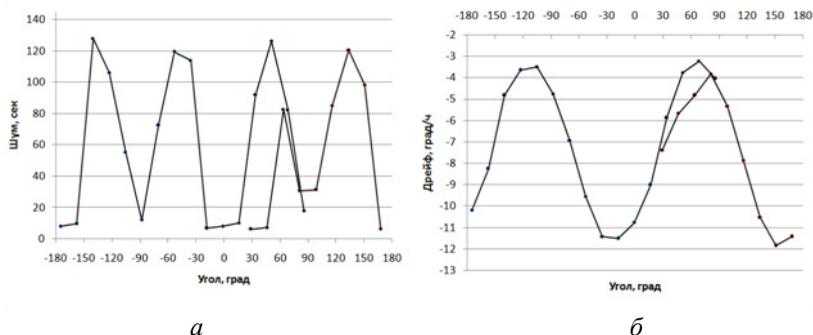


Рис. 4. Параметры ТВГ с частотой меньшей резонансной и включенным контуром поддержания амплитуды: шум электрического угла (а); дрейф (б)

На рис. 4 и 5 изображены шум и дрейф электрического угла для системы, когда частота соответственно меньше и больше частоты колебаний и контур поддержания амплитуды включен.

На рис. 6 и 7 изображены шум и дрейф электрического угла для системы, когда частота соответственно меньше и больше частоты колебаний и контур поддержания амплитуды выключен.

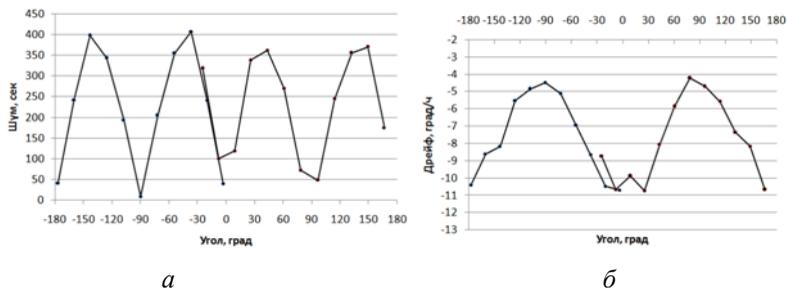


Рис. 5. Параметры ТВГ с частотой большей резонансной и включенным контуром поддержания амплитуды: шум электрического угла (а); дрейф (б)

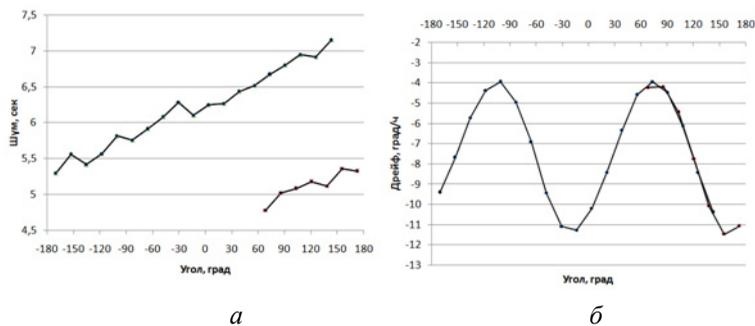


Рис. 6. Параметры ТВГ с частотой меньшей резонансной и выключенным контуром поддержания амплитуды: шум электрического угла (а); дрейф (б)

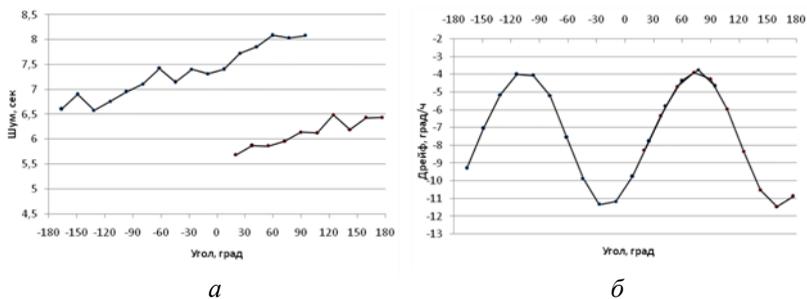


Рис. 7. Параметры ТВГ с частотой большей резонансной и выключенным контуром поддержания амплитуды: шум электрического угла (а); дрейф (б)

## Выводы

На основании приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

1) при изменении частоты напряжения на резонаторе с выключенным контуром управления поддержания амплитуды резкого увеличения уровня шума и дрейфа электрического угла не происходит. Шум возрастает по мере затухания колебаний, из-за изменения отношения сигнал/шум. Форма и амплитуда дрейфа не претерпевают серьезных изменений;

2) при изменении частоты напряжения на резонаторе с включенным контуром управления поддержания амплитуды происходит резкое увеличение уровня шума электрического угла. При этом форма и амплитуда дрейфа не претерпевают серьезных изменений;

3) для изделий с малым временем работы и при отсутствии необходимости в высокой точности возможно использование ТВГ без контура управления частотой и контура поддержания амплитуды.

Уменьшить влияние сдвига частоты возможно, применив в вычислителе более сложный математический аппарат при обработке результатов измерений [1, 3].

## Список литературы

1. *Шишаков, К. В.* Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция / К. В. Шишаков. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – 264 с.
2. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) / А. И. Волчихин, Д. М. Малютин, В. В. Матвеев и др. // Известия ТулГУ. – Технические науки. – 2017. – № 9–2.
3. *Трутнев, Г. А.* Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа / Г. А. Трутнев, К. К. Перевозчиков, С. Б. Назаров // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2020. – № 1 (130). – С. 50–63. – DOI: [10.18698/0236-3933-2020-1-50-63](https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-50-63).
4. Компенсация дрейфа твердотельного волнового гироскопа / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков, А. В. Щенятский // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 198–204.

*I. A. Vikhlyaev*, master student

E-mail: [ivanvih@mail.ru](mailto:ivanvih@mail.ru)

*K. V. Shishakov*, DSc in engineering, associate professor

E-mail: [shishakovkv@mail.ru](mailto:shishakovkv@mail.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Signal Processing of a Hemispherical Resonator Gyroscope with a Constant Sampling Rate**

Experiments were conducted on signal processing with a frequency not a multiple of the resonator oscillation frequency. This results are analyzed. Conclusions are drawn on the applicability of such methods for products with a short on-time. Conclusions are made about the necessary additions.

**Keywords:** hemispherical resonator gyroscope, constant sampling rate, signal processing, drift, noise.

УДК 004.942

В. Г. Гравшин, аспирант

С. В. Стойчев, аспирант

П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.

E-mail: [grawowchik@mail.ru](mailto:grawowchik@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Проверка возможности реализации нового элемента с фрактальным импедансом путем комбинации элементов с фрактальным импедансом с известными параметрами

*Проведено компьютерное моделирование частотных характеристик двухполюсников, образованных параллельным и последовательным соединением элементов с фрактальным импедансом (ЭФИ). Моделирование проведено в программе OrCAD с использованием схмотехнических моделей ЭФИ на основе R-C-NR-линий. Для проверки адекватности полученных результатов были выведены аналитические выражения импедансов двухполюсников, образованных параллельным и последовательным соединением идеальных ЭФИ. Частотные характеристики импеданса этих двухполюсников были получены в программе Matlab. Показана принципиальная невозможность получения нового ЭФИ путем параллельного или последовательного соединения ЭФИ с неодинаковыми параметрами.*

**Ключевые слова:** элемент с фрактальным импедансом (ЭФИ), R-C-NR-линия, параллельное соединение ЭФИ, последовательное соединение ЭФИ.

### Введение

Элементом с фрактальным импедансом (ЭФИ) называют аналоговый пассивный элемент, имеющий дробно-степенную зависимость входного импеданса от частоты. Выражение для фрактального импеданса можно записать в следующем виде [1]:

$$\dot{Z}_F = (1/\omega^\alpha C_\alpha) e^{-j\alpha\pi/2}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $\alpha$  – дробный порядок импеданса ЭФИ ( $0 < \alpha < 1$ );  $C_\alpha$  – константа, имеющая смысл фрактальной емкости с размерностью  $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{с}^{-\alpha}$ .

Характерной особенностью фазочастотной характеристики ЭФИ является постоянство фазового сдвига в ограниченном диапазоне частот, равное значению  $\varphi_c = -\alpha\pi/2$ .

В настоящее время существует несколько вариантов реализации ЭФИ в виде одного компонента, параметры которого невозможно изменить после изготовления образца [2, 3]. Поэтому возникает вопрос, нельзя ли создать новый ЭФИ, используя соединенные между собой изготовленные образцы с известными параметрами? Такая возможность оценивалась в работах [4, 5]. Так, в работе [4] рассмотрена возможность последовательного и параллельного соединения двух ЭФИ, выполненных в виде цепей на дискретных  $R$ - и  $C$ -элементах, имеющих одинаковые параметры. В работе [5] проведена экспериментальная проверка результатов комбинированного соединения образцов ЭФИ с разными показателями  $\alpha$ , выполненных на основе ферроэлектрических полимеров. Однако полученные результаты рассматриваются в очень узком диапазоне частот (меньше одной декады), в котором можно пренебречь непостоянством фазы ФЧХ импеданса ЭФИ, наблюдающемся для большинства образцов ЭФИ в более широком диапазоне частот.

Целью данной работы является проверка потенциальной возможности реализации нового ЭФИ путем комбинированного включения ЭФИ с известными параметрами в более широком диапазоне частот (не менее двух декад).

### Решение задачи

Для упрощения задачи рассмотрим результаты последовательного и параллельного соединения двух ЭФИ, схемотехнические модели которых с достаточной точностью в ограниченном диапазоне частот отражают характеристики изготовленных (реальных) образцов [3]. Синтезируем с помощью специализированной программы [6] два ЭФИ на основе  $R$ - $C$ - $NR$  ЭПП, схемотехнические модели которых, выполненные в программе OrCAD, изображены на рис. 1.

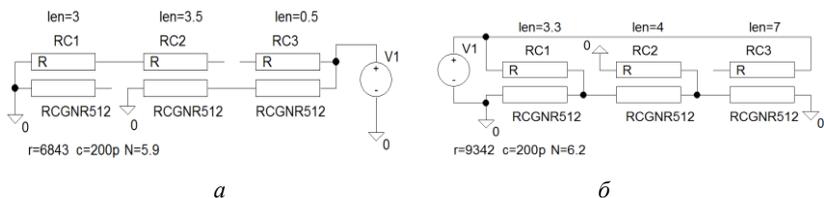


Рис. 1. Схемотехнические модели ЭФИ: с  $\varphi_c = -20^\circ$  (а); с  $\varphi_c = -40^\circ$  (б);  $r$  – погонное сопротивление линий;  $c$  – погонная емкость линий;  $N$  – соотношение погонных сопротивлений нижнего и верхнего резистивных слоев

Здесь элементы, обозначенные как RCGNR512, являются длинными R-C-NR-линиями, которые в программе моделируются 512-звенными RC-цепями соответствующей структуры.

Соответствующие этим моделям ЭФИ АЧХ и ФЧХ импеданса приведены на рис. 2.

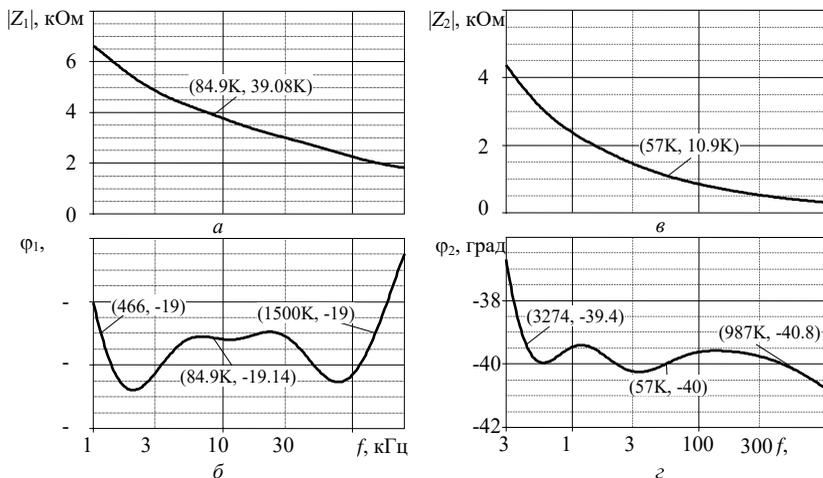


Рис. 2. Частотные характеристики импедансов:

АЧХ и ФЧХ ЭФИ с  $\varphi_z = -20^\circ$  (а, б); АЧХ и ФЧХ ЭФИ с  $\varphi_z = -40^\circ$  (в, г)

По характерным точкам на графиках вычислены значения фрактальных емкостей и дробных показателей частоты в выражениях для импеданса. ЭФИ с  $\varphi_c = -20^\circ$  характеризуется  $C_\alpha = 1,388 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{с}^{-0,221}$  и  $\alpha = 0,221$ . ЭФИ с  $\varphi_c = -40^\circ$  характеризуется  $C_\beta = 3,125 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{с}^{-0,445}$  и  $\beta = 0,445$ .

ФЧХ импедансов двухполюсников на основе параллельного и последовательного соединения рассмотренных выше моделей ЭФИ, найденные в программе OrCAD, изображены на рис. 3.

Результаты моделирования показывают, что при параллельном и последовательном соединении ЭФИ с разными параметрами получаются двухполюсники, не обладающие свойствами ЭФИ. Однако при параллельном и последовательном соединении двух одинаковых ЭФИ получены результаты, совпадающие с результатами, полученными в работе [4].

Для того чтобы убедиться в адекватности результатов моделирования, представленных на графиках рис. 3, рассмотрим параллельное и последовательное соединение двух идеальных ЭФИ, импедансы которых описываются выражением (1). С этой целью выведем аналитиче-

ские выражения импеданса при параллельном и последовательном соединении двух ЭФИ с импедансами  $\dot{Z}_1 = (1/\omega^\alpha C_\alpha)e^{-j\alpha\pi/2}$  и  $\dot{Z}_2 = (1/\omega^\beta C_\beta)e^{-j\beta\pi/2}$ .

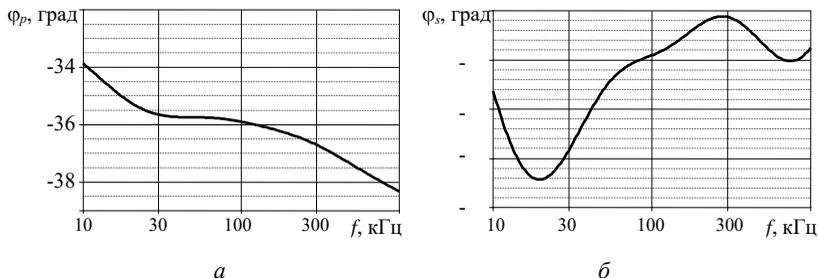


Рис. 3. ФЧХ импедансов: импеданса параллельного соединения ЭФИ (а); импеданса последовательного соединения ЭФИ (б)

При выводе выражений использовались классические формулы параллельного и последовательного соединения двухполюсников.

Выражение для импеданса при последовательном соединении двух ЭФИ имеет вид:

$$\dot{Z}_{\alpha+\beta} = \frac{\omega^\beta C_\beta \cdot \cos \alpha \frac{\pi}{2} + \omega^\alpha C_\alpha \cdot \cos \beta \frac{\pi}{2}}{\omega^{(\alpha+\beta)} C_\alpha C_\beta} - \frac{j \left( \omega^\beta C_\beta \sin \alpha \frac{\pi}{2} + \omega^\alpha C_\alpha \cdot \sin \beta \frac{\pi}{2} \right)}{\omega^{(\alpha+\beta)} C_\alpha C_\beta}. \quad (2)$$

Выражение для импеданса при параллельном соединении двух ЭФИ имеет вид:

$$\dot{Z}_{\alpha\parallel\beta} = \frac{\left( \omega^\beta C_\beta \cdot \cos \beta \frac{\pi}{2} + \omega^\alpha C_\alpha \cdot \cos \alpha \frac{\pi}{2} \right)}{\omega^{2\beta} C_\beta^2 + \omega^{2\alpha} C_\alpha^2 + 2C_\alpha C_\beta \omega^{(\alpha+\beta)} \cos(\alpha - \beta) \frac{\pi}{2}} - \quad (3)$$

$$\frac{j \left( \omega^\beta C_\beta \sin \beta \frac{\pi}{2} + \omega^\alpha C_\alpha \cdot \sin \alpha \frac{\pi}{2} \right)}{\omega^{2\beta} C_\beta^2 + \omega^{2\alpha} C_\alpha^2 + 2C_\alpha C_\beta \omega^{(\alpha+\beta)} \cos(\alpha - \beta) \frac{\pi}{2}}.$$

Вычисление ФЧХ импедансов производилось в программе *Matlab* при тех же значениях фрактальных емкостей и дробных показателей, которые были найдены для рассмотренных выше моделей ЭФИ на основе *R-C-NR*-линий и изображены на рис. 4.

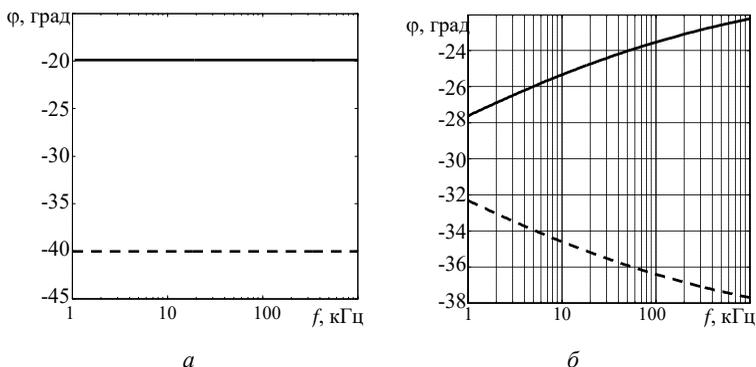


Рис. 4. ФЧХ импедансов: идеальных ЭФИ с  $\varphi_z = -20^\circ$  (сплошная линия) и с  $\varphi_z = -40^\circ$  (пунктирная линия) (а); последовательного соединения ЭФИ (сплошная линия) и параллельного соединения ЭФИ (пунктирная линия) (б)

Из графиков видим, что в широком диапазоне частот ФЧХ результирующих импедансов также не характеризуются постоянством фазы, т. е. из комбинации даже идеальных ЭФИ с разными параметрами потенциально невозможно получить новый ЭФИ.

Используя выражения (2) и (3), можно убедиться, что при последовательном соединении двух ЭФИ с  $\alpha = \beta$  и  $C_\alpha = C_\beta$  фазовый угол  $\varphi_c$  нового ЭФИ не меняется по сравнению с  $\varphi_c$  соединяемых ЭФИ, но в два раза увеличивается модуль импеданса и, в соответствии с (1), в два раза уменьшается фрактальная емкость по сравнению с модулем и фрактальной емкостью исходных ЭФИ. При параллельном соединении двух одинаковых ЭФИ фазовый угол результирующего ЭФИ также остается неизменным, но в два раза уменьшается модуль импеданса и в два раза увеличивается фрактальная емкость.

Сравнивая графики ФЧХ импедансов, изображенные на рис. 3 и на рис. 4, б, можно сделать вывод, что ФЧХ двухполюсников при последо-

вательном и параллельном соединении ЭФИ, описываемых их схемотехнических моделями, имеют такой же характер зависимости фазы от частоты, какой наблюдается при аналогичных соединениях идеальных ЭФИ. Отличие состоит в том, что на ФЧХ, полученных в программе OrCAD, проявляется влияние неравномерности фазы, имеющей сложный характер в диапазоне частот условного постоянства фазы  $\varphi_c$ .

### Выводы

Таким образом, в результате проведенного исследования показана принципиальная невозможность получения нового ЭФИ путем параллельного или последовательного соединения ЭФИ с неодинаковыми параметрами. При соединении ЭФИ с одинаковыми параметрами получается ЭФИ, характеризующийся тем же показателем дробности, но отличающийся величиной модуля импеданса и величиной фрактальной емкости от аналогичных параметров, соединяемых ЭФИ.

### Список литературы

1. *Biswas, K., Bohannan, G., Caponetto, R., Lopes, A. M., Machado, J. A. T.* Fractional-order devices. Cham, Switzerland : Springer, 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-54460-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54460-1).
2. *Shah, Z. M.* A survey of single and multi-component Fractional-Order Elements (FOEs) and their applications / Z. M. Shah, M. Y. Kathjoo, F. A. Khanday, K. Biswas, C. Psychalinos // *Microelectronics Journal*. 2019. Vol. 84. Pp. 9-25. DOI: [10.1016/j.mejo.2018.12.010](https://doi.org/10.1016/j.mejo.2018.12.010).
3. Двухполюсные элементы с фрактальным импедансом и их применение в радиотехнике и связи / П. А. Ушаков, Г. Д. Бабошкин, С. В. Стойчев, В. Г. Гравшин // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 75-105. – DOI: [10.22213/2413-1172-2020-1-75-100](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-1-75-100).
4. *Pu, Y.-F.* Measurement units and physical dimensions of fractance-part II: Fractional-order measurement units and physical dimensions of fractance and rules for fractors in series and parallel // *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. Pp. 3398-3416. DOI: [10.1109/ACCESS.2016.2585819](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2585819).
5. *Kartci, A.* Series-, parallel-, and inter-connection of solid-state arbitrary fractional-order capacitors: theoretical study and experimental verification / A. Kartci, A. Agambayev, N. Herencsar, K. N. Salama // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. Pp. 10933-10943. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2809918](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2809918).
6. *Ушаков, П. А.* Разработка генетического алгоритма для синтеза конструкций фрактальных элементов на основе резистивно-емкостной среды со структурой слоев вида R-C-NR / П. А. Ушаков, К. О. Максимов // *Вестник ИжГТУ*. – 2012. – № 3 (55). – С. 104–108.

---

V. G. Gravshin, postgraduate student  
S. V. Stoichev, postgraduate student  
P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor  
E-mail: grawowchik@mail.ru  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Checking the Possibility of Implementing a New Element with a Fractal Impedance with Known Parameters**

*Computer simulation of the frequency characteristics of two-terminal networks formed by parallel and series connection of elements with fractal impedance (EFI) has been carried out. Simulation was carried out in the OrCAD program using EFI circuitry models based on R-C-NR lines. To check the adequacy of the results obtained, analytical expressions for the impedances of two-terminal devices formed by parallel and series connection of ideal EFIs were derived. The frequency characteristics of the impedance of these two-port networks were obtained in the Matlab program. It is shown that it is fundamentally impossible to obtain a new EFI by parallel or serial connection of EFI with unequal parameters.*

**Keywords:** element with fractal impedance (EFI), R-C-NR line, EFI parallel connection, EFI serial connection.

УДК 004.056.52

*И. С. Ельцов*, студент  
*А. Ю. Вдовин*, канд. техн. наук, доц.  
E-mail: vt@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Исследование «графического пароля» с использованием аутентификации на основе модели «рукопожатия» для мобильных устройств**

*Широко применяемая парольная аутентификация имеет многочисленные недостатки, альтернативой ей могут служить «графические пароли», некоторые из которых реализуют аутентификацию на основе модели «рукопожатия». В настоящей работе проведены исследования алгоритма, основанного на идеях Собрадо и Бирджета, применительно к небольшим экранам мобильных устройств.*

**Ключевые слова:** «графический пароль», аутентификация на основе модели «рукопожатия», парольная аутентификация, мобильное устройство.

### **Введение**

Аутентификация пользователей является одним из основных способов защиты от несанкционированного доступа к информации в разнообразных компьютерных системах наряду с идентификацией и авторизацией пользователей и аудитом безопасности [1].

Несмотря на большое разнообразие методов аутентификации, наиболее широко используется традиционная парольная аутентификация. Вероятно, это объясняется простотой реализации такого метода, удобством использования в мобильных приложениях. При этом парольная аутентификация имеет множество недостатков: наличие развитых методов и средств организации атак, высокую вероятность нарушения пользователями правил выбора и использования пароля (человеческий фактор). Более того, парольная аутентификация имеет принципиальную слабость, обусловленную наличием двух взаимоисключающих правил для выбора пароля: удобство для пользователей (простота запоминания) и сложность подбора злоумышленником.

В связи с этим за рубежом активно ведутся исследования по поиску методов аутентификации, способных, при определенных условиях, заменить парольную аутентификацию. К числу таких методов относятся

так называемые «графические пароли» [2–4], некоторые из них предполагают аутентификацию на основе модели «рукопожатия».

### Постановка задачи

Аутентификация на основе модели «рукопожатия» во многом способна решить описанные проблемы парольной аутентификации. В соответствии с этой моделью пользователь  $U$  и компьютерная система  $S$  согласовывают при регистрации пользователя в системе функцию  $f$ , известную только им. Протокол аутентификации пользователя в этом случае выглядит так:

1)  $S$ : генерация случайного значения  $x$  (запроса); вычисление  $f(x)$ ; сообщение запроса  $x$  пользователю;

2)  $U$ : вычисление отклика  $f'(x)$ ; сообщение отклика системе;

3)  $S$ : если  $f(x)$  и  $f'(x)$  совпадают, то пользователь авторизуется в системе, иначе попытка входа в систему отклоняется.

При этом функция  $f$  должна быть такой, чтобы нарушитель по известным ему запросу  $x$  и отклику  $f(x)$  не мог определить  $f$  [1].

Преимущества аутентификации на основе модели «рукопожатия» перед парольной аутентификацией обусловлены тем, что между пользователем и системой не передается никакой конфиденциальной информации, более того, даже использование внедренного на устройство пользователя вредоносного программного обеспечения (клавиатурного перехватчика или программы, перехватывающей и сохраняющей содержимое экрана) даст злоумышленнику чрезвычайно мало информации.

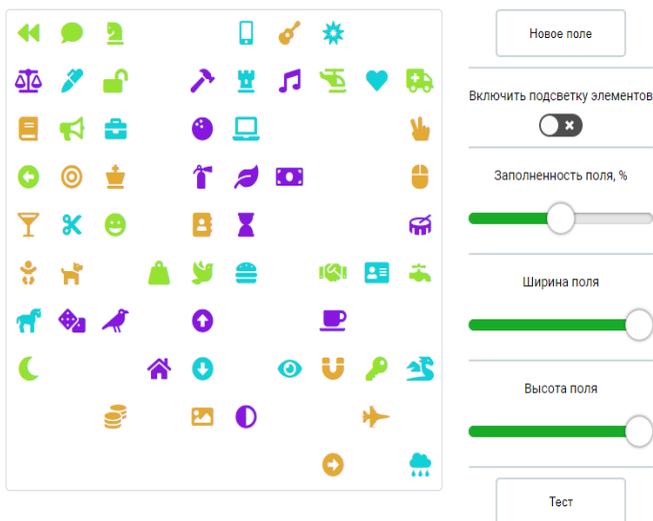
К недостаткам аутентификации на основе модели «рукопожатия» относится большая длительность этой процедуры по сравнению с парольной аутентификацией.

Один из вариантов «графического пароля» с использованием аутентификации на основе модели «рукопожатия» предложен Собрато и Бирджетом [5]. Идея основана на том, что пользователь должен обнаружить на экране среди большого числа изображений, входящих в набор из  $N$ , три объекта, входящие в набор из  $k$  объектов, согласованный с системой на этапе регистрации (в данном случае функция  $f$  определяется этим набором) и осуществить «клик» внутри треугольника с вершинами, соответствующими этим объектам. При каждом входе в систему процесс повторяется  $m$  раз (раундов аутентификации). Авторами идеи показано, что уже при  $N = 1000$  и  $k = 10$  единственно возможный вид атаки (атака с исчерпывающим поиском) становится физически неосуществимым.

Целью настоящей работы является исследование возможности использования подобных алгоритмов на экранах малого размера (например, у смартфонов), где процесс аутентификации при размещении на поле большого числа изображений может быть весьма неудобным для пользователя.

### Описание эксперимента

В ходе работы было создано веб-приложение, основанное на идее «графического пароля», предложенной Собрадо и Бирджетом, и позволяющее провести исследование работы алгоритма с различными параметрами. Интерфейс программы представлен на рисунке.



Интерфейс созданного веб-приложения

Приложение обладает следующими возможностями:

1) генерация нового поля аутентификации (заполнение поля изображениями из набора  $N$  случайным образом, при этом на экране будут присутствовать 3 изображения из набора  $k$ ) при нажатии на кнопку «Новое поле»; необходимо отметить, что в приложении реализованы некоторые модификации канонического алгоритма, в частности, такая: если при генерации поля площадь искомого треугольника не укладывается в диапазон от 5 до 10 % общей площади поля, то генерация поля осуществляется заново;

2) изменение исходных параметров: коэффициента заполненности поля (имеется возможность менять заполненность в диапазоне от 20 до 60 %), изменение ширины и высоты поля (имеется возможность изменять каждое из значений в диапазоне от 5 до 10 клеток);

3) расчёт средней вероятности случайной авторизации злоумышленником в одном раунде. При нажатии на кнопку «Тест» отдельная функция запрашивает число испытаний  $n$ , а затем  $n$  раз генерирует новое поле и эмулирует «клик» в центре поля (вероятность принадлежности точки ключевой области увеличивается с приближением к центру экрана [6]). Затем выводится средняя по  $n$  испытаний вероятность попадания в сгенерированный треугольник для заданных параметров поля.

При этом необходимо уточнить, что диапазоны изменения параметров поля были изначально существенно ограничены, например, размер поля был ограничен квадратом с длиной стороны в 10 клеток. Подобные ограничения обусловлены необходимостью компромисса между минимально допустимой сложностью подбора функции аутентификации злоумышленником и максимально допустимой величиной времени, затрачиваемого пользователем на процесс аутентификации. В связи с этим были выбраны указанные границы диапазонов всех параметров, при этом учитывались и ограничения, накладываемые размерами экрана конечного устройства (например, смартфона).

Выясним оптимальный размер поля аутентификации, коэффициент заполненности и соотношение сторон. Исследования проводились по общему алгоритму:

1) поле многократно (для минимизации влияния случайных исходов на общий результат было выбрано  $n = 1000000$ ) заполняется изображениями из набора  $N$  случайным образом, при этом к ним добавляются 3 изображения из  $k$ ;

2) эмулируется клик в случайную точку поля, затем проверяется, было ли осуществлено попадание в искомый треугольник.

### Результаты и их обсуждение

Сначала исследуем зависимость соотношения сторон поля аутентификации и вероятности случайно попасть в искомую область. Для  $k = 3$ ,  $N = 60$  результаты при различных размерах поля приведены в табл. 1.

Здесь во всех случаях коэффициент заполненности равнялся 60 % (максимально возможное из имеющихся значений).

Можно сделать вывод, что оптимальной формой поля является квадрат. При сравнении прямоугольников с разными длинами сторон видно, что при сопоставимых площадях вероятности того, что центр поля принадлежит искомому треугольнику, существенно различаются. Напри-

мер, для прямоугольников  $8 \times 8$  и  $6 \times 10$  вероятности различаются более чем в три раза (0,09 и 0,297 соответственно), а для прямоугольников  $6 \times 6$  и  $5 \times 7$  – почти в три раза (0,1 и 0,299 соответственно).

**Таблица 1. Вероятность случайной авторизации злоумышленником в одном раунде при различных размерах поля**

Ширина поля, число клеток	Высота поля, число клеток					
	10	9	8	7	6	5
10	0,089					
9	0,143	0,099				
8	0,196	0,148	0,092			
7	0,241	0,240	0,162	0,106		
6	0,297	0,255	0,220	0,191	0,100	
5	0,337	0,359	0,316	0,299	0,218	0,145

Исследуем влияние коэффициента заполненности на вероятность определения злоумышленником изображений, входящих в  $k$  (вообще, очевидно, что задача злоумышленника тем сложнее, чем большее число изображений на экране будет присутствовать, но попытаемся оценить, насколько она усложнится при том или ином увеличении коэффициента заполненности).

Зададим начальные условия  $N = 120$ ,  $k = 6$ ,  $m = 10$ ; при этом для коэффициента заполненности в 60 % на экране будут присутствовать 60 изображений (из них 57 из набора  $N$ , и 3 – из набора  $k$ ).

Для проверки была разработана функция, реализующая сценарий атаки злоумышленника. Эмулируется проведение заданного числа раундов аутентификации, при этом в первом раунде сохраняет комбинации из трех изображений, которые потенциально могут составлять парольную последовательность, а в следующих раундах из сохраненного перечня отбрасываются неудовлетворительные комбинации. Затем возвращается число возможных оставшихся комбинаций. Описанный алгоритм повторялся 10 раз, после чего вычислялось среднее арифметическое и округлялось до ближайшего целого. При этом в каждом случае эмулируется «клик» пользователем в центр масс треугольника.

По результатам, приведённым в табл. 2, можно отметить следующую закономерность – после 1 раунда имеем спад, более или менее резкий, в зависимости от коэффициента заполненности, а затем результат колеблется в некоторых пределах, не имея тенденции к стабильному росту или спаду. Это позволяет с высокой вероятностью утверждать, что в пределах 5–10 раундов аутентификации злоумышленник не сможет точно определить искомый набор изображений. При этом необходимо отметить, что даже небольшое увеличение коэффициента заполненно-

сти (например, с 20 % до 30 % приводит к увеличению числа возможных комбинаций для злоумышленника в 2 раза и более).

**Таблица 2. Количество возможных вариантов для злоумышленника при изменении коэффициента заполненности**

№ раунда	Коэффициент заполненности, %				
	20	30	40	50	60
1	345	624	1849	3648	4510
2	134	529	1648	1894	4377
3	147	579	1099	2049	3324
4	145	487	1019	1525	3919
5	134	289	926	1970	4347
6	126	600	1419	2222	3545
7	131	548	1164	2546	3454
8	155	471	1285	2213	3872
9	127	555	1218	1760	4172
10	155	488	1027	1959	4354

Кроме того, было проведено исследование на добровольцах для оценки необходимого времени аутентификации. Тестирование проводилось следующим образом: каждый испытуемый в течение нескольких минут (5–10) тренировался использовать приложение при различных параметрах алгоритма, затем проводились 10 раундов аутентификации, общее время аутентификации фиксировалось в консоли браузера, после чего вычислялось среднее время одного раунда. Тестирование проводилось для поля 10×10 клеток с коэффициентом заполненности от 20 % до 60 %.

Результаты исследования сведены в табл. 3.

**Таблица 3. Оценка времени, необходимого для аутентификации**

Коэффициент заполненности, %	Время одного раунда аутентификации, с			
	Испытуемый 1	Испытуемый 2	Испытуемый 3	Среднее
20	10,1	10,8	12,2	11,0
30	12,3	10,7	13,5	12,2
40	14,4	11,3	16,1	13,9
50	17,6	12,8	17,0	15,8
60	19,7	13,1	18,9	17,2

Таким образом, даже при 5–6 раундах аутентификации общее затраченное пользователем время может составлять примерно две минуты, что в десятки раз превышает время аутентификации, например, с помо-

щью PIN-кода. Отчасти это можно объяснить новизной алгоритма для испытуемых.

### **Выводы**

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Оптимальной формой поля аутентификации является квадрат. В заданном диапазоне значений оптимальная величина коэффициента заполненности – 60 % (при этом значении коэффициента задача злоумышленника может усложниться в два раза и более по сравнению с вариантом использования коэффициента заполненности в 50 %). Несмотря на существенную величину времени аутентификации исследуемого алгоритма применительно к мобильным устройствам с небольшим экраном, в некоторых случаях это может быть оправдано, так как применение подобного алгоритма позволяет решить проблему «подглядывания» при вводе пароля и существенно усложнить проведение атак злоумышленником даже при использовании им специальных программ.

### **Список литературы**

1. *Хорев, П. Б.* Программно-аппаратная защита информации / П. Б. Хорев. – Москва : ФОРУМ, 2013. – 352 с.
2. *Blonder, G.* Graphical passwords. United States Patent, 1996, 5, 559, 961.
3. *Dhamija, R., Perrig, A.* Deja vu: a user study using images for authentication // Proceedings of 9th USENIX Security Symposium (August 14-17, 2000). Denver, USA : USENIX, 2000. URL: [https://www.usenix.org/legacy/publications/library/proceedings/sec2000/full\\_papers/dhamija/dhamija.pdf](https://www.usenix.org/legacy/publications/library/proceedings/sec2000/full_papers/dhamija/dhamija.pdf).
4. *Suo, X., Zhu, Y., Owen, G. S.* Graphical passwords: a survey // 21st Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC'05). Tucson, USA : IEEE. DOI: 10.1109/CSAC.2005.27.
5. *Sobrado, L., Birget, J.-C.* Graphical passwords // The Rutgers Scholar. An Electronic Bulletin for Undergraduate Research. 2002. Vol. 4. URL: <https://rutgersscholar.libraries.rutgers.edu/volume04/sobrbirg/sobrbirg.htm>.
6. *Минаков, В. А.* Анализ эффективности аутентификации с помощью графических паролей / В. А. Минаков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 11. – С. 228–230.

---

I. S. El'tsov, student

A. Yu. Vdovin, CSc in engineering, associate professor

E-mail: vt@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Research of the “Graphical Password” Using Challenge Response Authentication for Mobile Devices**

*Widely used password authentication has numerous disadvantages. An alternative is “graphical password”, some of which implement challenge response authentication. In this paper, the algorithm based on the ideas of Sobrado and Birget is studied in relation to small screens of mobile devices.*

**Keywords:** graphical password, challenge response authentication, password authentication, mobile device.

УДК 621.396

*А. С. Раев*, магистрант

*П. М. Касимов, А. А. Зайцева*, студенты

*А. Н. Копысов*, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Радиотехника»

*В. В. Хворенков*, д-р техн. наук, проф.

E-mail: [pavel\\_kasimov5@list.ru](mailto:pavel_kasimov5@list.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Сравнение и оценка диаграмм направленности излучателей для работы с поляризационно-модулированными сигналами в прототипе и в модели**

*Данная статья посвящается оценке и сравнению диаграмм направленности излучателей для работы с поляризационно-модулированными сигналами в прототипе и в модели. Описана структура двухкомпонентной антенны для работы с поляризационно-модулированными сигналами. Создана модель данного излучателя и измерена диаграмма направленности в модели. Разработана методика и проведены испытания излучателей, выполнена оценка характеристик прототипа. В результате было выявлено, что характеристики реальных прототипов не соответствуют характеристикам модели. Замечено, что ширина диаграммы направленности прототипа меньше, чем в модели, примерно на 200, а уровень усиления упал на 2,5 дБ.*

**Ключевые слова:** двухкомпонентная антенна, диаграмма направленности, Rohde & Schwarz SMA 100B, Rohde & Schwarz FSW8, MATLAB.

### **Введение**

Внедрение компьютерного моделирования при разработке радиосистем часто используется компьютерное моделирование, однако характеристики реальных прототипов в большинстве случаев имеют отклонения. Особенно ярко данная проблема проявляется при разработке цифровых систем, в частности цифровых антенных решеток. С данной проблемой сталкиваются при конструировании излучателей, входящих в их состав.

Согласно вышесказанному целью работы является сравнение и оценка результатов измерения диаграммы направленности прототипа излучателя и компьютерной модели.

В ходе данного исследования было необходимо выполнить следующие задачи:

1. Описание структуры и разработка модели двухкомпонентной антенны.
2. Измерение характеристики полученной модели и разработка реального прототипа.
3. Разработка методики проверочных испытаний излучателей, входящих в состав цифровой антенной решетки.
4. Выполнение испытаний согласно методике и измерение диаграммы направленности прототипа.
5. Сравнение результатов проведенных испытаний и результатов моделирования.

### Теоретические сведения

Поляризацию электромагнитных волн чаще всего характеризуют двумя основными параметрами: углом ориентации одной из полуосей эллипса поляризации и отношением малой полуоси эллипса ( $\theta$ ) поляризации к большой (коэффициент эллиптичности  $K$ ). При этом направление вращения вектора поля задается знаком коэффициента эллиптичности. Иногда используют параметр угла эллиптичности  $\varphi = \arctg(K)$  [0].

Все описанные параметры можно пронаблюдать на рис. 1.

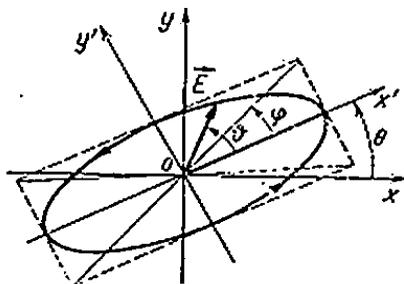


Рис. 1. Поляризационная диаграмма электромагнитного излучения

Для обеспечения приема электромагнитной волны (ЭМВ) любой поляризации без потерь необходимо обеспечить преобразование в электрический сигнал сразу двух компонент ЭМВ: горизонтальной  $e_{\xi}(t)$  и вертикальной  $e_{\eta}(t)$ . Антенна, которая соответствует данному описанию, называется двухкомпонентной [3].

Структурная схема такой антенны представлена рис. 2.

Параметры поляризации такой антенны, как в режиме приема, так и в режиме передачи, будут одни и те же:  $\theta$ ,  $\varphi$ . Антенна состоит из уст-

ройств 1, 2 компенсации углов ориентации и эллиптичности поляризационной диаграммы приемного сигнала.

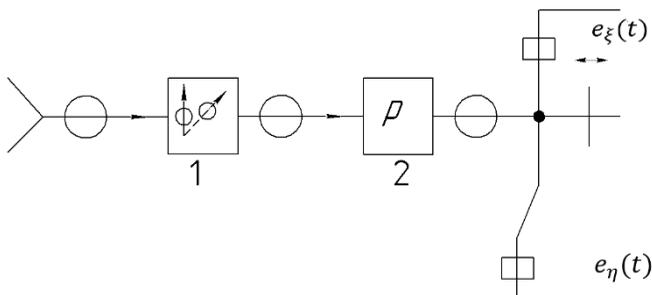


Рис. 2. Структурная схема двухкомпонентной антенны

### Разработка модели

Пользуясь теоретическими сведениями, разработана модель двухкомпонентной антенны. Модель построена в программе High Frequency Structural Simulator [4]. Разработанная модель представлена на рис. 3.

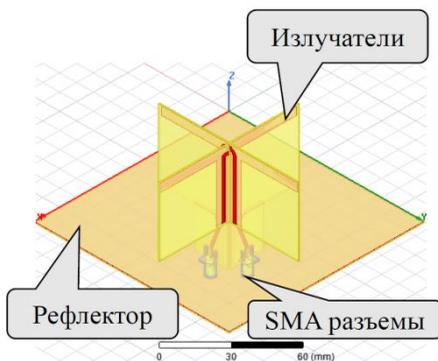


Рис. 3. Модель излучателя для работы с поляризационно-модулированными сигналами

Отличие модели от теоретической структурной схемы заключается в отсутствии устройств компенсации углов  $\varphi$  и  $\theta$  и наличии двух отдельных излучателей (диполей) на каждую плоскость поляризации: горизонтальную и вертикальную.

Излучатели крепятся к рефлектору путем пайки. Допустимо использование дополнительного пластикового крепежа. Предлагаемый материал печатных плат – Taconic RF-30, толщина диэлектрика – 0,762 мм, толщина медных проводников – 0,035 мм [5].

На основе данной модели произведен анализ технических характеристик. Основными из рассматриваемых характеристик являлись диаграммы направленности для каждой плоскости поляризации. Для качественного разбора построены графики значений в зависимости от частоты.

Далее проведен разбор диаграммы направленности излучателя. ДН были построены при активизации излучателя в плоскости  $OX$  и  $OY$ . Далее представлена ДН при активизации излучателя в плоскости  $OX$  (рис. 4).

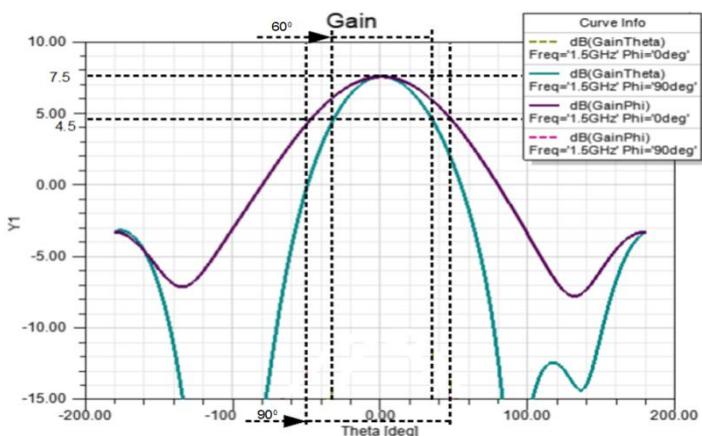


Рис. 4. Коэффициент усиления модели излучателя при активизации излучателя в плоскости  $OX$

На графике отмечены основные характеристики:

- уровень максимума главного лепестка  $\varphi = 0^\circ$  ..... 7,5 дБ;
- уровень максимума главного лепестка  $\varphi = 90^\circ$  ..... 7,5 дБ;
- ширина главного лепестка  $\varphi = 0^\circ$  .....  $60^\circ$ ;
- ширина главного лепестка  $\varphi = 90^\circ$  .....  $90^\circ$ .

Также представлена ДН при активизации излучателя в плоскости  $OY$  (рис. 5).

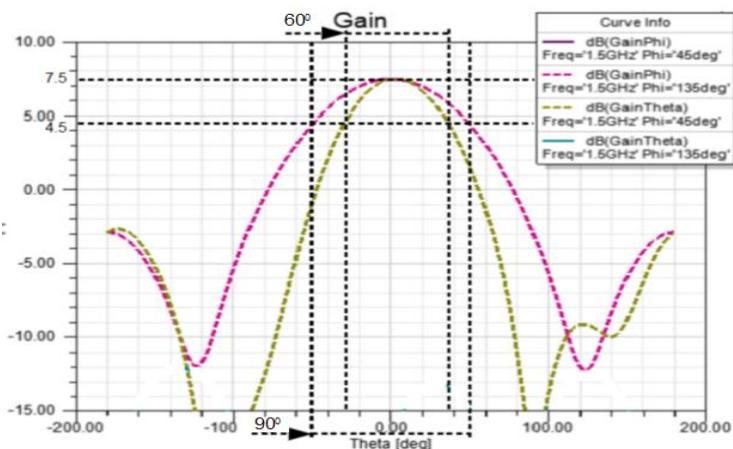


Рис. 5. Коэффициент усиления модели излучателя при активизации излучателя в плоскости  $OY$

На графике отмечены основные характеристики:

- уровень максимума главного лепестка  $\varphi = 0^\circ$  ..... 7,5 дБ;
- уровень максимума главного лепестка  $\varphi = 90^\circ$  ..... 7,5 дБ;
- ширина главного лепестка  $\varphi = 0^\circ$  .....  $90^\circ$ ;
- ширина главного лепестка  $\varphi = 90^\circ$  .....  $60^\circ$ .

Пользуясь данной моделью, построен прототип излучателей. Структура данного прототипа представлена на рис. 6.

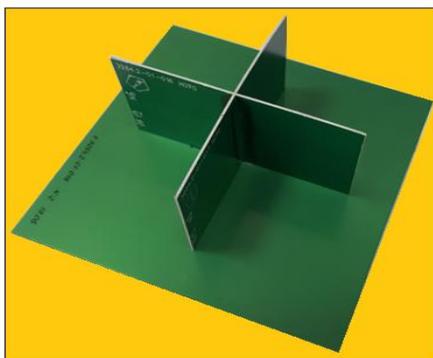


Рис. 6. Прототип излучателя для работы с поляризационно-модулированными сигналами

Как было описано в модели, данный прототип имеет два диполя, отвечающие за свою плоскость поляризации.

### **Разработка методики проверочных испытаний излучателей, входящих в состав цифровой антенной решетки**

Для анализа и оценки диаграммы направленности необходимо произвести испытания, в рамках которых выполняется прием гармонического сигнала и производится измерение его уровня. Сигнал формируется с генератора сигналов Rohde & Schwarz SMA 100B [6]. Прием осуществляется анализатором спектра и сигналов Rohde & Schwarz FSW8 [7].

Материально-техническое обеспечение испытаний:

- Rohde & Schwarz SMA 100B ..... 1 шт.;
- Rohde & Schwarz FSW8 ..... 1 шт.;
- излучатели..... 2 шт.

Эталонный сигнал представляет собой гармонический сигнал:

- частота несущей ..... 1,5 ГГц;
- шаг перестройки частоты ..... 1 МГц;
- уровень сигнала ..... 0 дБм.

В испытаниях участвовало два прототипа излучателей: один в качестве передающего, второй в качестве приемного. Подключив один диполь первого излучателя к генератору, а другой диполь к 50 Ом, выполняется передача гармонического сигнала. Далее подключить один диполь второго излучателя к анализатору спектра и сигналов, другой диполь этого излучателя подключить к 50 Ом и произвести прием гармонического сигнала. Разместить излучатели на расстоянии 2 м друг от друга, передающий и приемный диполи – параллельно друг другу, направление основного излучения – друг на друга; выполнить анализ коэффициента передачи в полосе  $\pm 3$  МГц от несущей частоты 1,5 ГГц. Далее, поворачивая передающий излучатель с шагом 100 в горизонтальной плоскости относительно исходного направления, измерить зависимость коэффициента передачи от направления [8]. Далее повторяются испытания для второго диполя.

### **Проведенные испытания и их результаты**

Согласно описанной методике проведены испытания. Структурная схема подключения аппаратуры представлена на рис. 7.

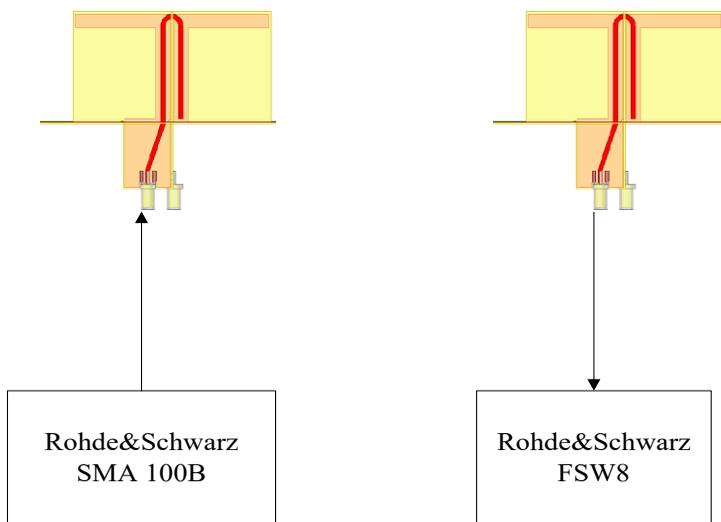


Рис. 7. Схема подключения измерительной аппаратуры

Испытания проводились в лабораторных условиях при нормальных значениях окружающей среды (температура, влажность, давление, и т. д.).

На первом этапе испытаний необходимо определить зависимость коэффициента передачи в полосе  $\pm 3$  МГц от несущей частоты 1,5 ГГц для четырех комбинаций подключения.

Результаты измерения представлены в таблице.

#### Изменение коэффициента передачи от частоты

Перестройка частоты, МГц	-3	-2	-1	0	1	2	3
Кэф. пер. 1/1, дБм	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
Кэф. пер. 2/2, дБм	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32

На втором этапе выполняется оценка зависимости коэффициента передачи от направления. При повороте передающего излучателя с шагом  $10^\circ$  оценивался коэффициент передачи для всех четырех комбинаций подключения диполей. Поскольку от частоты коэффициент передачи не имел искажений, согласно таблице, измерения производятся лишь на несущей частоте.

Далее необходимо перевести значения коэффициента передачи в соответствующий им коэффициент усиления антенны [8]. При направле-

нии излучателей строго друг на друга коэффициенты усиления являются идентичными и вычисляются по формуле

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_R}{P_T}}, \quad (1)$$

где  $P_R/P_T$  – коэффициент передачи;  $r$  – расстояние между антеннами;  $\lambda$  – длина волны.

При повороте передающего излучателя на определенный угол ее коэффициент усиления изменяется, тогда как коэффициент усиления приемного излучателя сохраняется и равен коэффициенту усиления при нулевом направлении.

Исходя из этого, коэффициент усиления излучателя для определенного угла вычисляется по формуле:

$$G_2 = \frac{(4 \cdot \pi \cdot r)}{\lambda^2 \cdot G} \cdot \left( \frac{P_R}{P_T} \right), \quad (2)$$

где  $P_R/P_T$  – коэффициент передачи;  $r$  – расстояние между антеннами;  $\lambda$  – длина волны;  $G$  – коэффициент усиления антенны для нулевого направления.

### Сравнение результатов исследования

Согласно результатам в программе MATLAB [9] построены графики диаграммы направленности при активизации излучателя в плоскости  $OX$  (рис. 8) и в плоскости  $OY$  (рис. 9).

На графике (рис. 8) отмечены основные характеристики:

- уровень максимума главного лепестка  $\varphi = 0^\circ$  ..... 5 дБ;
- уровень максимума главного лепестка  $\varphi = 90^\circ$  ..... 5 дБ;
- ширина главного лепестка  $\varphi = 0^\circ$  ..... 40°;
- ширина главного лепестка  $\varphi = 90^\circ$  ..... 70°.

На графике (рис. 9) отмечены основные характеристики:

- уровень максимума главного лепестка  $\varphi = 0^\circ$  ..... 5 дБ;
- уровень максимума главного лепестка  $\varphi = 90^\circ$  ..... 5 дБ;
- ширина главного лепестка  $\varphi = 0^\circ$  ..... 70°;
- ширина главного лепестка  $\varphi = 90^\circ$  ..... 55°.

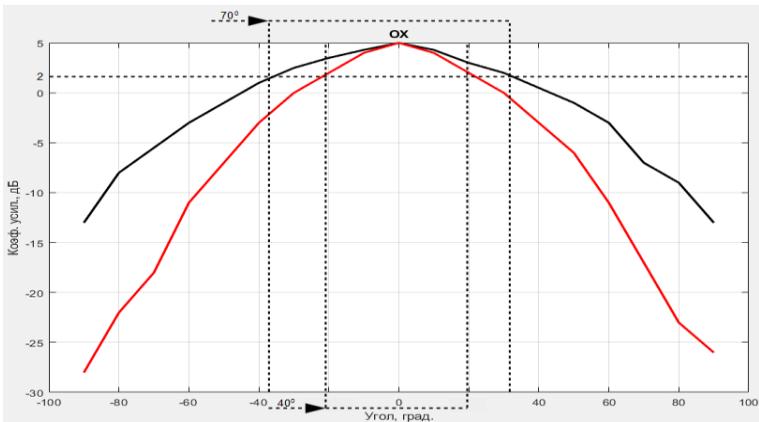


Рис. 8. Коэффициент усиления прототипа излучателя при активизации излучателя в плоскости  $OX$

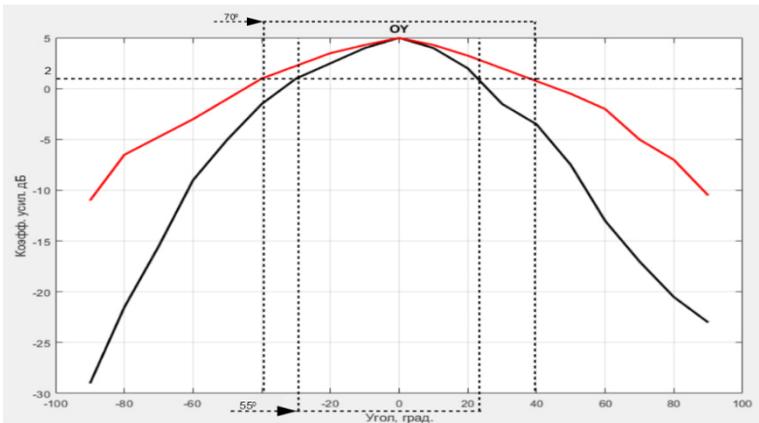


Рис. 9. Коэффициент усиления прототипа излучателя при активизации излучателя в плоскости  $OY$

Пользуясь результатами моделирования излучателей и результатами испытания прототипов, необходимо сравнить основные характеристики оценки диаграммы направленности излучателя. Можно заметить, что коэффициент усиления излучателя в прототипе меньше на 2,5 дБ относительно модели. Однако ширина диаграммы направленности прототипа для диполя в плоскости  $OX$  меньше на  $20^\circ$ , как при  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$

относительно результатов модели. Так же для диполя в плоскости  $OY$  ширина диаграммы направленности прототипа меньше на  $20^\circ$  при  $\varphi = 0^\circ$  и на  $15^\circ$  при  $\varphi = 90^\circ$  относительно результатов модели.

### Выводы

В результате работы согласно описанному теоретическому материалу для разработки двухкомпонентной антенны разработана ее компьютерная модель. Измерена диаграмма направленности в модели, согласно которой коэффициент усиления в максимуме равняется 7,5 дБ. Ширина же диаграммы направленности равняется  $60^\circ$  при  $\varphi = 0^\circ$  для диполя в плоскости  $OX$  и при  $\varphi = 90^\circ$  для диполя в плоскости  $OY$  в модели. Так же ширина диаграммы направленности равна  $90^\circ$  при  $\varphi = 90^\circ$  для диполя в плоскости  $OX$  и при  $\varphi = 0^\circ$  для диполя в плоскости  $OY$  в модели. На основе данной модели разработан прототип излучателя. Для оценки и сравнения диаграммы направленности прототипа разработана методика измерения и согласно ей проведены испытания. Выявлено, что в полосе  $\pm 3$  МГц от несущей частоты 1,5 ГГц уровень сигнала не имеет значительных отклонений, поэтому было решено измерять диаграмму направленности лишь на несущей частоте. Исходя из результатов испытаний, диаграмма направленности прототипа имеет основные характеристики: коэффициент усиления главного лепестка, равный 5 дБ, что меньше на 2,5 дБ относительно результатов моделирования. Ширина диаграммы направленности составляет:  $40^\circ$  ( $\varphi = 0^\circ$ ) и  $70^\circ$  ( $\varphi = 90^\circ$ ) для диполя в плоскости  $OX$  и  $55^\circ$  ( $\varphi = 90^\circ$ ) и  $70^\circ$  ( $\varphi = 0^\circ$ ) для диполя в плоскости  $OY$ . Можно сделать вывод, что ширина диаграммы направленности прототипа меньше чем в модели примерно на  $20^\circ$ , а уровень усиления упал на 2,5 дБ.

### Список используемой литературы

1. Гусев, К. Г. Поляризация модуляция / К. Г. Гусев, А. Д. Филатов, А. П. Сополев. – Москва : Сов. радио, 1974. – 288 с.
2. Татаринцов, В. Н. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразования / В. Н. Татаринцов, С. В. Татаринцов, Л. П. Лигтхарт. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2012. – 380 с.
3. Лавров, А. С. Антенно-фидерные устройства / А. С. Лавров, Г. Б. Резников. – Москва : Сов. радио, 1974. – 360 с.
4. Банков, С. Е. Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft / С. Е. Банков, А. А. Курушин. – Москва : НПП «Родник», 2009. – 256 с.
5. Раев, А. С. Разработка макета цифровой антенной решетки для исследования поляризационно-модулированных сигналов / А. С. Раев // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. Всерос. науч.-

техн. конф. (Ижевск, 31 мая 2019 г.) / отв. ред. К. Ю. Петухов. – Ижевск : Изд-во ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. – С. 319–329.

6. R&S SMA 100B. RF and Microwave Signal Generator. Specifications. – Текст : электронный // Rohde & Schwarz [сайт]. – URL: [https://www.rohde-schwarz.com/ru/manual/-r-s-sma100b-manuals-gb1\\_78701-434880.html](https://www.rohde-schwarz.com/ru/manual/-r-s-sma100b-manuals-gb1_78701-434880.html) (дата обращения: 08.06.2020).

7. R&S FSH Signal and Spectrum Analyzer. User Manual [Электронный ресурс] // Rohde&Schwarz [сайт]. – URL: [https://www.rohde-schwarz.com/ru/manual/-r-s-fsw-manuals-gb1\\_78701-29088.html](https://www.rohde-schwarz.com/ru/manual/-r-s-fsw-manuals-gb1_78701-29088.html) (дата обращения 08.06.2020).

8. Фрадин, А. З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А. З. Фрадин, Е. В. Рьжиков. – Москва : Гос. изд-во лит. по вопросам связи и радио, 1962. – 317 с.

9. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

A. S. Raev, master student

P. M. Kasimov, A. A. Zaitseva, students

A. N. Kopysov, CSc in engineering, associate professor,  
head of the “Radio Engineering” department

V. V. Khvorenkov, DSc in engineering, professor

E-mail: [pavel\\_kasimov5@list.ru](mailto:pavel_kasimov5@list.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Development and Evaluation of Radiation Patterns of Emitters Included in the Model of a Digital Antenna Array**

*This article is devoted to the assessment of the radiation patterns of the emitters included in the model of the digital antenna array. A technique was developed and the test bench was tested, and the characteristics of the prototype were assessed. As a result, it was revealed that the characteristics of real prototypes do not correspond to the characteristics of the model.*

**Keywords:** radiation pattern, two-component antenna, Rohde & Schwarz SMA 100B, Rohde & Schwarz FSW8, MATLAB.

---

УДК 621.372

*В. А. Сидорина*, канд. пед. наук, доц.

*Е. Д. Урсегова, Д. Р. Чистякова*, студенты

E-mail: [vasidorina@mail.ru](mailto:vasidorina@mail.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Экспериментальное исследование приема амплитудно-модулированных сигналов на одной боковой полосе**

*В статье рассмотрены формирование и прием амплитудно-модулированных сигналов на одной боковой полосе. В результате эксперимента смоделирован сигнал и построена схема приема. Была использована среда MatLab. Результаты исследования показали, что прием амплитудно-модулированного сигнала на одной боковой полосе делает возможным наиболее результативное использование частотного ресурса и увеличение дальности связи, а также позволяет значительно снизить уровень шума, возникающий при применении амплитудной модуляции с подавленной несущей частотой.*

**Ключевые слова:** амплитудно-модулированные сигналы, боковая полоса, MatLab, моделирование.

#### **Введение**

Как известно, в модулируемом по амплитуде сигнале примерно 30 % мощности делится пополам между боковыми частотными полосами и примерно 70 % мощности передатчика идет на излучение сигнала несущей частоты. В результате этого исключаем из спектра сигнала несущую и одну боковую полосы.

Сигнал с однополосной модуляцией занимает в радиоэфире полосу частот в два раза меньше полосы амплитудно-модулированного сигнала, что делает возможным наиболее результативное использование частотного ресурса и увеличение дальности связи.

Зачастую невозможна непосредственная передача по радиоканалу сигналов, получаемых из источника сообщений. На это значительно влияет их относительная низкочастотность. Для реализации эффективной передачи сигналов в любой среде требуется перенос спектра этих сигналов из области низких частот в область с высокими частотами. Данный процесс в радиотехнике получил название «модуляция».

Хотим отметить, что для моделирования была использована программа MATLAB R2016a. Данная среда предназначена для технических вычислений и совмещает в себе программу для моделирования (расши-

рение MATLAB – SIMULINK), предназначенную для комплексного анализа и проектирования, и язык программирования (MATLAB), необходимый для работы с математическими моделями (матрицами, массивами и т. д.). Программные продукты MATLAB демонстрируют процесс работы различных алгоритмов с разными исходными данными. MATLAB применяется в автомобилестроении, аэрокосмической и других отраслях, а также в образовании. Программа MATLAB была изначально создана не для людей с высокими навыками в программировании, а для инженеров и математиков, поэтому основными достоинствами ее применения являются интерактивные возможности, автоматизация работы, наличие множества готовых встроенных функций и материалов (например, программные блоки ToolBox, которые можно использовать для моделирования) и востребованность на рынке. MATLAB способен обрабатывать большие блоки данных, моделировать системы и комплексы, обрабатывать сигналы и изображения, что делает данную среду разработки незаменимой в радиотехнической сфере.

### **Постановка задачи**

Однополосная модуляция обладает большим практическим значением в различных системах связи, в том числе войсковой. Несмотря на это при ее практической реализации часто встречаются некоторые технические трудности, как при передаче, так и при приеме.

В ходе исследований было установлено, что при преобразовании амплитудно-модулированного сигнала в однополосный можно выиграть по мощности передатчика примерно в 16 раз.

На данный момент известны несколько способов формирования однополосных сигналов, такие как:

- фильтровой, или способ последовательных преобразований частоты с фильтрацией;
- фазокомпенсационный, или фазоразностный;
- фазофильтровый;
- синтетический.

Задачей данного исследования является экспериментальное формирование сигнала фильтровым способом.

### **Решение задачи**

В основе фильтрового способа (рис. 1) лежит выделение из спектра амплитудно-модулированного сигнала одной из боковых полос частот при помощи фильтра. Кольцевой смеситель формирует однополосный сигнал на частоте  $f_1 \pm F$ . Полосовой фильтр на выходе не пропускает незадействованную полосу частот. Колебание несущей подавляется в

самом преобразователе. Второй преобразователь частоты модифицирует спектр сигнала в область частоты  $f_2$ ,  $f_2 > f_1$ . Второй полосовой фильтр отделяет сигнал верхней боковой полосы (ВБП), отстоящий от нижней боковой полосы (НБП) на величину  $2f_1$ . Подобная сильная расстройка между боковыми полосами дает возможность подавить неиспользуемую полосу частот посредством достаточно простых фильтров.

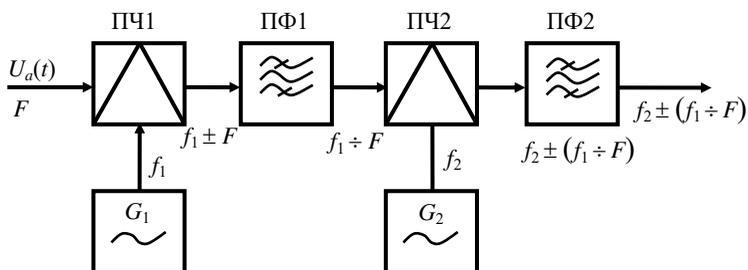


Рис. 1. Схема формирования однополосного сигнала способом последовательных преобразований частоты с фильтрацией

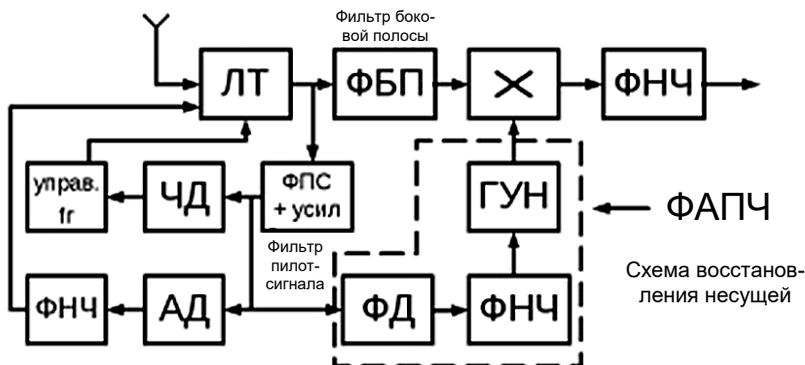


Рис. 2. Схема структуры приемного устройства однополосного сигнала

При демодуляции несущая восстанавливается, искажения сигнала не обнаруживаются. На рис. 2 находится схема приемного устройства однополосного сигнала с частично подавленной несущей.

Сигнал с выхода линейного тракта подается на два фильтра, фильтр боковой полосы отделяет информативную часть, фильтр постоянной составляющей отделяет сигнал с заранее известными на принимающей стороне характеристиками (пилот-сигнал).

Выход фильтра постоянной составляющей организует работу систем автоподстройки частоты и производит автоматическую регулировку усиления (АРУ), а пилот-сигнал поступает на схему восстановления несущей. Стабильный по уровню и очищенный от помех сигнал несущей подается на перемножитель с выхода генератора, управляемого напряжением (ГУН).

После перемножителя сигнал подается на ФНЧ, и происходит демодулирование сигнала.

Ниже приведена программа, которая была разработана в процессе исследования. Для простоты используется пилообразный модулирующий сигнал.

### *Листинг 1*

```
% Частота дискретизации 100 Гц, длительность сигнала 12 секунд
Fs = 100;
t = (0:12*Fs+1)'/Fs;
Fc = 10; % Несущая частота
x = sawtooth(t); % Пилообразный модулирующий сигнал
r = awgn(x,12,'measured'); % Добавляем к сигналу АБГШ
y = ssbmod(r,Fc,Fs); % Реализуем однополосный АМ сигнал
z = ssbdemod(y,Fc,Fs); % Производим демодуляцию
% Графики
subplot(3,1,1);
plot(t,r); % Первичный сигнал
title('Первичный сигнал');
ylabel('x(t)');
grid on;
subplot(3,1,2);
plot(t,y); % Модулированный сигнал
title('Модулированный сигнал');
ylabel('y(t)');
grid on;
subplot(3,1,3);
plot(t,z); % Демодулированный сигнал
title('Демодулированный сигнал');
xlabel('Время (с)');
ylabel('z(t)');
grid on;
% Вычисляем спектр модулированного сигнала
A = fft(y);
A = abs(A(1:length(A)/2+1));
B = (0:length(A)-1)*Fs/length(A)/2;
% Выводим график спектра модулированного сигнала
figure;
subplot(1,1,1);
plot(B,A);
title('Спектр АМ сигнала с одной боковой полосой');
xlabel('Частота (Гц)');
```

```
ylabel('Модулированный сигнал - y');  
grid on;
```

В качестве исходных данных приняты следующие величины:

- частота дискретизации 100 Гц;
- несущая частота 10 Гц;
- длительность сигнала 12 с.

Для сравнения сигнала с шумовым воздействием и без воздействия шума при помощи функции AWGN к исходному сигналу добавляется аддитивный гауссовский шум. Используемая функции SSBMOD позволяет формировать однополосный модулированный сигнал, а функция SSBDEMOD демодулирует сигнал.

### Результаты исследования

В ходе исследования были экспериментально получены графики и спектры сигнала (рис. 3–9).

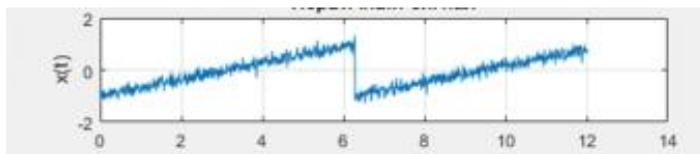


Рис. 3. Первичный сигнал

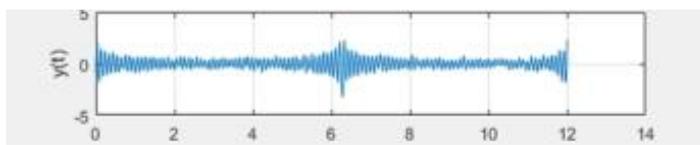


Рис. 4. Модулированный сигнал



Рис. 5. Демодулированный сигнал

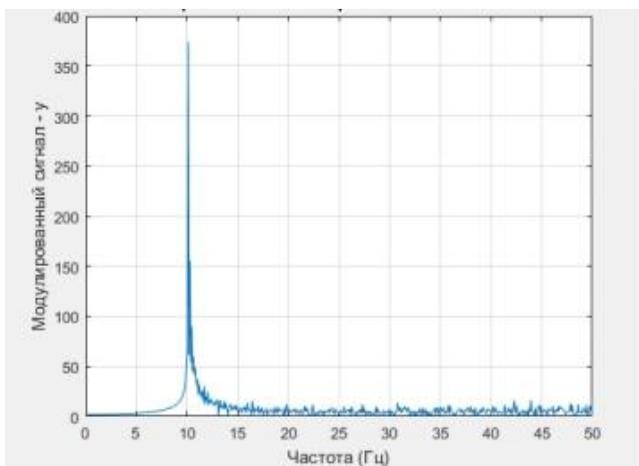


Рис. 6. Спектр АМ-сигнала с верхней боковой полосой

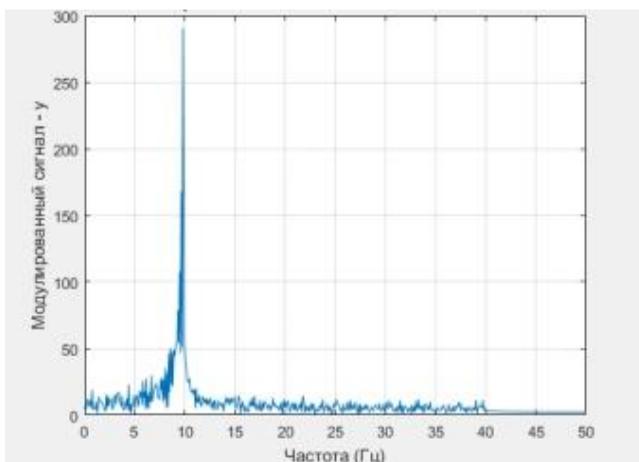


Рис. 7. Спектр АМ-сигнала с нижней боковой полосой

Для наглядного сопоставления приведем спектр двухполосного амплитудно-модулированного сигнала.

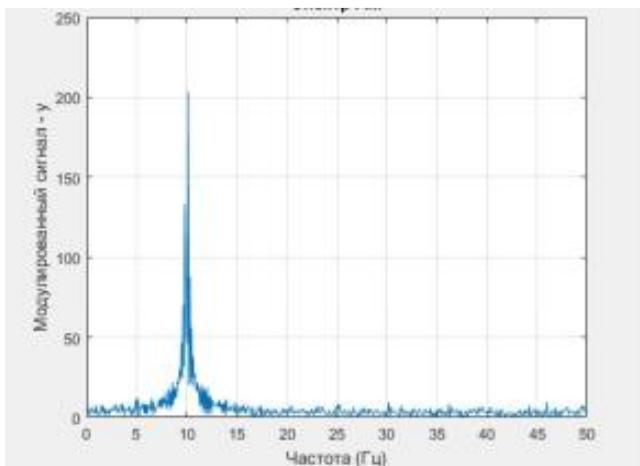


Рис. 8. Спектр АМ-сигнала (двухполосного)

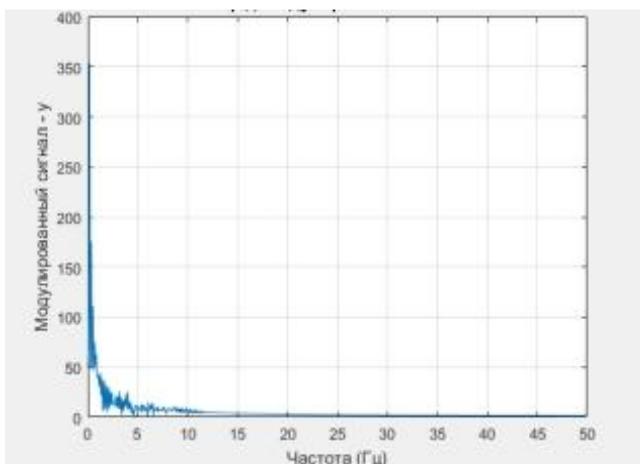


Рис. 9. Спектр демодулированного сигнала

Моделирование показало, что сигнал с однополосной модуляцией занимает полосу вдвое уже, чем сигнал с амплитудной модуляцией. Кроме того, в приемном устройстве становится возможным использование более узкой полосы пропускания, что способно уменьшить проникновение помех.

## Выводы

В результате исследования было проведено моделирование в среде MatLab и приведена схема передачи амплитудно-модулированного сигнала на одной боковой полосе. В радиосигнале, модулируемом по амплитуде, примерно 70 % мощности передатчика идет на излучение сигнала несущей частоты, который не несет информации о модулирующем сигнале. Оставшаяся мощность (примерно 30 %) делится в равных частях между боковыми частотными полосами, отображающими друг друга зеркально. Благодаря этому становится возможным исключение из спектра сигнала несущей и одной боковой полосы и можно использовать всю мощность передатчика для излучения исключительно информативного сигнала, не искажая передаваемую информацию.

Сигнал с однополосной модуляцией занимает в эфире полосу частот в два раза меньше полосы амплитудно-модулированного сигнала, что делает возможным наиболее результативное использование частотного ресурса и увеличение дальности связи.

## Список литературы

1. *Варгаузин, В. А.* Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи / В. А. Варгаузин, И. А. Цикин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2013. – 352 с.
2. *Галкин, В. А.* Цифровая мобильная радиосвязь / В. А. Галкин. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2011. – 594 с.
3. *Рихтер, С. Г.* Кодирование и передача речи в цифровых системах подвижной радиосвязи / С. Г. Рихтер. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2011. – 304 с.
4. *Варакин, Л. Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – Москва : Радио и связь, 1985. – 384 с.
5. Ssbmod. – Текст : электронный // docs.exponenta.ru : [сайт]. – URL: <https://docs.exponenta.ru/comm/ref/ssbmod.html>, для доступа к информ. ресурсам требуется авторизация. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.05.2020).
6. Ssbdemod. – Текст : электронный // MathWorks : [сайт]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/ssbdemod.html>, свободный (дата обращения: 01.05.2020).

---

V. A. Sidorina, CSc in pedagogics, associate professor

E. D. Ursegova, D. R. Chistyakova, students

E-mail: [vasidorina@mail.ru](mailto:vasidorina@mail.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Experimental Study of Reception of Single-Sideband Amplitude Modulated Signals**

*The article describes the formation and receiving of single-sideband amplitude modulated signals. As a result of the experiment, a signal was modeled and a reception circuit was constructed. MatLab was used. The results of the study showed that the reception of the of single-sideband amplitude modulated signals allows more efficient use of the frequency resource. It also allows to increase the communication range, as well to significantly reduce the noise level arising from the application of amplitude modulation with an unsuppressed carrier frequency.*

**Keywords:** amplitude modulated signals; sideband; MatLab; modeling.

УДК 531.383

*Ф. И. Спиридонов*, аспирант

E-mail: spiridonov.fedya@yandex.ru

*Р. И. Мингазов*, аспирант

E-mail: ramisjkee@gmail.com

*К. В. Шишаков*, д-р техн. наук, доц.

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Разработка программного комплекса для информационного сопровождения производства твердотельных волновых гироскопов**

*В работе представлено программное обеспечение, интегрирующее технологические процессы изготовления ТВГ в единую АСУТП. Рассмотрены задачи, возникающие при автоматизации процесса изготовления ТВГ. Для получения изделий и приборов, основанных на ТВГ с высокими характеристиками точности и надежности, требуется в процессе изготовления учитывать большое количество факторов, негативным образом влияющих на проведение технологических операций. Предложен программный комплекс по выявлению таких факторов, представленный в виде схемы программного продукта, модели данных, а также диаграммы потока данных.*

**Ключевые слова:** твердотельный волновой гироскоп, АСУТП, балансировка, программное обеспечение, база данных.

### **Введение**

Производство твердотельных волновых гироскопов (ТВГ) [4, 12, 13, 15, 17] состоит из множества сложных и наукоемких технологических процессов (ТП) [1, 3, 14, 17], интегрированных в единую АСУТП [2, 5]. Для повышения ее эффективности выполняется непрерывное развитие и усложнение программного комплекса, предназначенного для информационного сопровождения производства твердотельных волновых гироскопов. Выполненный в нем переход от «ручного способа» записи информации о проводимых ТП к единому цифровому хранилищу на основе построения разветвленных баз данных (БД) облегчает выявление факторов, негативным образом влияющих на качество произведенных изделий.

Точностные параметры ТВГ и навигационных комплексов на их основе являются важнейшими показателями качества. В то же время на

практике они зависят от большого количества разнообразных физических факторов и параметров. Эти вопросы широко обсуждаются научным сообществом, что отражается в регулярных публикациях на эту тему, в том числе в работах [6–10]. Тем не менее, они остаются открытыми, так как оказываются сильно зависящими от конкретных технологических решений. А предлагаемые функциональные зависимости, обоснованные теоретически, не всегда универсальны. Например, известно, что величина дрейфа сигнала ТВГ прямо пропорциональна раздобротности и обратно пропорциональна добротности [2], но на практике данная теоретическая модель имеет корреляцию [3]. При этом многие технологические факторы в теоретических моделях явно не учитываются, а их влияние на показатели качества может быть описано только статистическими моделями. Среди таких показателей качества можно отметить факторы нестабильности дрейфа, нелинейности выходного сигнала, нестабильности нелинейности выходного сигнала, температурной нестабильности параметров, шумовой составляющей, ухудшения точности при вибрациях и ударах, времени наработки на отказ и многие другие [7, 8, 11, 16]. Анализ показывает, что факторы качества глубоко не изучены. Считается, что их выявление позволит определить оптимальные режимы процессов изготовления ТВГ. Повышение же эффективности производства в конечном итоге ведет к высвобождению производственных ресурсов и увеличивает экономическую выгоду за счет оптимизации процесса.

### **Область решаемых задач**

Типовой процесс изготовления ТВГ состоит из следующих основных технологических этапов: шлифовка, полировка, отжиг, кислотное травление, промывка, балансировка, склейка, балансировка вклеенного резонатора, сварка [1, 3, 4, 17]. При этом весь цикл производства ТВГ включает более ста технологических операций, многие из которых являются многофакторными и уникальными. Например, качество проведения технологической операции «балансировка» ионно-плазменным травлением зависит от факторов: присутствие положительного заряда на поверхности стекла при ионной бомбардировке, снижающего эффективность распыления; точность определения дефекта и травление под углом 65–70°; присутствие конструктивной сложности оборудования, связанной с формированием ионного луча, распылением поверхности других деталей, удалением распыленных частиц из камеры и т.п. [3]. В свою очередь, для технологической операции балансировки ТВГ требуется оборудование, включающее в себя несколько сложных систем: вакуумную систему, систему охлаждения, систему ионно-плазменного

травления, измерительную систему, а также систему позиционного возбуждения. Так как все они оказывают значимое влияние на успешность проведения технологического процесса балансировки ТВГ, очень важно контролировать параметры всех этих систем.

Основной целью разработки и совершенствования (обновления) программного обеспечения является повышение качества всех этапов производства ТВГ. Для этого программный продукт должен решать множество задач – использоваться при управлении различными видами оборудования, при автоматизированном проведении технологических операций, при измерении параметров изделий ТВГ и т. п.. Все эти задачи удобно разделить на две большие группы – основные (задачи сопровождения производства) и дополняющие (исследовательские задачи).

К основным задачам относятся следующие: 1) управление ТП изготовления ТВГ; 2) управление производственным оборудованием для проведения ТП; 3) измерение параметров ТВГ; 4) сохранение результатов проведения ТП и др.

К дополняющим задачам относятся: 1) выявление факторов, негативным образом влияющих на проведение технологических операций (неполадки в оборудовании, износ оборудования, и т. п.) и точностные характеристики ТВГ при его изготовлении; 2) выявление способов: оптимизации технологических процессов; устранения факторов, влияющих негативным образом на проведение технологических операций (неполадки в оборудовании, износ) изготовления ТВГ; устранения факторов, влияющих негативным образом на точностные характеристики ТВГ при его изготовлении.

### **Модель программного комплекса**

Для решения поставленных задач программный комплекс должен взаимодействовать с тремя основными объектами: оборудование, оператор и хранилище данных. Схема взаимодействия объектов с программным обеспечением представлена на рис. 1.

Взаимодействие программного обеспечения с оборудованием производится с помощью программных модулей, включающих в себя классы по отправке и приему данных по интерфейсам: COM, USB, Ethernet и другим с использованием протоколов обмена данными.

Взаимодействие программного продукта с оператором производится с помощью пользовательского интерфейса (UserInterface (UI)). В свою очередь, UI взаимодействует с программным модулем управления оборудованием.

С хранилищем данных программа взаимодействует с помощью программного модуля DataBase.



Рис. 1. Схема взаимодействия объектов с ПО

В задачи программного обеспечения входит множество параллельных процессов, таких как: контроль оборудования (т. е. постоянный опрос его состояния), проведение технологических операций, проведение вычислительных процедур, взаимодействие с оператором. Все эти задачи решаются путем построения программного обеспечения по многопоточной архитектуре, с использованием объектно ориентированного программирования. Схема программного обеспечения по решению вышеперечисленных задач представлена на рис. 2.

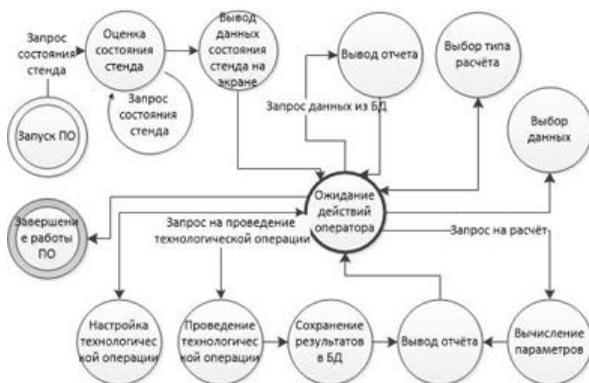


Рис. 2. Диаграмма состояния системы

Многопоточная архитектура [2] с использованием объектно-ориентированного программирования [5] позволяет осуществлять: постоянный контроль оборудования; проведение технологических операций параллельно

но контролю оборудования; сложные долгосрочные вычисления; работу по считыванию больших объемов данных, что не должно влиять на процесс контроля оборудования; работу с пользовательским интерфейсом; управление оборудованием; взаимодействие с хранилищем данных; настройку системы; автоматизацию технологических процессов.

### Модель данных сопровождения производственного процесса

Любая технологическая операция при изготовлении ТВГ содержит следующие объекты: изделие, технологический процесс, технологическая операция, программа, оператор, производственное оборудование [1, 3].

Гироскопическое устройство на основе ТВГ состоит из компонентов: корпус, ТВГ, плата управления и интерфейса, акселерометры [7, 8]. В свою очередь, ТВГ состоит из корпуса, резонатора, основания, электродов, геттерного насоса, блока буферных усилителей [17].

На каждом этапе формирования структуры гироскопического устройства увеличивается количество составляющих изделия со своими технологическими процессами и набором технологических операций. Например, для получения ТВГ изначально требуется сформировать резонатор нужной формы, далее провести напыление, балансировку, сборку, произвести герметизацию, установить и настроить электронные компоненты. При этом технологические операции выполняются операторами на разном производственном оборудовании с соответствующим программным обеспечением.

Для хранения всего этого набора информации требуется единое хранилище данных или база данных, содержащая таблицы.

#### Таблицы базы данных

Наименование таблицы	Назначение
<i>Ptproduct</i>	Предназначена для хранения информации о изделиях
<i>Type</i>	Несет информацию о типах изделий
<i>Link_Product</i>	Хранит информацию о компонентой составляющей изделия
<i>State_Product</i>	Хранит информацию о состоянии изделия
<i>States</i>	Все возможные состояния изделий
<i>Process</i>	Набор технологических процессов
<i>Instruction</i>	Набор операций, включающий в себя (Process, Operation)
<i>Operation</i>	Набор операций, проводимых в тех. процессе
<i>Oper_Product</i>	Набор операций, проводимых над изделием
<i>Programms</i>	Набор программных продуктов со своей историей
<i>Programm</i>	Набор ПО, используемого для тех. операций
<i>States_Programm</i>	Набор состояний конкретного ПО
<i>State_Programm</i>	Набор возможных состояний ПО

Окончание таблицы

Наименование таблицы	Назначение
<i>Users</i>	Пользователи системы
<i>Type_User</i>	Набор типов пользователей
<i>Stand</i>	Набор стенов
<i>Params_Stand</i>	Параметры конкретных стенов
<i>Param_Stand</i>	Набор всевозможных параметров стенов
<i>States_Stand</i>	Состояния конкретных стенов
<i>State_Stand</i>	Набор возможных состояний стенов
<i>Calc_Params</i>	Вычисленный параметр в результате проведенной технологической операции
<i>Calc_Param</i>	Набор вычисляемых параметров
<i>Formula</i>	Набор формул, с помощью которых были произведены расчеты
<i>FileData</i>	Файл исходных данных, полученный в процессе проведения технологической операции

Такой способ хранения информации позволяет в дальнейшем решать задачи выявления и устранения неблагоприятных факторов, влияющих на качество производимых изделий.

### Заключение

В статье рассмотрена предметная область производства ТВГ. Проанализированы возможные факторы, влияющие негативным образом на проведение технологических операций изготовления ТВГ. Предложен программный комплекс в виде моделей, представленный схемой «Взаимодействия объектов с ПО» и диаграммой «Состояние системы», также представлена модель данных сопровождения производства ТВГ. Программное обеспечение, построенное по данной модели, позволит производить исследования по выявлению факторов, требующих большого количества информации о проводимых технологических операциях и их режимах: на каком производственном оборудовании они проводились и в каких условиях. Программное обеспечение, которое позволяет осуществлять такого рода контроль, является хорошим инструментом для получения онтологической модели производства ТВГ, что в дальнейшем позволит получить наиболее качественную модель технологических процессов изготовления ТВГ.

Получив качественную модель, состоящую из технологических процессов изготовления ТВГ с учетом влияния негативных факторов, можно использовать при проектировании новой или оптимизации имеющейся технологии, при изменении ассортимента, когда необходимо эмпирически подбирать технологические параметры на промышленном

оборудовании. Это позволяет менять технологические режимы, минимизируя опытные дорогостоящие работы [5].

### Список литературы

1. Журавлев, В. Ф. ВТГ: современное состояние, некоторые аспекты / В. Ф. Журавлев // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. – 2011. – № 2 (33). – С. 118–123.
2. Калабин, А. Л. Программная система предпроектных исследований технологических процессов формирования химических волокон / А. Л. Калабин, А. В. Керницкий, Э. А. Пакшвер // Программные продукты и системы. – 2008. – № 1. – С. 16–19.
3. Лунин, Б. С. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : монография / Б. С. Лунин, В. А. Матвеев, М. А. Басараб. – Москва : Радиотехника, 2014. – 176 с.
4. Новое поколение ИНС на основе ВТГ / С. Негри, Э. Лабарр, К. Линьон, Э. Брунштейн, Э. Салаён // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24, № 1 (92). – С. 49–59. – DOI: [10.17285/0869-7035.2016.24.1.049-059](https://doi.org/10.17285/0869-7035.2016.24.1.049-059).
5. Тихомиров, В. А. Системный подход к интеграции информационных ресурсов в концепции математического моделирования / В. А. Тихомиров, И. А. Карпов, Е. В. Тихомирова // Программные продукты и системы. – 2008. – № 1. – С. 4–7.
6. Трутнев, Г. А. Модель ТВГ в медленных переменных / Г. А. Трутнев // Вестник Удмуртского университета. Математика. Компьютерные науки. – 2015. Т. 25, № 3. – С. 421–429.
7. Трутнев, Г. А. Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2020. – № 1 (130). – С. 20–63. – DOI: [10.18698/0236-3933-2020-1-50-63](https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-50-63).
8. Измерительно-вычислительный комплекс ТВГ / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков, А. В. Щеняцкий // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 62–72. – DOI: [10.22213/2410-9304-2017-3-62-72](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2017-3-62-72).
9. Beitia, J. Low cost CVG for high-grade north finders and targeting systems / J. Beitia, C. Fell, I. Okon, P. Sweeney // 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS) (16-17 Sept. 2014). Karlsruhe, Germany : IEEE, 2014. Pp. 1-15. DOI: [10.1109/InertialSensors.2014.7049408](https://doi.org/10.1109/InertialSensors.2014.7049408).
10. Chikovani, V. Self-compensation for disturbances in differential vibratory gyroscope for space navigation / V. Chikovani, O. Sushchenko // Hindawi. 2019. Article ID 5234061. Pp. 1–9. DOI: [10.1155/2019/5234061](https://doi.org/10.1155/2019/5234061).
11. Delhaye, F. HRG by SAFRAN: The game-changing technology // 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL) (26-29 Mar. 2018). Moltrasio, Italy : IEEE, 2018. Pp. 1–4. DOI: [10.1109/ISISS.2018.8358163](https://doi.org/10.1109/ISISS.2018.8358163).
12. Jeanroy, A. HRG by Sagem from laboratory to mass production / A. Jeanroy, G. Grosset, J.-C. Goudon, F. Delhaye // 2016 IEEE International Symposium on Iner-

tial Sensors and Systems (22-25 Feb. 2016). Laguna Beach, USA : IEEE, 2016. Pp. 1–4. DOI: [10.1109/ISISS.2016.7435530](https://doi.org/10.1109/ISISS.2016.7435530).

13. *El-Sheimy, N.* Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends / N. El-Sheimy, A. Youssef // *Satellite Navigation*. 2020. Vol. 1. No. 1. Article No. 2. DOI: [10.1186/s43020-019-0001-5](https://doi.org/10.1186/s43020-019-0001-5).

14. *Qiu, B., Wang, J., Li, P.* Full digital control of hemispherical resonator gyroscope under force-to-rebalance mode // *IEEE Sensors Journal*. 2015. Vol. 15. No. 1. Pp. 71–75. DOI: [10.1109/JSEN.2014.2339229](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2339229).

15. *Remillieux, G., Delhaye, F.* Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized // 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS) (16-17 Sept. 2014). Karlsruhe, Germany : IEEE, 2014. Pp. 1–13. DOI: [10.1109/InertialSensors.2014.7049409](https://doi.org/10.1109/InertialSensors.2014.7049409).

16. *Sedaghati, R.* Hemispherical vibratory gyroscope performance evaluation and sensitivity analysis with capacitive excitation / R. Sedaghati, M. Mahmoudian // *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI)*. 2019. Vol. 7. No. 1. Pp. 47-58. DOI: [10.22061/JECEI.2019.5565.239](https://doi.org/10.22061/JECEI.2019.5565.239).

17. *Rozelle, D.* The hemispherical resonator gyroscope: from wineglass to the planets // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2009. Vol. 134. Pp. 1157-1178. URL: [https://www.researchgate.net/publication/279909300\\_The\\_Hemispherical\\_Resonator\\_Gyro\\_From\\_Wineglass\\_to\\_the\\_Planets](https://www.researchgate.net/publication/279909300_The_Hemispherical_Resonator_Gyro_From_Wineglass_to_the_Planets)

*F. I. Spiridonov*, postgraduate student  
E-mail: [spiridonov.fedya@yandex.ru](mailto:spiridonov.fedya@yandex.ru)

*R. I. Mingazov*, postgraduate student  
E-mail: [ramisjkee@gmail.com](mailto:ramisjkee@gmail.com)

*K. V. Shishakov*, DSc in engineering, associate professor  
E-mail: [shishakovkv@mail.ru](mailto:shishakovkv@mail.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Development of a Software Package for Information Support of Production of Solid-State Wave Gyroscopes**

*This paper presents software that integrates the manufacturing processes of TVG into a single automated control system. The problems that arise during the automation of the TVG manufacturing process are considered. To obtain products and devices based on TVG with high accuracy and reliability characteristics, it is necessary to take into account a large number of factors that negatively affect the conduct of technological operations in the manufacturing process. A software package for identifying such factors is proposed. It is presented in the form of a software product diagram, a data model, and a data flow diagram.*

**Keywords:** solid-state wave gyroscope, automated control system, balancing, software, database.

УДК 621.391

*В. В. Титов*, магистрант

*И. А. Кайсина*, аспирант

*А. В. Абилов*, канд. техн. наук, доц., декан факультета

*М. А. Ламри*, аспирант

E-mail: kafsts@istu.ru

Кафедра «Сети связи и телекоммуникационные системы»

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Обзор методов улучшения доставки потоковых данных в беспроводных самоорганизующихся сетях**

*В статье рассматриваются различные технологии QoS и методы контроля нагрузки применительно к самоорганизующимся сетям. Подробно описаны механизмы устранения и предотвращения перегрузки. Анализируется реализация контроля нагрузки в протоколе TCP.*

**Ключевые слова:** самоорганизующиеся сети, передача данных, QoS, контроль нагрузки.

### **Контроль нагрузки и QoS**

Контроль перегрузки и качество обслуживания – это две проблемы, настолько тесно связанные между собой, что улучшение одного означает улучшение другого, а игнорирование одного обычно означает игнорирование другого. Большинство методов предотвращения или устранения перегрузок также улучшают качество обслуживания в сети. Важной проблемой в сети с коммутацией пакетов является перегрузка [5]. Перегрузка в сети может возникнуть, если нагрузка на сеть, т. е. количество пакетов, отправленных в сеть, больше, чем емкость сети, определяющей количество пакетов, которое может обработать сеть. Контроль перегрузки относится к механизмам и методам контроля нагрузки и ее удержания ниже пропускной способности.

Контроль перегрузки может либо предотвратить переполнение до того, как оно произойдет, либо устранить перегрузку после того, как она произошла. В общем случае можно разделить механизмы управления перегрузками на две широкие категории: контроль перегрузки по разомкнутому контуру (предотвращение) и контроль перегрузки по замкнутому контуру (устранение), как показано на рис. 1.

К механизмам предотвращения (Open-loop) относятся политики, предотвращающие перегрузку до ее возникновения. В этих механизмах

управление перегрузкой осуществляется либо источником, либо получателем [8]:

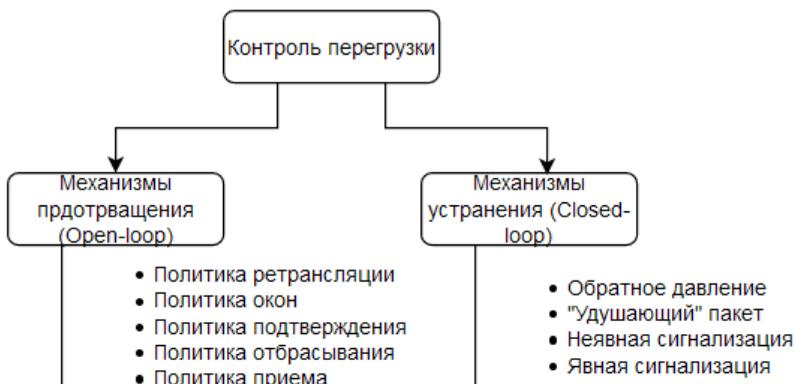


Рис. 1. Механизмы управления перегрузками

- Политика ретрансляции – оптимизация таймеров ретрансляции повышает эффективность и в то же время предотвращает перегрузку.
- Политика окон – выбор корректного размера окна у отправителя.
- Политика подтверждения – если получатель не подтверждает каждый пакет, который он получает, это может замедлить отправителя и помочь предотвратить перегрузку.
- Политика отбрасывания – отбрасывание незначительных пакетов не повредит целостности передачи.
- Политика приема – коммутаторы в потоке трафика сначала проверяют потребность потока в ресурсах, прежде чем пустить его в сеть. Маршрутизатор может отказать в установлении соединения, если в сети существует перегрузка или существует возможность будущей перегрузки.

Механизмы устранения (Closed-loop) пытаются облегчить перегрузку после того, как она произошла.

- Протодавление – перегруженный узел перестает получать данные от непосредственного вышестоящего узла или узлов. Это может привести к тому, что вышестоящий узел или узлы будут перегружены и они, в свою очередь, отклонят данные от своих вышестоящих узлов или узла.
- Обратное давление – начинается с узла и распространяется в противоположном идущим данным направлении, к источнику.

- «Удушающий» пакет – это пакет, отправленный узлом источнику, чтобы сообщить ему о перегрузке.
- Неявная сигнализация – источник предполагает, что где-то в сети существует перегрузка по иным причинам.
- Явная сигнализация – узел, который испытывает перегрузку, может явно послать сигнал источнику.

### Реализация контроля нагрузки

При обычной передаче данных размер окна определяется получателем и непосредственно сетью. Когда в сети возникает перегрузка, она будет оказывать влияние на размер окна получателя. У отправителя есть следующая информация: предполагаемый размер окна получателя и пороговый размер окна перегрузки. Можно сказать, что размер окна является минимальным из этих двух. Рассмотрим несколько примеров реализации контроля нагрузки.

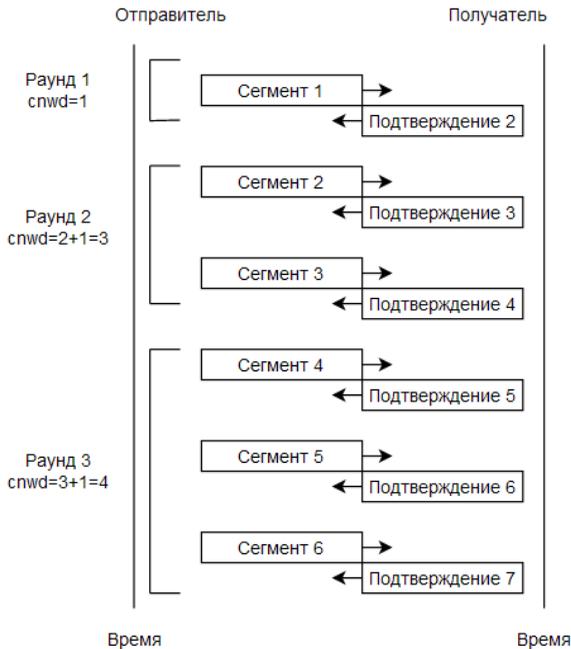


Рис. 2. Механизм предотвращения перегрузки

Для предотвращения перегрузки применяется аддитивное увеличение. Если мы начнем с алгоритма медленного запуска, размер окна перегрузки увеличивается экспоненциально. Чтобы избежать заторов до того, как это произойдет, нужно замедлить этот экспоненциальный рост. ТСР располагает еще одним алгоритмом, называемым избеганием перегрузки, который подвергается аддитивному увеличению вместо экспоненциального. Когда размер окна перегрузки достигает порога медленного запуска, фаза медленного запуска останавливается и начинается аддитивная фаза. В этом алгоритме каждый раз, когда доставляются все сегменты, помещаемые в окно (первый раунд), размер окна перегрузки увеличивается на единицу. Чтобы продемонстрировать это, применим данный алгоритм к тому же сценарию, что и медленный запуск. Хотя алгоритм предотвращения перегрузки обычно запускается, когда размер окна намного больше единицы. На рис. 2 показана эта идея.

В этом случае после получения отправителем подтверждений для всего окна сегментов размер окна увеличивается на один сегмент. Если смотреть на размер  $cnwnd$  со стороны раундов (round), в ходе которых происходит изменение размера окна, то обнаружим, что скорость аддитивна, как показано на рис. 3.

Начало	⇒	$cnwnd=1$
После первого раунда	⇒	$cnwnd=1+1=2$
После второго раунда	⇒	$cnwnd=2+1=3$
После третьего раунда	⇒	$cnwnd=3+1=4$

Рис. 3. Аддитивное увеличение размера окна

При использовании алгоритма предотвращения перегрузки размер окна увеличивается аддитивно до момента обнаружения этой перегрузки.

Для обнаружения перегрузки используется мультипликативное уменьшение. При возникновении перегрузки пороговое значение размера окна должно быть уменьшено. Существует лишь один способ, благодаря которому отправитель может понять, что произошла перегрузка, – это необходимость повторной передачи сегмента. Однако повторная передача может происходить в одном из двух случаев: когда таймер истекает или когда получено три АСК. В обоих случаях размер порога снижается наполовину, что является мультипликативным уменьшением.

Большинство реализаций ТСР имеют две реакции [7]:

а) если происходит тайм-аут, существует более высокая вероятность перегрузки; сегмент, вероятно, был отброшен в сеть и нет никаких новостей об отправленных сегментах. В этом случае TCP реагирует сильно:

- устанавливает значение порога в половину текущего размера окна;
- устанавливает  $swnd$  на размер одного сегмента;
- снова начинает фазу медленного запуска;

б) если получено три АСК, существует более слабая вероятность перегруженности; сегмент может быть отброшен, но некоторые сегменты после этого могут благополучно прибыть, т. к. получены три АСК. Это называется быстрой передачей и быстрым восстановлением. В этом случае TCP имеет более слабую реакцию:

- устанавливается значение порога равное половине текущего размера окна;
- устанавливается  $swnd$ , равное значению порога (в некоторых реализациях к порогу прибавляется три размера сегментов);
- начинается фаза предотвращения перегрузки.

Пример на рис. 4.



Рис. 4. Реакции протокола TCP на обнаружение перегрузки

Исходя из предположения, что максимальный размер окна 32 сегмента, устанавливается пороговое значение, равное 16 сегментам, т. е. половина максимального размера. В течение фазы медленного запуска размер окна начинает расти с единицы экспоненциально до достижения порогового значения. После этого процедура аддитивного увеличения позволяет размеру окна линейно расти, пока не наступит тайм-аут или не упрется в ограничение максимального размера окна. На рис. 4 тайм-аут наступает при размере окна, равном 20. В этот момент процедура

мультипликативного уменьшения берет на себя инициативу и уменьшает порог до значения, равного половине предыдущего размера окна. Поскольку последний зафиксированный размер окна был 20, новый порог будет равен 10. TCP вновь начинает процесс медленного запуска с размером окна 1. Далее, когда размер окна достигает значения 12, происходит событие three-ACKs. Процедура мультипликативного уменьшения повторяется снова. Пороговое значение устанавливается равным 6, и на этот раз TCP переходит в фазу аддитивного увеличения. Он остается в этой фазе до тех пор, пока не произойдет еще один тайм-аут или еще три ACK.

### **Применение контроля нагрузки в самоорганизующихся сетях**

В самоорганизующихся сетях существуют следующие особенности [4]:

- частая смена топологии и маршрутов передачи данных;
- некоторые пакеты, которые мы отправляем, неизбежно теряются по пути;
- случайная перестановка пакетов местами;
- большие и нестабильные значения задержки.

Учитывая вышеперечисленные особенности, TCP зачастую оказывается не эффективен в таких сетях. Стандартные механизмы борьбы с перегрузками в TCP не учитывают случайный характер потерь и нестабильные характеристики канала. Как правило, при возникновении любых потерь механизм борьбы с перегрузкой резко снижает скорость передачи, вследствие чего полоса пропускания расходуется не эффективно.

На момент написания статьи предложены следующие варианты развития механизма управления перегрузками в TCP [2]:

- управление перегрузкой на канальном или сетевом уровне. Пропускная способность TCP улучшается за счет улучшения взаимодействия с канальным уровнем IEEE 802.11. Скрытые терминальные эффекты, вызванные помехами, могут влиять на производительность TCP и устраняться путем ограничения максимального размера окна отправки. Фреймворк Atra [3] состоит из трех механизмов на канальном и сетевом уровнях для улучшения производительности TCP в сетях MANET. Atra [3] повышает пропускную способность стека протоколов по умолчанию на 50–100 %;
- load-balanced – адаптивная маршрутизация в зависимости от перегрузки. В такой маршрутизации для определения состояния перегрузки и самого слабого узла маршрута используются две метрики (плотность трафика и время жизни, связанные с маршрутом). Маршрут с низкой

плотностью трафика и максимальным временем жизни выбирается для передачи пакетов;

– управление перегрузкой в протоколе мультиточечной маршрутизации может обеспечить балансировку нагрузки и улучшить качество обслуживания за счет обнаружения нескольких путей и поддержания этих путей. Механизм управления перегрузкой в MLBCC (методика распределения нагрузки по мультиточечному каналу для контроля перегрузки) [1] обнаруживает перегрузку в узле-кандидате, используя входящую и исходящую скорости. Методика распределения нагрузки [1] также распределяет трафик по нескольким путям с использованием узлов шлюзов, которые выбираются с использованием стоимости пути и стоимости канала.

### **Заключение**

В статье проведен обзор методов улучшения доставки данных в самоорганизующихся сетях. Подробно рассмотрен контроль нагрузки как часть качества обслуживания QoS и механизмы с политиками устранения и предотвращения перегрузки. Также проанализирована реализация контроля нагрузки в протоколе TCP. Это позволит в дальнейшем существенно повысить качество передачи данных и снизить количество ошибок в ad-hoc-сетях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06076).*

### **Список литературы**

1. Mallapur, S. V., Patil, S. R., Agarkhed, J. V. Load balancing technique for congestion control multipath routing protocol in MANETs // *Wireless Personal Communications*. 2017. Vol. 92. No. 2. Pp. 749-770.
2. Kanellopoulos, D. Congestion control for MANETs: An overview // *ICT Express*. 2019. Vol. 5. No. 2. Pp. 77-83.
3. Anantharaman, V. TCP performance over mobile ad hoc networks: a quantitative study / V. Anantharaman, S. J. Park, K. Sundaresan, R. Sivakumar // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2004. Vol. 4. No. 2. Pp. 203-222.
4. Кучерявый, А. Е. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек // *Электросвязь*. – 2015. – № 7. – С. 9–11.
5. Кучерявый, А. Е. Летающие сенсорные сети – новое приложение интернета вещей / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция : сб. науч. ст. в 2 т. – 2015. – С. 17–22.*

6. *Meitis, D., Vasiliev, D., Abilov, A.* Simulation of MANETs routing protocols for UAVs // Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum “Education Quality – 2014”: Conf. proceedings (April 23, 2014). Izhevsk, Russia : Publ. House of Kalashnikov ISTU, 2014. Pp. 358–363.

7. *Pleisch, S.* MISTRAL: efficient flooding in mobile ad-hoc networks / S. Pleisch, M. Balakrishnan, K. Birman, R. Renesse // MobiHoc '06: Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing. Florence, Italy : Association for Computing Machinery, 2006. Pp. 1–12. DOI: 10.1145/1132905.1132907.

8. *Forouzan, A.* Data communications and networking. McGraw-Hill Higher Education, 2006. 1171 p.

*V. V. Titov*, master student

*I. A. Kaisina*, postgraduate student

*A. V. Abilov*, CSc in engineering, associate professor

*M. A. Lamri*, postgraduate student

E-mail: kafsts@istu.ru

Department of Communication Networks and Telecommunication Systems  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Overview of Methods to Improve Delivery of Streaming Data in Wireless Ad-hoc Networks**

*The article discusses various QoS technologies and load control methods applied to self-organizing networks. Mechanisms for eliminating and preventing overloading are described in detail. The implementation of load monitoring in the TCP protocol is also analyzed.*

**Keywords:** self-organizing networks, data transmission, QoS, load monitoring.

УДК 621.372, 621.3.09

*С. Р. Комраз*, инженер

*В. В. Мирошников*, д-р техн. наук, проф., проректор

*Т. В. Победа*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: [pobeda-tatyana@rambler.ru](mailto:pobeda-tatyana@rambler.ru)

Луганский государственный университет им. Владимира Даля, г. Луганск, ЛНР

## **Способ дистанционного обнаружения и идентификации потенциально опасных веществ**

*Рассмотрен способ идентификации веществ, в том числе представляющих опасность для окружающей среды и здоровья человека. Предложена система идентификации, которая реализует заявленный способ. Опасные вещества выявляются по разнице температуры и времени ее изменения в соответствии с поглощенной частью электромагнитного излучения.*

**Ключевые слова:** идентификация, опасность, электромагнитное поле, коэффициент диэлектрических потерь, диапазон частот, длина волны.

### **Введение**

Об актуальности мероприятий по выявлению скрытых угроз свидетельствует Указ Президента РФ от 15 февраля 2006 г. № 116 «О мерах по противодействию терроризма». Рост техногенных угроз в мире заставляет искать новые способы выявления устройств и веществ, которые могут представлять опасность для окружающей среды и здоровья человека. Заблаговременность выявления – необходимое условие предупреждения экстренных мероприятий для уменьшения опасности и предотвращения человеческих жертв. Необходимым условием является скрытность проводимых мероприятий.

Большинство современных систем для обнаружения присутствия опасных предметов основаны на взаимодействии электромагнитного поля с веществом. Такие системы требуют, чтобы представляющие опасность лица или предметы, проверялись в специально оборудованных точках [1]. Как правило, при проносе металлических объектов через эту точку подается предупреждающий сигнал, указывающий изменение в магнитном потоке. Этот тип системы просто обнаруживает металлические объекты без определения количества присутствующего металла. Ключи, драгоценности, часы и очки с металлической оправой могут заставить срабатывать такую систему. В то же время основной задачей является заблаговременное выявление носителя представляющих опас-

ность веществ и недопущение его в места скопления людей. Существуют системы распознавания таких веществ, которые требуют создания особых условий для эталонных образцов, одинаковых с анализируемым объектом. Такие устройства отличаются технически сложной реализацией [2, 3].

Главным недостатком является отсутствие мобильности современных систем, когда нужно выявлять опасные вещества и предметы в местах массового скопления людей или закрытых помещениях [4].

### Постановка задачи

В связи с вышеизложенным предложен способ, который заключается в том, что при облучении направленным электромагнитным полем определенной длины волны происходит поглощение его искомым веществом и преобразование поглощенной энергии в тепло. По теплу, как реакции на поглощение, можно идентифицировать вещества, представляющие угрозу для человека и окружающей среды.

Целью исследований является получение спектра поглощения веществ спецхимии в диапазоне от 25 МГц до 300 ГГц и вычисление коэффициентов трансформации поглощенной ЭМ-энергии в тепловую.

### Описание эксперимента

Известно, что межмолекулярные силы взаимодействия теоретическими расчетами не определяются и требуют исключительно экспериментальных исследований, в ходе которых заявленная полоса частот (25 МГц – 300 ГГц) разбивалась на два поддиапазона.

В диапазоне частот ниже 300 МГц экспериментальные исследования проводились конденсаторным методом в соответствии с ГОСТ 22372–77. Исследуемому веществу придавали форму круглого цилиндра высотой 3–5 мм и диаметром 30 мм и помещали между обкладками конденсатора. Одной из обкладок был микрометрический винт, необходимый для точного вычисления расстояния между обкладками. Такую конструкцию подключали к измерительной схеме (рис. 1).

Величина диэлектрических потерь  $W_e$  в диэлектрике, находящемся между обкладками конденсатора, определяется соотношением (1):

$$W_e = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение на обкладках конденсатора;  $C$  – емкость конденсатора;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $\omega$  – круговая частота.

Диэлектрические потери в  $1 \text{ см}^3$  диэлектрика в однородном поле  $E$  равны (2):

$$W_{\epsilon} = E^2 \omega \cdot \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость.

Произведение  $\epsilon \operatorname{tg} \delta$  называется коэффициентом диэлектрических потерь.



Рис. 1. Экспериментальная установка, реализующая конденсаторный метод

В области выше 300 МГц измерения проводились с использованием волноводов (рис. 2). Руководствуясь описанными в ГОСТ 27496.2–87 методами определения диэлектрических свойств на частотах свыше 300 МГц, исследуемое вещество помещалось либо непосредственно в волновод, либо в резонансную камеру. В первом случае изготавливался параллелепипед с основанием, точно соответствующим сечению волновода, и толщиной 3–5 мм и помещался в сечение волновода. Во втором случае формировался диск толщиной 3–5 мм и диаметром 30 мм, который размещался в разрыве волноводного канала.

Процедура выявления потенциально опасных веществ заключается в следующем. При облучении шумовым радаром формируется спектр, перекрывающий линии поглощения веществ, представляющих опасность. Часть излучения отражается и анализируется как при традиционной радиолокации. Часть излучения проходит без потерь, а еще часть поглощается потенциально опасным веществом и телом ее носителя. Поглощение фиксируется тепловизионным блоком. По разнице в росте температуры и времени «реакции» можно определить тип вещества. Кроме того, учитывается наличие полупроводниковых элементов как составляющих устройства, содержащие потенциально опасные веществ-

ва. К тому же тепловая картинка, изменяясь, показывает контур устройства или других скрытых под одеждой предметов.



Рис. 2. Установка для измерения  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$  на частотах выше 300 МГц

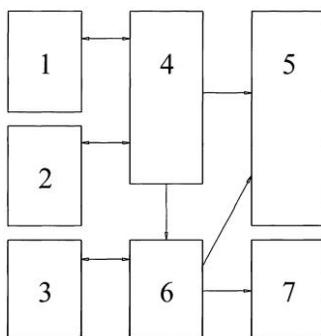


Рис. 3. Структурная схема системы дистанционной идентификации потенциально опасных веществ и предметов:

- 1 – видеоблок; 2 – тепловизионный блок; 3 – радиоблок; 4 – оптический блок;
- 5 – устройство визуализации; 6 – блок обработки и приема-передачи данных;
- 7 – блок управления

Измерения проводились по расчетам коэффициента стоячей волны и в сравнении ее с коэффициентом стоячей волны в воздухе. Этот метод, как и конденсаторный, основан на измерении добротности.

Для реализации предложенного способа разработана система дистанционной идентификации потенциально опасных веществ и предметов (рис. 3) [5].

Полученные от видеоблока и тепловизионного блока изображения передаются в оптический блок, в котором происходит сравнение изображений в установленном временном и пространственном режимах. Отображение видимой и тепловой картин отображается на дисплее оператора.

При обнаружении роста температуры выше установленного предела вследствие воздействия активирующего излучения шумового радара радиоблок блок обработки и приема-передачи данных подает сигнал оператору на дисплей с выделением зоны роста температуры. Одновременно с этим блок обработки и приема-передачи данных выдает сигналы на блок управления и оптический блок для перевода оптической оси системы в выбранном направлении и перестройки системы для идентификации потенциально опасных средств и его носителя. В этом режиме меняется режим приема-передачи данных, включается запись теплового и видеоканалов с одновременным архивированием на сменные носители и передачей на удаленный сервер.

Выявленное изменение теплового контраста фиксируется по времени в соответствии с режимом работы радара радиоблока, на основании чего производится сравнение полученных данных с базой спектров поглощения известных веществ и собираются дополнительные сведения о наличии конструктивных элементов устройств, содержащих опасные вещества. В случае обнаружения у объекта признаков наличия такого устройства он выделяется красным маркером на дисплее.

### **Результаты и их обсуждение**

На рис. 4 и 5 представлены полученные экспериментальным путем результаты измерений  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  для тринитротолуола [5, 6].

Полученные результаты проверялись при дистанционном воздействии ЭМ-полей в области резонансов. Проверке экспериментальных данных был выбран пик значения  $\epsilon$  с частотой 158,11 МГц.

Для проведения работ была задействована автоматизированная испытательная система, функционирующая под управлением специализированного программного обеспечения (ПО) R&S®EMC32 разработки фирмы Rohde & Schwarz.

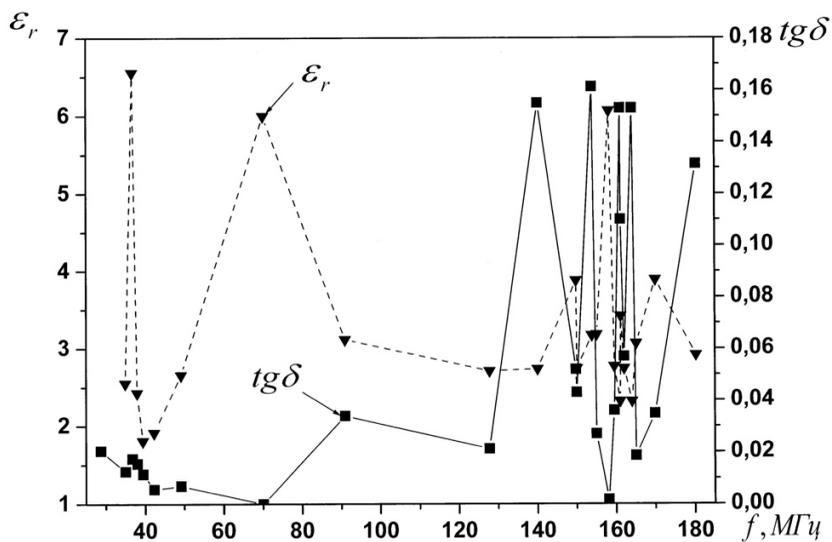


Рис. 4. Результаты измерений  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  для тринитротолуола

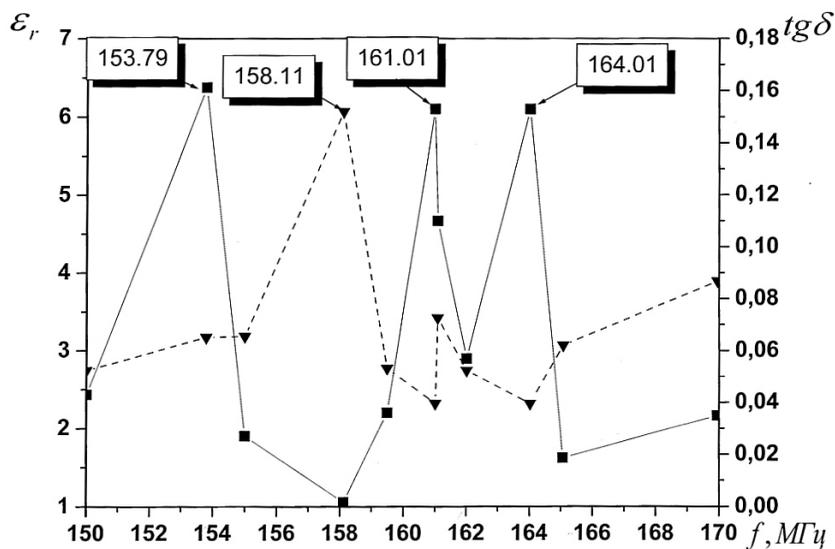


Рис. 5. Результаты измерений  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  для тринитротолуола в выделенной части низкочастотного спектра

Данные исследования проводились в рамках проекта по созданию системы дистанционного обнаружения и идентификации веществ спецхимии. Были проведены теоретические расчеты, создана модель внутримолекулярных колебаний, произведены расчеты рамановского рассеяния.

### **Выводы**

На основании проведенных экспериментов было выявлено:

- 1) Полное соответствие результатов, проведенных конденсаторным методом и методом бесконтактного (дистанционного) воздействия.
- 2) Экспериментально подтверждена независимость расположения испытываемых образцов относительно электрического и магнитного векторов переменного ЭМ-поля.
- 3) Подтвержден факт поглощения переменного ЭМ-поля и преобразование его энергии в тепло.
- 4) Разработана методика эксперимента «Установление факта избирательного поглощения электромагнитного излучения заданной частоты испытуемыми образцами вещества, закрепленными на теле человека».

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность идентификации веществ за счет поглощения на резонансных частотах энергии переменного ЭМ-поля и трансформации ее в тепло, что дает возможность обнаружения скрытых предметов и веществ, представляющих опасность для человека и окружающей среды.

*Представленные исследования были выполнены при поддержке ООО «СОФКОМ», г. Москва, генеральный директор Алексей Викторович Маринчак.*

### **Список литературы**

1. *Кихтенко, А. В.* Обнаружение взрывоопасных объектов: аппаратное обеспечение антитеррористических служб / А. В. Кихтенко, К. В. Елисеев // Российский химический журнал. – 2005. – Т. 29, № 4. – С. 132–137.
2. *Грузнов, В. М.* Развитие в России методов обнаружения взрывчатых веществ / В. М. Грузнов, М. Н. Балдин, А. Л. Макасы, Б. Г. Титов // Журнал аналитической химии. – 2011. – Т. 66, № 11. – С. 1236–1246.
3. *Айрапетян, В. С.* Методы обнаружения взрывчатых веществ / В. С. Айрапетян, М. С. Бакуменко, С. Г. Губин // Интерэкспо-ГеоСибирь. – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 170–177.
4. *Ковалев, А. А.* Технические средства антитеррористической и криминалистической диагностики: учеб. пособие / А. А. Ковалев, А. В. Ковалев; под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Спектр, 2011. – 206 с.

5. Пат. 2489706 РФ, МПК С1 G01N 22/00. Способ обнаружения диверсионно-террористических средств и система для его реализации / С. Р. Комраз, А. В. Маринчак, В. И. Стеценко, С. Н. Лешок. – Оpubл. 10.08.2013, Бюл. № 22.

6. *Комраз, С. Р.* Способ обнаружения диверсионно-террористических средств / С. Р. Комраз, В. В. Мирошников, Т. В. Победа // Современные информационные, приборные и электротехнические комплексы: сб. тез. докл. 8-й Междунар. науч.-практ. конф. (Луганск, 22–23 апр. 2020 г.). – Луганск : Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2020. – С. 80–83.

*S. R. Komraz*, engineer

*V. V. Miroshnikov*, DSc in engineering, senior researcher

*T. V. Pobeda*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: [pobeda-tatyana@rambler.ru](mailto:pobeda-tatyana@rambler.ru)

Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, LPR

## **Detection and Identification of Potentially Hazardous Agents Method**

*Propose the method for identifying substances, including those posing a danger to the environment and human health, is considered. An identification system is proposed that implements the claimed method. Hazardous substances are identified by the temperature difference and the time of its change in accordance with the absorbed part of the electromagnetic radiation.*

**Keywords:** identification, danger, electromagnetic field, dielectric loss coefficient, frequency range, wavelength.

## Секция 4. Физико-математические методы в приборостроении

УДК 510.51+004.42

*А. А. Айзикович*, канд. физ.-мат. наук, доц.

*В. М. Коровин*, студент

E-mail: [pmi@istu.ru](mailto:pmi@istu.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Программная реализация машины с неограниченными регистрами**

*Дан краткий обзор существующих подходов к определению понятия «алгоритм» – одного из ключевых понятий современной математики. Приводятся начальные сведения об абстрактной машине с неограниченными регистрами, представляющей инструмент одной из точных концепций современной теории алгоритмов, и дано описание эмулятора, выполненного на языке программирования высокого уровня, реализующего эту машину как конечный автомат. Разработанный эмулятор может быть использован в учебном процессе в качестве демонстрационной программы.*

**Ключевые слова:** теория алгоритмов, машина с неограниченными регистрами, эмулятор.

#### **Введение**

Понятие алгоритма, подобно понятиям множества и натурального числа, принадлежит к числу понятий столь фундаментальных, что оно не может быть выражено через другие (в частности, теоретико-множественные), а должно рассматриваться как неопределяемое. Лишь как пояснения, а не как определения следует расценивать формулировки типа «Алгоритм – это точное предписание, которое задает вычислительный процесс (в широком смысле слова), называемый в этом случае алгоритмическим, начинающийся с произвольного исходного данного, из некоторой совокупности возможных для данного алгоритма исходных данных, и направленный на получение полностью определяемого этим исходным данным результата» [1, 2]. Приведем другие словесные описания алгоритма. Алгоритм по Колмогорову [3] – это всякая система

вычислений, выполняемых по строго определенным правилам, которая после какого-либо числа шагов заведомо приводит к решению поставленной задачи. Алгоритм по Маркову [3, 4] – это точное предписание, определяющее вычислительный процесс, идущий от варьируемых исходных данных к искомому результату.

Формирование теории алгоритмов как самостоятельного раздела математики, изучающего общие свойства алгоритмов, началось в 30-е годы XX века. Математиками предпринимались попытки построить теорию алгоритмов с ответом на вопрос, что считать алгоритмом. К настоящему времени сложилось несколько направлений в теории алгоритмов: 1) рекурсивные функции [5–14]; 2) системы Поста [6]; 3) нормальные алгорифмы Маркова [5, 6, 10]; 4) абстрактные машины [14], машина Тьюринга (и ее модификации) [2, 5–8, 10, 11, 13, 15], машина Поста [16], машина Колмогорова [2, 17], машина Шёнхаге [2, 17], регистровые машины Минского [18], стековые регистровые машины [9, 19], машина с неограниченными регистрами (Шепердсона и Стерджиса) [6, 7, 10]. Каждое из конкретизаций сужает понятие алгоритма, однако поразительным является тот факт, что все теории эквивалентны: функция, вычислимая по одной теории, является вычислимой и по другой.

Вне рамок строгих теорий вводятся неформальные (интуитивные) понятия, опирающиеся на свойства, присущие алгоритмам – эффективным процедурам. Это дискретность, детерминированность, элементарность, результативность (направленность), массовость [7, 10, 13, 20]. Однако Роджерс в [12] отмечает несколько иные признаки алгоритма: набор инструкций, наличие вычислителя, наличие возможности для выделения, запоминания и повторения шагов вычисления, дискретность, детерминированность, а Кнут [21] – конечность, определенность, ввод, вывод, эффективность. Кроме того, Колмогоровым [1] выделены семь характеризующих алгоритм параметров: 1) совокупность возможных исходных данных, 2) совокупность возможных результатов, 3) совокупность возможных промежуточных результатов, 4) правило начала, 5) правило непосредственной переработки, 6) правило окончания, 7) правило извлечения результата.

Что касается программирования, то, как правило, вопрос определения алгоритма здесь не обсуждается, а интерпретируется как эквивалент программы для ЭВМ. Например, в работах [22, 23], содержащих в своих названиях слово «алгоритм», вообще не упоминается, что это такое, или упоминается вскользь. С точки зрения современной практики алгоритм – это программа, а критерием алгоритмичности процесса является возможность его запрограммировать, или алгоритм – это набор команд, необходимый для решения той или иной задачи [24]. Именно благодаря

этой реальности алгоритма, а также потому, что подход инженера к математическим методам всегда был конструктивным, понятие алгоритма в технике за короткий срок стало необычайно популярным (быть может, даже больше, чем в самой математике) [10].

В связи с информатизацией (и цифровизацией) общества в программу подготовки специалистов по компьютерным направлениям стали включать такие дисциплины, как «Теория алгоритмов» и «Теоретические основы информатики». При этом встает вопрос: как излагать учебный материал [6, 7, 9, 10, 13, 25, 26]? Одним из таких подходов является изложение материала с использованием абстрактной машины с неограниченными регистрами (МНР), что гораздо нагляднее машины Тьюринга (учитывая «близость» МНР к реальным компьютерам) и проще, чем математическая теория рекурсивных функций. Кроме того, на этой машине автоматически реализуются все семь характерных признаков алгоритма.

В статье описывается эмулятор МНР, созданный с использованием универсального языка программирования высокого уровня. Разработанная программа позволяет демонстрировать работу МНР со всеми возможностями машины: ввод и вывод данных, получение промежуточных результатов, линейные алгоритмы, ветвление, циклы, подключение подпрограмм, реализация рекурсивных вычислений и имитация аварийного останова.

### **Машина с неограниченными регистрами**

МНР содержит счетное число регистров, занумерованных натуральными числами  $R_1, R_2, \dots, R_n, \dots$ . В каждый регистр может быть записано любое неотрицательное целое число. Машина обрабатывает по заданной программе конечную последовательность заданных чисел и выдает единственное значение. Таким образом, МНР работает с конструктивными объектами, которые можно поименовать натуральными числами.

Начальные данные (начальная конфигурация  $C_0$  из  $n$  чисел) содержатся в  $n$  первых регистрах машины, остальные регистры содержат нули. Результат считывается в первом регистре  $R_1$  после завершения программы.

Программа машины задается конечной последовательностью  $I_1, I_2, \dots, I_s$  из четырех возможных команд  $I_k$ : арифметических команд обнуления, добавления единицы и пересылки, а также команды управления – условного перехода, которая может выполнять и функцию безусловного перехода.

Работа программы начинается с первой команды, далее управление передается следующей команде, если предыдущая выполненная коман-

да была арифметической, иначе – по предписанию команды управления. Процесс заканчивается, если номер вызываемой команды отсутствует в программе. В МНР не предусмотрен «аварийный останов» (например, при делении нечетного числа на два); его роль выполняет заикливание.

### Команды МНР

Опишем команды МНР:

- команда  $Z(n)$  – в регистр  $R_n$  записывается 0, остальные регистры не изменяются;
- команда добавления единицы  $S(n)$  – к содержимому регистра  $R_n$  прибавляется 1, остальные регистры не изменяются;
- команда пересылки  $T(m, n)$  – в регистр  $R_n$  записывается содержимое регистра  $R_m$ , остальные регистры не изменяются;
- команда условного перехода  $J(m, n, q)$  – управление передается команде с номером  $q$ , если содержимое регистров  $R_m$  и  $R_n$  совпадают, иначе – к следующей команде. При выполнении этой команды все регистры не изменяются. В случае  $J(m, n, q)$  имеем команду безусловного перехода к команде  $I_q$ .

После выполнения текущей команды изменяется (или нет) текущая конфигурация. После завершения работы программы машина находится в заключительной конфигурации  $C_z$ , а первый регистр  $R_1$ , как отмечалось, содержит результат вычисления.

В качестве примера программы МНР приведем программу вычисления функции знака неотрицательного целого числа:

$$\text{sign}(x) = 0, \text{ если } x = 0; \text{ sign}(x) = 1, \text{ если } x \neq 0.$$

Пусть начальная конфигурация  $C_0 = (x, 0, 0, \dots)$ . Имеем:

$$I_1 \quad J(1, 2, 4) \quad \#x = 0?$$

$$I_2 \quad Z(1)$$

$$I_3 \quad S(1)$$

Здесь заключительной конфигурацией является  $C_z = (0, 0, 0, \dots)$  при  $x = 0$  или  $C_z = (0, 0, 0, \dots)$  при  $x \neq 0$ .

### Работа машины

Перейдем к некоторой конкретике программной реализации МНР. В эмуляторе МНР введен особый регистр – счетчик адресов команд (САК), а также команда останова Stop.

Работа на МНР состоит из следующих этапов:

1) в регистры памяти данных вводятся числа, т. е. задается начальная конфигурация;

2) вводятся команды в ячейки программной памяти;

3) записывается в САК единица, запускается МНР, и она начинает работать, выполняя команды программы, пока не встретит команду Stop.

При этом выполнение каждой команды МНР состоит из четырех этапов:

1) считывается адрес из САК;

2) считывается команда из памяти по этому адресу;

3) САК увеличивается на единицу в случае, если команда арифметическая или команда не осуществляет условный переход, иначе – изменяется содержимое САК;

4) выполняется прочитанная команда.

МНР выполняет каждую команду программы до команды Stop. Далее считается результат в регистре  $R_1$ .

### **Выбор технологии для реализации МНР**

Опираясь на постановку задачи, сделан вывод, что наилучшим способом реализации данной программы будет разработка GUI приложения. Данный способ является наилучшим, поскольку:

1) графический интерфейс более дружелюбный и приятный для глаз,

2) обеспечивает легкий доступ к функциям системы и приложений,

3) может легко использоваться начинающими пользователями.

Отталкиваясь от основных требований задачи, среди которых графическая визуализация и объектная ориентированность, было принято решение остановиться на языке программирования C++. Выбор среды разработки осуществлялся на основе выбранного языка – это среда разработки C++ Builder.

Отметим, наконец, что хотя МНР и является «идеализированным компьютером» с отсутствием ограничений по размеру памяти и величине чисел, поступающих на вход, программа реализует конечный автомат – математическую модель с конечной памятью, число регистров которой не будет превышать 20, а значение каждого – 4 294 967 295.

### **Подпрограммы и рекурсивные вычисления**

В обсуждаемом проекте реализованы подключение подпрограмм и рекурсивные вычисления. Подпрограммы выполняются с сохранением значений регистров основной программы, и обеспечивается возврат в основную программу на нужную команду.

Для вызова подпрограмм была введена команда Call. Данная команда принимает единственный операнд – номер вызываемой команды. При выполнении команды Call осуществляется добавление номера следующей команды в стек адресов возврата, а номеру следующей команды присваивается значение из первого операнда.

Одна из необходимых особенностей теории алгоритмов – это обеспечение механизма вычисления рекурсивных функций. Описанная реализация команды Call с использованием стека адресов возврата позволяет создавать рекурсивные программы и программы со сложной схемой вызовов подпрограмм. При каждом вызове подпрограммы в стек добавляется адрес возврата (т.е. адрес команды, следующей за командой Call). При завершении подпрограммы из стека извлекается адрес следующей команды. Подобная схема использования стека при вызове подпрограмм используется во многих реальных процессорах, включая процессоры Intel и AMD архитектуры x86, используемые в персональных компьютерах.

### **Получение начальной конфигурации**

Файл с исходным кодом указывается пользователем с помощью диалогового окна выбора файла при нажатии на кнопку «Открыть файл». При этом очищается массив исходных значений регистров, производится загрузка исходного кода в память и его парсинг, после чего массиву текущих регистров присваиваются значения исходных регистров, очищается стек.

Парсинг представляет собой обработку строк исходного кода, игнорирующую: пустые строки, пробелы и табуляции в начале и в конце строк, а также между элементами команды; комментарии, начинающиеся с символа «#» и заканчивающиеся в конце строки. Первая значимая строка загружаемого файла может содержать разделенные пробелами целые неотрицательные числовые значения регистров  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и т. д. Если количество значений меньше количества возможных регистров, то оставшиеся регистры содержат нулевые значения.

При парсинге текстовые представления команд преобразуются в так называемый байт-код, т. е. структуру, хранящую код команды и его операнды, используя которую можно исполнять МНР-программу очень быстро. Кроме того, такой подход позволяет обнаружить синтаксические ошибки в коде уже на этапе загрузки программы. При обнаружении синтаксических ошибок на экран выводятся соответствующие сообщения.

### **Выполнение программы**

После загрузки программа переходит в состояние (режим) пошагового исполнения, при котором в окне исходного кода подсвечивается следующая для исполнения команда, выводятся значения текущих регистров, а пользователь имеет возможность выполнить нужную ему операцию:

- 1) открыть новый файл;
- 2) запустить программу на непосредственное исполнение (ограничив максимальное количество команд нужным значением во избежание закливания);
- 3) сделать шаг (выполнить одну команду);
- 4) запустить режим анимации (режим автоматического выполнения шагов с небольшим интервалом: 50, 200 или 500 миллисекунд в зависимости от выбранного режима скорости, при котором автоматически обновляется подсветка следующей команды в окне исходного кода и значения текущих регистров);
- 5) отобразить строку со следующей для выполнения команды (если пользователь переместил курсор в окне исходного кода);
- 6) перезапустить программу;
- 7) очистить данные (выгрузить программу из памяти).

Диалоговое окно программы представляет собой две панели, на одной из которых приведена программа МНР (загружается пользователем из текстового файла со специальным расширением), и при необходимости подсвечивается выполняемая команда, на другой – выводится информация о текущей конфигурации.

### **Получение результата**

Программа завершается в одном из следующих случаев:

- 1) выполненная команда была последней в списке команд, стек адресов возврата пуст;
- 2) осуществлен условный переход на команду с номером 0 либо на неименующую команду (с номером, превышающим номер последней команды), стек адресов возврата пуст.

В качестве результата принимается значение, хранящееся в регистре  $R_1$  на момент завершения программы. Данный результат выводится на экран в виде диалогового окна.

После завершения программы ее можно перезапустить, нажав на кнопку «Перезагрузить». При этом в массив текущих регистров будут загружены значения исходных регистров, стек адресов возврата очищен, а программа перейдет в пошаговый режим работы.

## Заключение

Результатом разработки является программа, реализованная в среде C++ Builder Community Edition, являющаяся эмулятором абстрактной вычислительной машины с неограниченными регистрами. Эмулятор выводит на экран листинг программы МНР из ранее подготовленного файла в собственном формате и результат работы программы; может в непрерывном режиме и пошагово выполнять инструкции с их подсветкой и отображением изменения регистров, подключать подпрограммы с правильной организацией памяти МНР и передачей управления, реализовывать рекурсивные программы.

Спроектированный эмулятор представляет интерес как сам по себе, так и может быть использован как демонстрационная программа в таких дисциплинах учебного процесса, как «Информатика», «Дискретная математика», «Теория алгоритмов» [25], а также может быть подспорьем при проверке программ МНР, написанных вручную.

Также отметим, что любая реализованная на компьютере программа может быть «запрограммирована» в рамках любой из предложенных теорий алгоритмов, а доказать несуществование компьютерной программы для решения задачи можно только с помощью какой-то из этих теорий. Таким образом, понятие алгоритма является не только центральным понятием теории алгоритмов, не только одним из главных понятий математики вообще, но и одним из главных понятий современной науки. Более того, сегодня, с наступлением эры информатики, алгоритмы становятся одним из важнейших факторов цивилизации [2].

## Список литературы

1. Успенский, В. А. Алгоритм // Математическая энциклопедия: в 5 томах / В. А. Успенский. – Т. 1. – Москва : Советская энциклопедия, 1977. – С. 202–206.
2. Успенский, В. А. Теория алгоритмов: основные открытия и приложения / В. А. Успенский, А. Л. Семенов. – Москва : Наука, 1987. – 288 с.
3. Определение алгоритма. – URL: [https://studbooks.net/2237922/informatika/opredelenie\\_algoritma](https://studbooks.net/2237922/informatika/opredelenie_algoritma) (дата обращения: 04.10.2020).
4. Першиков, В. И. Толковый словарь по информатике / В. И. Першиков, В. М. Савинков. – Москва : Финансы и статистика, 1991. – 543 с.
5. Герасимов, А. С. Курс математической логики и теории вычислимости / А. С. Герасимов. – Санкт-Петербург : ЛЕМА, 2011. – 284 с.
6. Катленд, Н. Вычислимость. Введение в теорию рекурсивных функций / Н. Катленд. – Москва : Мир, 1983. – 256 с.
7. Крупский, В. Н. Теория алгоритмов / В. Н. Крупский, В. Е. Плиско. – Москва : Академия, 2009. – 208 с.
8. Кузнецов, О. П. Дискретная математика для инженера / О. П. Кузнецов, Г. М. Адельсон-Вельский. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 480 с.

9. *Марченков, С. С.* Элементарные рекурсивные функции / С. С. Марченков. – Москва : МЦНМО, 2003. – 112 с.
10. *Матрос, Д. Ш.* Теория алгоритмов / Д. Ш. Матрос, Г. Б. Поднебесова. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 202 с.
11. Машины Тьюринга и рекурсивные функции / Г.-Д. Эббинхауз, К. Якобс, Ф.-К. Ман, Г. Хермес. – Москва : Мир, 1972. – 264 с.
12. Роджерс, Х. Теория рекурсивных функций и эффективная вычислимость / Х. Роджерс. – Москва : Мир, 1972. – 624 с.
13. *Судоплатов, С. В.* Математическая логика и теория алгоритмов / С. В. Судоплатов, Е. В. Овчинникова. – Москва : ИНФРА-М ; Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – 224 с.
14. *Успенский, В. А.* Лекции о вычислимых функциях / В. А. Успенский. – Москва : ГИФМЛ, 1960. – 492 с.
15. *Булос, Дж.* Вычислимость и логика / Дж. Булос, Р. Джеффри. – Москва : Мир, 1994. – 396 с.
16. *Успенский, В. А.* Машина Поста / В. А. Успенский. – Москва : Наука, 1988. – 96 с.
17. *Успенский, В. А.* Алгоритмы, или машины, Колмогорова / В. А. Успенский, А. Л. Семенов // Теория информации и теория алгоритмов / А. Н. Колмогоров. – Москва : Наука, 1987. – С. 279–289.
18. *Минский, М.* Вычисления и автоматы / М. Минский. – Москва : Мир, 1971. – 367 с.
19. *Бельтоков, А. П.* Машинное описание и иерархия начальных классов Гжегорчика // Записки научных семинаров Ленинградского отделения Математического института им. В. А. Стеклова АН СССР. – 1979. – Т. 88. – С. 30–46.
20. *Горбатов, В. А.* Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика. – Москва : Наука, Физматлит, 2000. – 544 с.
21. *Кнут, Д. Э.* Искусство программирования : в 4 томах. Т. 1. Основные алгоритмы / Д. Э. Кнут. – Москва : Вильямс, 2002. – 720 с.
22. *Вирт, Н.* Алгоритмы и структуры данных / Н. Вирт. – Москва : Мир, 1989. – 360 с.
23. *Кормен, Т. Х.* Алгоритмы: вводный курс / Т. Х. Кормен. – Москва : Вильямс, 2014. – 208 с.
24. *Стивенс, Р.* Алгоритмы. Теория и практическое применение / Р. Стивенс. – Москва : Изд-во «Э», 2016. – 544 с.
25. *Айзикович, А. А.* Построение курса «Теория алгоритмов» / А. А. Айзикович, Л. А. Лещева // Прикладная математика и информатика : сб. ст. науч.-метод. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 89–92.
26. *Саидахмедова, М. Б.* Машина с неограниченными регистрами (МНР) / М. Б. Саидахмедова, Ю. М. Юсупов, Г. С. Рагимханова // Модернизация системы непрерывного образования : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Махачкала : Изд-во ДГПУ, 2014. – С. 557–561.

---

A. A. Aizikovich, CSc in phys. and math., associate professor

V. M. Korovin, student

E-mail: [pmi@istu.ru](mailto:pmi@istu.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## Software Implementation of a Machine with Unlimited Registers

*A brief overview of the existing approaches to the definition of “algorithm” – one of the key concepts of modern mathematics – has been given. Initial information about an abstract machine with unlimited registers, representing the instrument of one of the exact concepts of modern algorithm theory, is given, and a description of the emulator made in the high-level programming language that implements this machine as the final machine. The emulator developed can be used in the training process as a demonstration program.*

**Keywords:** algorithm theory, machine with unlimited registers, emulator.

УДК 004.383

*М. А. Гундина*, канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: [hundzina@bntu.by](mailto:hundzina@bntu.by)

*П. И. Ширвель*, канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: [pavel.shirvel@bntu.by](mailto:pavel.shirvel@bntu.by)

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

## Скалограмма сигнала в Mathematica

*Целью работы является спектральный анализ сигнала, построение скалограммы с помощью вейвлета Морле, модификация скалограммы для получения более информативного графического представления. На скалограмме введена шкала для значения амплитуды сигнала в зависимости от времени и периода ее составляющих компонентов. Разработана модификация представления скалограммы исходного сигнала, позволяющая определить периоды составляющих компонент.*

**Ключевые слова:** спектральный анализ, Wolfram Mathematica, скалограмма.

### Введение

Спектральный анализ широко применяется в задачах обнаружения надводных кораблей и подводных лодок, при получении информации о скорости цели в радиолокационных системах и других прикладных задачах науки и техники [1, 2]. В литературе подробно описаны особенности спектрального анализа на основе преобразований Фурье [3, 4].

### Сведения из теории

Спектральный анализ используется для получения дополнительной информации о данных, полученных промышленным оборудованием [5, 6].

Система *Wolfram Mathematica* может быть использована для реализации известных и разработки новых методов обработки сигналов [7, 8].

Целью данного исследования является модификация скалограммы сигнала для получения дополнительной информации о сигнале.

### Сигнал, содержащий две периодические составляющие

Рассмотрим сигнал, который задается аналитически функцией  $f(t)$ :

```
f[t_]:=If[t<200&&t>0,Cos[2Pi /10 t],If[t>800,Cos[2Pi /30 t],  
If[t>500&&t<700,Cos[2Pi /20 t],0]]].
```

График этого сигнала представлен на рис. 1.

Спектр вычисляется с помощью преобразования Фурье, примененного к массиву значений, которые соответствуют отсчетам сигнала во временной области.

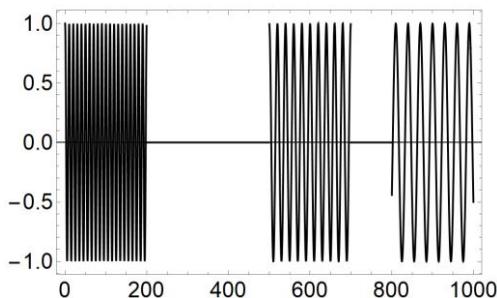


Рис. 1. График исходного сигнала

Частота дискретизации определяется по формуле  $fs = d/h$ , где  $d$  – длина всего интервала,  $h$  – разрешение спектрального анализа.

Спектр вычисляется в диапазоне частот от нуля до частоты дискретизации с помощью следующей пользовательской функции:

$$fv[n_] := Table[i / (n-1) fs, \{i, 1, n-1\}].$$

Под скалограммой будем представлять двумерное описание одномерного сигнала, представляющее собой оценку локального спектра энергии как двумерной функции от абсолютного значения коэффициентов вейвлет-преобразования.

Результат использования функции *WaveletScalogram* представлен на рис. 2, а. Данная функция строит представление коэффициентов вейвлет-преобразования. Недостатком такого представления является сложность определения периода компонент сигнала. По рисунку видно, что периода три.

Для устранения этого недостатка используем разработанную модифицированную скалограмму. Для ее нахождения вначале определяем коэффициент вейвлет-преобразования как функцию от параметров  $a$ ,  $b$  следующим образом:

$$W[a_, b_] := 1./a^{(1/2)} \text{ Sum}[fi[(i-b)/a] dt[\{i\}], \{i, 1, n\}],$$

задаем массив коэффициентов для некоторого диапазона значений исходных параметров:

```
w=Flatten[Table[{a,b,W[a,b]//Chop},{a,1,n},{b,1,n}],1].
```

Затем строим контурное распределение:

```
ListContourPlot[w].
```

Результат выполнения этих команд представлен на рис. 2, б.

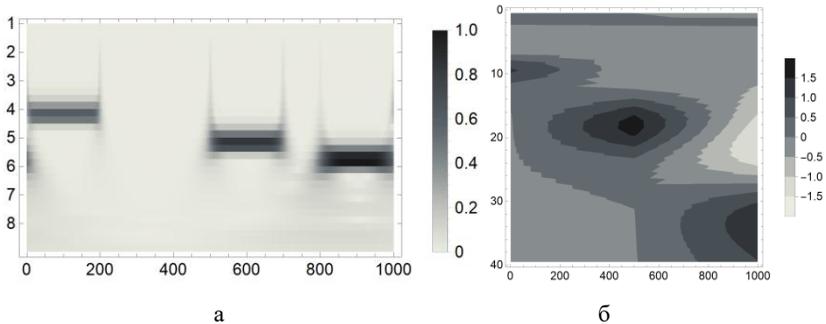


Рис. 2. Скалограмма сигнала, полученная с помощью встроенной функции (а), и модифицированная скалограмма (б)

Полученный спектр позволяет оценить значение частоты сигнала. Видно, что периодами для данных компонент исходного сигнала являются значения 10, 20 и 30.

Для затухающей косинусоиды скалограммы представлены на рис. 3:

```
f[t_]:=Exp[-((t-ns/2)/200.)^2]Cos[2(Pi/10)t].
```

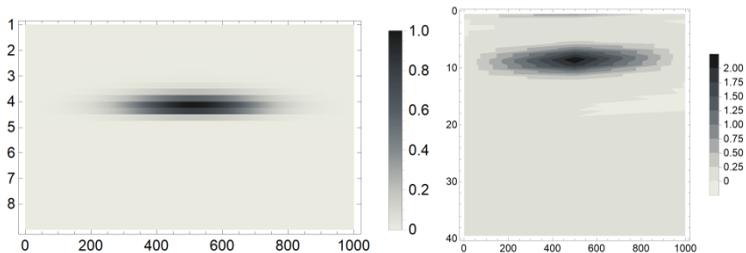


Рис. 3. Скалограмма сигнала, полученная для затухающей косинусоиды с помощью встроенной функции (а), и модифицированная скалограмма (б)

## Результаты и обсуждение

При использовании модифицированной скалограммы появляется возможность определения по графику периода входящих в сигнал компонент и определения значения параметров, при которых коэффициенты вейвлет-преобразования достигают наибольшего значения.

## Выводы

Для спектрального анализа в системе *Mathematica* рекомендуется использование сочетания двух подходов (использование стандартной встроенной функции для определения локализации импульса) и модифицированной скалограммы (для определения периодов составляющих компонент). Также скалограмма позволяет определить основные частоты, наиболее всего участвующие в образовании исследуемого сигнала. Модифицированная скалограмма может использоваться в задачах распознавания радиосигналов и может применяться в реальных условиях его приема при наличии шумов и помех. Результатом спектрального анализа с применением подобной скалограммы является повышение контрастности признаков распознавания сигналов с учетом оптимального выбора вейвлета, который применяется для построения скалограммы.

## Список литературы

1. Запрягаев, С. А. Анализ и распознавание речевых сигналов на основе вейвлет-преобразований / С. А. Запрягаев, А. А. Коновалов // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2009. – № 2. – С. 313–316.
2. Журилова, О. Е. Помехоустойчивое кодирование в современных формах связи / О. Е. Журилова, А. В. Башкирова, С. Ю. Белецкая, С. Н. Панычев, А. С. Костюков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 128–131.
3. Круглова, Т. Н. Оценка эффективности различных методов анализа временных диагностических сигналов / Т. Н. Круглова, Д. Н. Шурыгин, Д. А. Литвин, С. А. Тарковалин, А. С. Власов, С. И. Рыженков, В. В. Ардебашев // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 8–2. – С. 237–241.
4. Частикова, В. А. Идентификация изображений радужных оболочек глаз на основе спектрального анализа методами вейвлет-преобразования и преобразования Фурье / В. А. Частикова, В. В. Сотников, С. В. Зиновьева, А. А. Шелудько // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 2. – С. 341–347.
5. Рублёв, Д. П. Метод стеганографического встраивания сообщений в аудиоданные на основе вейвлет-преобразования / Д. П. Рублёв, О. Б. Макаревич, В. М. Федоров // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2009. – Т. 100, № 11. – С. 199–206.

6. Лебедев, А. А. Использование алгоритма быстрого преобразования Фурье для преобразования данных аудиофайла при разработке ритм игры / А. А. Лебедев, Е. В. Трофименко // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Воронеж, 12–15 сент. 2016 г.). – Воронеж : Научно-исследовательские публикации, 2016. – С. 82–85.

7. Гундин, А. А. Обработка цифровых изображений при дефектоскопии поверхностей промышленных объектов / А. А. Гундин, М. А. Гундина, А. Н. Чешкин // Наука и техника. – 2016. – № 3. – С. 225–232.

8. Гундина, М. А. Использование сферических гармоник для исследования радиоизлучений // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. – 2019. – № 1 (102). – С. 11–16. – URL: <https://lib.vsu.by/jspui/handle/123456789/18079> (дата обращения: 30.10.2020).

*M. A. Hundzina*, CSc in phys. and math., associate professor

E-mail: [hundzina@bntu.by](mailto:hundzina@bntu.by)

*P. I. Shirvel*, CSc in phys. and math., associate professor

E-mail: [pavel.shirvel@bntu.by](mailto:pavel.shirvel@bntu.by)

Belarusian National Technical University, Minsk

## Signal Scalogram in Mathematica

*The purpose of this paper is spectrum analysis of sound signals, creation of scalogram using Morlet wavelet, modification of scalogram to obtain a more informative graphic representation. The scale for the value of the amplitude of the signal depending on the time and period of its component components is introduced on the scalogram. A modification of the presentation of the scalogram of the original signal for determination of the period of the component components is developed.*

**Keywords:** spectrum analysis, Wolfram Mathematica, scalogram.

УДК 538.958

В. Вал. Соболев, д-р физ.-мат. наук, доц.,  
декан ф-та «Математика и естественные науки»  
E-mail: [Soboleff.val@yandex.ru](mailto:Soboleff.val@yandex.ru)

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Сопоставление оптических спектров германида магния и германия

*В работе определены спектры шестнадцати фундаментальных оптических функций  $Mg_2Ge$  в области 0–11 эВ при 77 °К. Установлены их основные особенности и общие закономерности. Они содержат шесть максимумов и ступенек, обусловленных междузонными переходами и метастабильными экситонами. Расчеты выполнены на основе известного экспериментального спектра отражения в области 0–11 эВ при 77 °К с помощью компьютерных программ, созданных на основе соотношений Крамерса – Кронига и известных аналитических формул связи между оптическими функциями. Сопоставлены спектры оптических функций  $Mg_2Ge$  и кристаллического германия, установлены их существенные структурные различия в широкой области энергии.*

**Ключевые слова:** германид магния, германий, оптическая функция, максимум, ступенька, междузонный переход, экситон, диэлектрическая проницаемость, соотношения Крамерса – Кронига, объемные и поверхностные потери энергии.

### Введение

Полупроводниковое соединение  $Mg_2Ge$  относится к группе перспективных и представляющих практический интерес для современной твердотельной электроники. Это объясняется его высокой термостабильностью, стойкостью к окислительным и агрессивным средам. Германид магния и его твердые растворы с другими соединениями группы  $Mg_2X$  ( $X - Si, Ge, Sn$ ) используются для разработки высокотемпературных термоэлектрических генераторов (для диапазона температур 500–800 °К) ввиду большого значения параметра термоэлектрической эффективности [1].

Кристаллическая структура  $Mg_2Ge$  – антифлюорит с кубической гранцентрированной решеткой и пространственной группой симметрии  $Fm\bar{3}m$  ( $O^5_h$ ). Зоны Бриллюэна (ЗБ) кристаллов групп  $Mg_2X$  и  $A^4$  аналогичны, но у соединений  $Mg_2X$  в элементарной ячейке содержатся три

атома [2, 3]. Германид магния – непрямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны  $E_{gi} \cong 0,57-0,63$  эВ [4].

В работе [5] были исследованы спектры отражения от зеркальных свежих сколов монокристаллов  $Mg_2Ge$  в области 1,5–12,5 эВ при  $T = 293$  °К и 1,5–5 эВ при  $T = 77$  °К. Всего в спектре отражения германида магния было обнаружено десять полос переходов [5]. Наиболее интенсивное структурное отражение было выявлено в области 1,5–5 эВ в виде шести полос. Наиболее корректно спектры отражения  $Mg_2Ge$  исследованы на сколах монокристаллов в атмосфере азота при 77 °К в области 1–11 эВ [6]. Результаты работ [5, 6] в основном согласуются по положению и количеству выявленных структур спектров  $R(E)$ . Оптические спектры германида магния более структурны по сравнению со спектрами кристаллического германия.

Электронная структура кристалла  $Mg_2Ge$  рассчитана различными методами [2, 3, 7–9]. Максимум верхней валентной зоны (ВВЗ) во всех теоретических расчетах расположен в точке  $\Gamma_{15}$ , а минимум нижней зоны проводимости (НЗП) расположен около точки  $X_1$  или в точке  $X_3$  [2], которые близки между собой.

Согласно расчетам [3] вершина валентной зоны образована состояниями  $p$ -симметрии, а самая нижняя зона проводимости – состояниями  $s$ -симметрии. Предполагается, что четыре  $s$ -электрона атомов Mg и четыре  $s$  и  $p$ -электрона Ge образуют восемь валентных электронов верхней валентной зоны элементарной ячейки германида магния. Зонные структуры  $Mg_2Ge$  и  $Mg_2Si$  весьма подобны. Расчетные значения  $E_{gi}$  (1,6 эВ) [3] оказались более чем в два раза выше экспериментальных (0,74 эВ) [10]. Наиболее подробный расчет энергетических зон проводился методом эмпирического псевдопотенциала [2]. В [8] методом псевдопотенциала рассчитаны зоны трех соединений ( $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Ge$  и  $Mg_2Sn$ ) с использованием четырех форм-факторов для Si, Ge, Sn и двух форм-факторов для Mg. Результаты расчетов получились весьма схожими с данными [2]. Авторами [9] по методу LDA были получены сильно заниженные (примерно в 4–7 раз) значения энергии непрямой запрещенной зоны  $E_{gi}$  по сравнению с экспериментальными данными. Теоретические значения энергий максимумов спектра  $\epsilon_2$  равны 2,12, 2,9, 3,6 эВ. Предполагается, что они обусловлены междузонными переходами в точках  $\Gamma$ ,  $L$ ,  $X$ ,  $\Delta B$ . В работе [7] изучено влияние экситонных эффектов на оптические свойства германида магния, где были получены энергии междузонных переходов в точках  $\Gamma$ ,  $L$ ,  $X$ , а также  $E_{gi}$  и спектр  $\epsilon_2$ , весьма близкие к экспериментальным данным.

В экспериментальном спектре отражения  $Mg_2Ge$  в области 1–11 эВ [6] наблюдаются пять максимумов и ступенек, а теоретические спектры

$\varepsilon_2(E)$  содержат лишь два-три максимума. Это указывает на несовершенство теоретических расчетов. Кроме того, в них нет аргументированных однозначных выводов о локализации этих максимумов в ЗБ. Таким образом, для преодоления противоречий между многочисленными теоретическими расчетами электронной структуры германида магния и с имеющимися экспериментальными данными требуется более детальная информация об особенностях полос переходов в оптических спектрах  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ , чем только известные спектры отражения 1–12 эВ в работах [5, 6]. Чтобы получить новую информацию об особенностях оптических спектров и оптических свойств системы  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ , интересно сопоставить оптические спектры  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  и Ge.

### Методика расчетов

Экспериментально в широкой области энергий, как правило, определяется только спектр отражения  $R(E)$ . Иногда, применяя весьма сложные приближенные методики, получают из интегральной функции потерь объемные ( $-\text{Im} \varepsilon^{-1}$ ) и поверхностные ( $-\text{Im}(1+\varepsilon)^{-1}$ ) характеристические потери электронов. Кроме того, эллипсометрическими методами в области ( $E_{gd} \sim 5,5$  эВ) измеряют спектры  $\varepsilon_1(E)$  и  $\varepsilon_2(E)$ . Поэтому полный комплекс фундаментальных оптических функций обычно рассчитывается на основе экспериментального спектра отражения по специальным компьютерным программам с использованием интегральных соотношений Крамерса – Кронига и известных аналитических формул связи оптических функций между собой. Используемые методики расчетов подробно изложены и многократно применялись [11–13].

### Результаты расчетов и их обсуждение

Расчеты спектров полного комплекса оптических функций монокристалла  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  были выполнены на основе экспериментальных спектров отражения работы [6] в области 1–11 эВ при  $T = 77$  °К (рис. 1, табл. 1). В экспериментальном спектре отражения наблюдается пять максимумов и одна ступенька. Самый интенсивный максимум находится при энергии 3,4 эВ, за ним расположен максимум с дублетной структурой при 4,15 и 4,50 эВ. Остальные структуры наблюдаются при энергиях 2,49, 3,05, 5,65 эВ. В спектрах  $\varepsilon_1(E)$ ,  $n(E)$ ,  $\sigma(E)$  имеются максимумы поперечных аналогов полос спектра отражения (рис. 1, а). Максимумы  $\varepsilon_1(E)$ ,  $n(E)$  значительно уже структур отражения и смещены относительно максимумов  $R(E)$  в область меньших энергий на  $\sim 0,06$ – $0,35$  эВ или совпадают. Спектры  $\varepsilon_2(E)$ ,  $\alpha(E)$ ,  $k(E)$ ,  $\varepsilon_2 E^2(E)$  (рис. 1, б) аналогичны по структуре между собой и со спектрами  $R$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $n$ ,  $\sigma$ . В спектре  $\varepsilon_2(E)$  проявляется пять структур, самая интенсивная полоса находится при энергии 3,05 эВ.

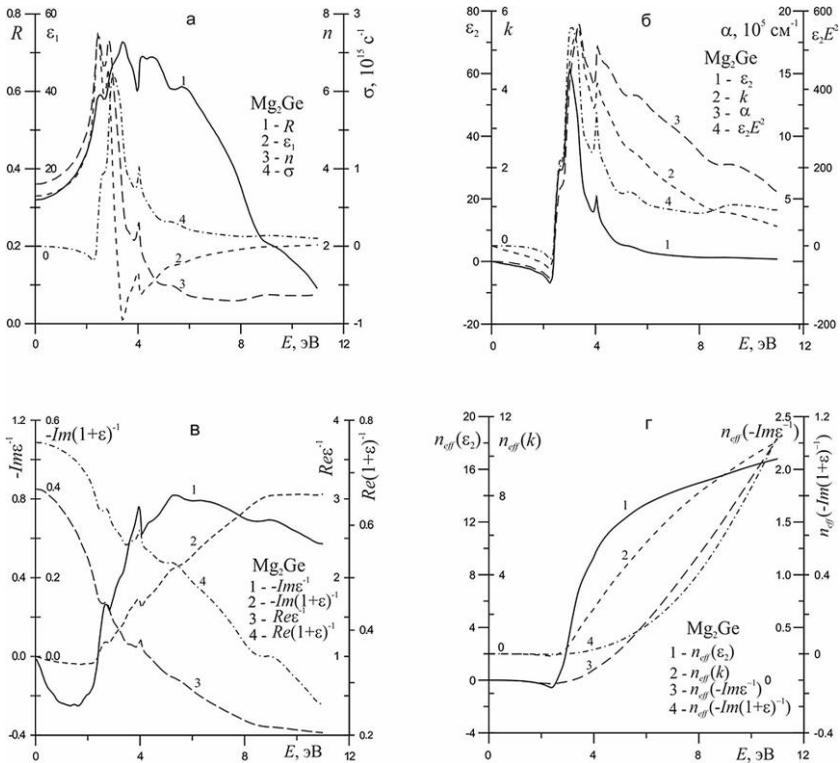


Рис. 1. Экспериментальный спектр  $R(E)$  (1) [9] и расчетные спектры  $\epsilon_1(E)$  (2),  $n(E)$  (3),  $\sigma(E)$  (4) (а);  $\epsilon_2(E)$  (1),  $\alpha(E)$  (2),  $k(E)$  (3),  $\epsilon_2 E^2(E)$  (4) (б);  $-\text{Im}\epsilon^{-1}(E)$  (1),  $-\text{Im}(1+\epsilon)^{-1}(E)$  (2),  $\text{Re}\epsilon^{-1}(E)$  (3),  $\text{Re}(1+\epsilon)^{-1}(E)$  (4) (в) и  $n_{\text{eff}}$ , рассчитанные на основе  $\epsilon_2$  (1),  $k$  (2),  $-\text{Im}\epsilon^{-1}$  (3),  $-\text{Im}(1+\epsilon)^{-1}$  (4) (г), при 77 °К кристалла Mg<sub>2</sub>Ge

Максимумы структур в спектрах  $\alpha(E)$ ,  $k(E)$ ,  $\epsilon_2 E^2(E)$  смещены относительно спектра  $\epsilon_2(E)$  в область больших энергий незначительно ( $\Delta E \approx 0,05-0,35$  эВ) либо совпадают. В спектрах  $\alpha(E)$  и  $\epsilon_2 E^2(E)$  структура при энергии 3,4 и 3,1, соответственно, является наиболее интенсивной и для функции  $\alpha(E)$  достигает значения  $\approx 1,9 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ . Наиболее интенсивные структуры в спектре отражения германида магния расположены в области энергий 2–6 эВ, в то время как функция  $\epsilon_2(E)$ , пройдя максимальное значение при энергии 3,05 эВ, далее при больших энергиях

резко идет на спад. В спектре объемных характеристических потерь электронов  $-\text{Im} \varepsilon^{-1}$  (рис. 1, в) наблюдается шесть структур: три максимума при энергиях 2,74, 4,0 и 5,4 эВ и три ступеньки при 3,25, 3,6, 4,4 эВ соответственно. В спектре поверхностных характеристических потерь электронов  $-\text{Im}(1+\varepsilon)^{-1}$  наблюдаются структуры-аналоги максимумов и ступенек спектра объемных потерь. При этом структуры в спектре  $-\text{Im}(1+\varepsilon)^{-1}$  либо совпадают по энергии, либо смещены на  $\sim 0,1$  эВ в область меньших энергий относительно их аналогов в спектре  $-\text{Im} \varepsilon^{-1}$ . Продольные полосы переходов в спектрах объемных и поверхностных характеристических потерь электронов заметно шире их поперечных аналогов в спектре  $\varepsilon_2(E)$  и либо смещены относительно их в область больших энергий на  $\sim 0,1-0,2$  эВ, либо совпадают с ними.

**Таблица 1. Энергии (эВ) максимумов и ступенек (в скобках) оптических функций кристалла  $\text{Mg}_2\text{Ge}$**

№	$R$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$n$	$k$	$\alpha$	$\varepsilon_2 E^2$	$-\text{Im} \varepsilon^{-1}$	$-\text{Im}(1+\varepsilon)^{-1}$	$\sigma$
1	2,49	2,43	2,7	2,43	(2,7)	(2,7)	2,7	2,74	2,73	(2,6)
2	(3,05)	2,9	3,05	2,9	—	—	3,1	(3,25)	(3,25)	3,05
3	3,4	—	(3,3)	(3,4)	3,4	3,4	—	(3,6)	—	(3,3)
4	4,15	4,0	4,1	4,02	4,1	4,1	4,05	4,0	4,0	4,03
5	4,50	—	—	—	(4,4)	(4,5)	—	(4,4)	(4,3)	—
6	5,65	(5,3)	(5,3)	(5,3)	(5,5)	(5,65)	(5,4)	5,4	(5,4)	(5,3)

На рис. 1, г представлены спектры функций  $n_{\text{eff}}(E)$ , рассчитанные по  $\varepsilon_2(E)$ ,  $k(E)$ ,  $-\text{Im} \varepsilon^{-1}$ ,  $-\text{Im}(1+\varepsilon)^{-1}$  в области 1–11 эВ. Кривая  $n_{\text{eff}}(\varepsilon_2)$  имеет резкий длинноволновый край при  $E \approx 2,3$  эВ, далее возрастает до значений  $\approx 3,3$  при  $\sim 6$  эВ, а затем при больших энергиях почти линейно растет до  $\approx 4$  при 11 эВ, при этом максимально возможное число валентных электронов в формульной единице соединения составляет 8. Функция  $n_{\text{eff}}(k)$ , также начиная с энергии  $\approx 2,3$  эВ, почти линейно растет от нулевых значений до значений  $\approx 4,5$  при 11 эВ. Кривые  $n_{\text{eff}}(-\text{Im} \varepsilon^{-1})$  и  $n_{\text{eff}}(-\text{Im}(1+\varepsilon)^{-1})$  очень медленно начинают возрастать примерно от энергии  $\approx 3,5$  эВ, достигая значений  $\sim 0,28$  и  $\sim 2,5$  соответственно при 11 эВ. Кривая  $n_{\text{eff}}(-\text{Im} \varepsilon^{-1})$  при  $\sim 6$  эВ расположена ниже кривой  $n_{\text{eff}}(\varepsilon_2)$  в  $\sim 26,4$  раза, при  $\sim 11$  эВ в  $\sim 14,3$  раза. Это свидетельствует о том, что полосы поперечных переходов в области энергий около 6 эВ формируются светом в  $\sim 26,4$  раза более эффективно, чем полосы их продольных аналогов, вызываемых потоком быстрых электронов, а в области больших энергий ( $\sim 11$  эВ) эта разница в формировании полос переходов снижается почти в 2 раза. Таким образом, так как взаимодействия света и по-

тока быстрых частиц с веществом совершенно разные, то в основном спектр функции  $\varepsilon_2(E)$  формируется большей частью валентных электронов в области интенсивного поглощения, а спектры характеристических потерь при этом формируются очень слабо.

**Таблица 2. Энергии (эВ) максимумов и ступенек (в скобках) оптических функций кристаллического Ge ( $p\nu/ps$  – энергии плазменных полос объемных и поверхностных потерь электронов соответственно) [14]**

№	$R$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$n$	$k$	$\alpha$	$\varepsilon_2 E^2$	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	$-\text{Im}(1+\varepsilon)^{-1}$	$\sigma$
1	2,13	2,02	2,35	2,02	2,41	(2,5)	2,45	2,82	2,82	2,42
2	(3,4)	3,09	(3,4)	3,16	(3,4)	–	–	4,05	4,09	(3,4)
3	4,57	(4,1)	4,44	(4,4)	4,50	4,50	4,43	5,77	5,64	4,44
4	6,11	5,65	(5,8)	(5,8)	5,84	5,98	5,84	–	–	5,81
$p\nu/ps$	–	–	–	–	–	–	–	16,06	11,62	–

При переходе от  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  к германию приведенные выше структурные особенности оптических спектров очень существенно меняются (табл. 2). В экспериментальном спектре отражения Ge наблюдаются три максимума при энергиях  $E = 2,13, 4,57, 6,11$  эВ и ступенька при  $E \sim 3,4$  эВ. Функции реальной части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_1(E)$  и показателя преломления  $n(E)$  германия схожи по структуре со спектром отражения, при этом в  $\varepsilon_1$  третья структура вырождается в ступеньку, а в  $n$  третья и четвертая структуры вырождаются в ступеньки. В спектре  $\varepsilon_1(E)$  имеется три максимума при  $E = 2,02, 3,09, 5,65$  эВ и ступенька при  $E \sim 4,1$  эВ, а в спектре показателя преломления германия наблюдаются два максимума при  $2,02, 3,16$  эВ и две ступеньки при  $E \sim 4,4, 5,8$  эВ. Спектр оптической проводимости  $\sigma(E)$  содержит три максимума при  $E = 2,42, 4,44, 5,81$  эВ и ступеньку при  $E \sim 3,4$  эВ. В расчетном спектре  $\varepsilon_2(E)$  германия проявляются две структуры, имеющие аналоги в спектре отражения: два интенсивных максимума при энергиях  $2,35, 4,44$  эВ и две ступеньки при  $E \sim 3,4, 5,8$  эВ. В спектрах коэффициента поглощения  $\alpha$ , объединенной плотности состояний  $\varepsilon_2 E^2$  и показателя поглощения германия имеются структуры, аналогичные структурам  $\varepsilon_2(E)$ , но в них четвертая полоса проявляется как максимум, а в  $\alpha(E)$  и  $\varepsilon_2 E^2(E)$  вторая структура отсутствует. Спектр объемных характеристических потерь электронов  $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$  содержит четыре структуры: три максимума при  $E = 2,82, 4,05, 5,77$  эВ и интенсивную полосу, которая ответственна за коллективные возбуждения всех валентных электронов при  $E_{pv} = 16,06$  эВ. Спектр поверхностных характеристических потерь электронов  $-\text{Im}(1+\varepsilon)^{-1}$  по структуре схож со спектром объемных потерь, но плазмон в нем находится при энергии  $E_{ps} = 11,62$  эВ. Смещение меж-

ду ними составляет  $\Delta E = E_{pv} - E_{ps} = 4,44$  эВ. В спектре эффективного количества валентных электронов  $n_{eff}(\epsilon_2)$ , рассчитанного по спектру  $\epsilon_2(E)$ , наблюдается резкое увеличение интенсивности в области 2–6 эВ, затем в области 6–12 эВ наблюдается плавное увеличение интенсивности. В спектре  $n_{eff}(k)$  нет резкого роста интенсивности, его интенсивность плавно увеличивается начиная с 2 эВ, а интенсивность кривых  $n_{eff}(-\text{Im}\epsilon^{-1})$  и  $n_{eff}(-\text{Im}(1+\epsilon)^{-1})$  также начинает плавно возрастать с 8 эВ [14].

Сопоставим оптические спектры и электронные структуры германия и  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ . Справедливо предположить, что валентные зоны  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ , как и у германия, в основном обусловлены орбиталями германия. Поэтому наибольшие различия между электронными структурами обоих соединений следует ожидать в области нижней зоны проводимости. Самая нижняя зона проводимости германия, отвечающая за прямые междонозные переходы, расположена выше минимума зоны проводимости всего на  $\sim 0,2$  эВ. Поэтому для германия роль спин-орбитальных эффектов довольно высока. У  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  при энергиях выше  $E_{gi}$  проявляются сравнительно интенсивные переходы вместо широкой области более слабых полос переходов у чистого германия. Кроме этой важной особенности весьма значительных различий между интенсивностями полос переходов  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  и германия добавляется еще одно существенное различие: в области энергий 2–6 эВ в экспериментальных спектрах отражения германида магния имеется четыре хорошо выраженных максимума, в том числе с дублетной структурой, тогда как у германия в этой области наблюдаются существенно менее выраженные структуры. Аналогичные структурные различия присутствуют и у спектров других оптических функций обоих кристаллов. Многочисленные теоретические расчеты  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ , к сожалению, пока являются сильно упрощенными. Это не позволяет пока объяснить природу указанных существенных различий в особенностях оптических спектров обоих материалов.

### Заключение

Впервые определены спектры шестнадцати фундаментальных поперечных и продольных оптических функций монокристалла силицида магния в области энергии 1–11 эВ при 77 °К вместо известного спектра отражения и рассчитанного по нему спектра диэлектрической проницаемости. Расчеты выполнены на основе экспериментального спектра отражения с помощью специальных компьютерных программ. Установлены и сопоставлены основные особенности полученных интегральных спектров  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  со спектрами расчетных оптических функций кристаллического германия. Полученная обширная новая информация позволит

количественно и детально анализировать теоретические расчеты зон и экситонов  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ , а также родственных ему кристаллов в широкой области энергии. Установлены существенные структурные различия в оптических спектрах кристаллического германия и  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  в широкой области энергии. Для выяснения их природы необходимы дальнейшие более детальные расчеты.

### Список литературы

1. Pulikkotil, J. J. Doping and temperature dependence of thermoelectric properties in  $\text{Mg}_2(\text{Si},\text{Sn})$  / J. J. Pulikkotil, D. J. Singh, S. Auluck, M. Saravanan, D. K. Misra, A. Dhar, R. C. Budhani // Physical Review B. 2012. Vol. 86. No. 15. Article ID 155204. DOI: [10.1103/PhysRevB.86.155204](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.155204).
2. Au-Yang, M. Y. Electronic structure and optical properties of  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ , and  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  / M. Y. Au-Yang, M. L. Cohen // Physical Review. 1969. Vol. 178. No. 3. Pp. 1358–1364. DOI: [10.1103/PhysRev.178.1358](https://doi.org/10.1103/PhysRev.178.1358).
3. Lee, P. M. Electronic structure of magnesium silicide and magnesium germanide // Physical Review. 1964. Vol. 135. No. 4A. P. A1110–A1114. DOI: [10.1103/PhysRev.135.A1110](https://doi.org/10.1103/PhysRev.135.A1110).
4. Lott, L. A. Infrared absorption in  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  / L. A. Lott, D. W. Lynch // Physical Review. 1966. Vol. 141. No. 2. P. 681–686. DOI: [10.1103/PhysRev.141.681](https://doi.org/10.1103/PhysRev.141.681).
5. Спектры отражения и структура зон кристаллов типа  $\text{Mg}_2\text{Si}$  / В. В. Соболев, В. И. Донецких, Е. Б. Соколов и др. // Физика твердого тела. – 1970. – Т. 12, № 9. – С. 2687–2691.
6. Scouler, W. J. Optical properties of  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ , and  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  from 0.6–11.0 eV at 77°K // Physical Review. 1969. Vol. 178. No. 3. Pp. 1353–1357. DOI: [10.1103/PhysRev.178.1353](https://doi.org/10.1103/PhysRev.178.1353).
7. Arnaud, B. Electron-hole excitations in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  and  $\text{Mg}_2\text{Ge}$  compounds / B. Arnaud, M. Alouani // Physical Review B. 2001. Vol. 64. No. 3. Article ID 033202. DOI: [10.1103/PhysRevB.64.033202](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.033202).
8. Aymerich, F. Pseudopotential band structures of  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  and of the solid solution  $\text{Mg}_2(\text{Ge}, \text{Sn})$  / F. Aymerich, G. Mula // physica status solidi (b). 1970. Vol. 42. No. 2. Pp. 679–704. DOI: [10.1002/pssb.19700420224](https://doi.org/10.1002/pssb.19700420224).
9. Benhalal, O. First principles calculations of the structural, electronic and optical properties of IIA–IV antiferroite compounds / O. Benhalal, A. Chahed, S. Laksari, B. Abbar, B. Bouhafis, H. Aourag // Physica status solidi (b). 2005. Vol. 242. No. 10. Pp. 2022–2032. DOI: [10.1002/pssb.200540063](https://doi.org/10.1002/pssb.200540063).
10. Busch, G. Elektrische eigenschaften der intermetallischen verbindungen  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Sn}$  und  $\text{Mg}_2\text{Pb}$  / G. Busch G., U. Winkler // Physica. 1954. Vol. 20. No. 7. Pp. 1067–1072. DOI: [10.1016/S0031-8914\(54\)80236-9](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(54)80236-9).
11. Соболев, В. В. Оптические свойства и электронная структура неметаллов. I. Введение в теорию / В. В. Соболев. – Москва ; Ижевск : Ин-т комп. исслед., 2012. – 583 с.

12. *Соболев, В. В.* Оптические свойства силицида магния / В. В. Соболев, В. Вал. Соболев // Аморфные и микрокристаллические полупроводники : сб. тр. X Междунар. конф. – Санкт-Петербург : Изд-во Политех. ун-та, 2016. – С. 364.

13. Усовершенствованный метод разложения интегральных оптических спектров на элементарные компоненты с помощью диаграмм Арганда / А. И. Калугин, Е. А. Антонов, Д. А. Перевошиков, В. Вал. Соболев // Химическая физика и мезоскопия. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 604–610.

14. *Шушков, С. В.* Оптические свойства и электронная структура системы кремний – германий : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.01, 01.04.07. – Ижевск : 2013. – 270 с.

V. Val. Sobolev, DSc in phys. and math., associate professor,  
dean of the Faculty of Mathematics and Natural Sciences

E-mail: [Soboleff.val@yandex.ru](mailto:Soboleff.val@yandex.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## Comparison of the Optical Spectra of Magnesium and Germanium Germanide

*In this work, the spectra of sixteen fundamental optical functions of  $Mg_2Ge$  in the range 0-11 eV at 77 °K are determined. Their main features and general laws are established. They contain six maxima and shoulders due to interband transitions and metastable excitons. The calculations were carried out on the basis of the known experimental reflection spectrum in the range of 0-11 eV at 77 °K using computer programs created on the basis of the Kramers-Kronig relations and the known analytical formulas for the relationship between optical functions. The spectra of the optical functions of  $Mg_2Ge$  and crystalline germanium are compared, and their significant structural differences are established in a wide energy range.*

**Keywords:** magnesium germanide, germanium, optical function, maximum, shoulder, interband transition, exciton, permittivity, Kramers-Kronig relations, bulk and surface energy losses.

*Электронное научное издание*

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2020.  
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов XVI Всероссийской научно-технической конференции  
(Ижевск, 2–4 декабря 2020 года)

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети:  
[http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21\\_2020.pdf](http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21_2020.pdf)

Дата размещения на сайте: 24.12.2020

Технический редактор *С. В. Звягинцова*  
Корректор *И. В. Ганеева*  
Верстка *С. Е. Фокиной*  
Дизайн обложки *С. А. Мурашов, К. Сабура*

Подписано к использованию 24.12.2020. Объем 8,8 МБ  
Уч.-изд. л. 10,88. Заказ 235

Издательство Ижевского государственного технического университета  
имени М. Т. Калашникова. 426069, Ижевск, Студенческая, 7