

ISSN 2663-4228 (Print)  
ISSN 2663-4236 (Online)

# Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ  
ЖУРНАЛ

*Основан в 1997 году,  
«Серия Г: Технические науки»  
основана в 2018 году*

---

---

Серия Г:  
Технические  
науки

---

---

2/2024

---

---

**Редакционная коллегия журнала**  
**«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»**

**Главный редактор** – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов.**

**Зам. главного редактора** – канд. техн. наук **И.А. Третьяков.**

**Ответственный секретарь** – канд. техн. наук **Е.Д. Пометун.**

**Члены редколлегии:** д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин;** д-р техн. наук, проф. **Л.В. Алексейчик;** канд. физ.-мат. наук, с.н.с. **П.В. Асланов;** канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башева;** д-р техн. наук, доц. **И.А. Бершадский;** д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков;** д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский;** д-р техн. наук, доц. **К.А. Вытовтов;** д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин;** канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин;** канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко;** канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская;** д-р техн. наук, доц. **А.В. Звягинцева;** д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори;** д-р техн. наук, доц. **В.В. Карнаух;** канд. техн. наук, с.н.с. **А.А. Курушин;** канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский;** д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина;** канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён;** д-р техн. наук, проф. **А.С. Петров;** д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк;** академик РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов;** канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко;** д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых;** д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов;** д-р техн. наук, доц. **Д.В. Шевцов;** канд. техн. наук, доц. **О.Г. Шелехова.**

**The Editorial Board of the journal**  
**«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»**

**The Editor-in-Chief** – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov.**

**The Deputy of the Editor-in-Chief** – Cand. of tech. **I.A. Tretiakov.**

**Assistant Editor** – Cand. of tech. **E.D. Pometun.**

**The Members of the Editorial Board:** Dr. of tech., prof. **G.V. Averin;** Dr. of tech., prof. **L.V. Alekseichik;** Cand. of phys. and math., s. researcher **P.V. Aslanov;** Cand. of tech., doc. **T.S. Bashevaia;** Dr. of tech., doc. **I.A. Bershadskii;** Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov;** Dr. of tech., prof. **S.V. Borshevskii;** Dr. of tech., doc. **K.A. Vytovtov;** Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin;** Cand. of tech., doc. **S.V. Gridin;** Cand. of tech., doc. **T.V. Ermolenko;** Cand. of tech., doc. **T.V. Zavadskaia;** Dr. of tech., doc. **A.V. Zviagintseva;** Dr. of tech., doc. **S.A. Zori;** Dr. of tech., doc. **V.V. Karnaukh;** Cand. of tech., s. researcher **A.A. Kurushin;** Cand. of tech., doc. **I.A. Molokovskii;** Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina;** Cand. of tech., doc. **V.V. Paslen;** Dr. of tech., prof. **A.S. Petrov;** Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk;** RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov;** Cand. of phys. and math., doc. **V.I. Timchenko;** Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh;** Dr. of tech., prof. **M.N. Shevtsov;** Dr. of tech., doc. **D.V. Shevtsov;** Cand. of tech., doc. **O.G. Shelekhova.**

**Адрес редакции:** 283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

**Тел.:** +7 (856) 302 07 81

**E-mail:** [vestnik.g@mail.ru](mailto:vestnik.g@mail.ru)

**URL:** <http://donnu.ru/vestnikG>

С 12.02.2024 г. журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ**) по следующим научным специальностям и соответствующей им отрасли (технические науки):

- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры,
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы,
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения,
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций,
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика,
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы,
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами,
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей,
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы,
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника,
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы,
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): [http://elibrary.ru/title\\_about\\_new.asp?id=69984](http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984)

Журнал включен в международную индексационную наукометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Печатается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:  
Протокол №6 от 31.05.2024 г.*

**Вестник  
Донецкого  
национального  
университета**

**Серия Г: Технические науки**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,  
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён 10-летию со дня  
референдума о независимости  
Донецкой Народной Республики

**№ 2/2024**

---

**СОДЕРЖАНИЕ**

---

**ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ**

- Добромыслов В.С.* Колебания высокого порядка в диэлектрических резонаторах 3
- Спиридонов Н.А., Сидак И.Л.* Поляризация пьезокерамических элементов и контроль пьезосвойств 18
- Безус Ю.А., Рыбалка А.Е., Румянцев В.В., Федоров С.А., Петренко А.Г.* Особенности дисперсии экситоноподобных возбуждений в неидеальной 1D фотонной решетке микропор 24
- Пометун Е.Д.* Оценка неопределенности измерений температуры при калибровке термопреобразователей 32

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

- Черенков В.И., Нестругина Е.С.* Экспертная система подбора товаров в интернет-магазине с использованием искусственных нейронных сетей 37
- Максименко И.И.* Алгебраическая и топологическая представимость решеток 44
- Рушечников Я.И., Данилов В.В., Третьяков И.А., Ступак В.А.* Методика автоматизированной оценки объёма побочных электромагнитных излучений 51
- Нестругина Е.С., Поддубев К.С.* Применение экспертной системы для автоматизации диагностирования заболеваний в стоматологии 58

**ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

- Гридин С.В., Бирюков А.Б.* Анализ методов диагностирования трубопроводов тепловых сетей для определения их фактического технического состояния 69
- Гридин С.В., Варакута В.В., Максименко Д.И.* Электрогенерация на базе нефтегазовых скважин, выводимых из эксплуатации 80

**ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА**

- Правила для авторов 90

# Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,  
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the 10th  
anniversary of referendum on  
sovereignty of Donetsk People's  
Republic

Series G: Technical sciences

№ 2/2024

---

## CONTENTS

---

### ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Dobromyslov V.S.* High-order modes in dielectric resonators 3
- Spiridonov N.A., Sidak I.L.* Piezoceramic elements polarization and piezo properties control 18
- Bezus IU.A., Rybalka A.E., Rumiantsev V.V., Fedorov S.A., Petrenko A.G.* Dispersion of exciton-like excitations in an imperfect 1D photonic lattice of micropores 24
- Pometun E.D.* Estimation of uncertainty of temperature measurements during calibration of thermal converters 32

### INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

- CHerenkov V.I., Nestrugina E.S.* Expert system for selection of goods in an online store using artificial neural networks 37
- Maksimenko I.I.* Algebraic and topological representations in lattices 44
- Rushechnikov IA.I., Danilov V.V., Tretiakov IA., Stupak V.A.* The method of automated assessment of the volume of side electromagnetic emissions 51
- Nestrugina E.S., Podduev K.S.* Application of an expert system for automating disease diagnosis in dentistry 58

### ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

- Gridin S.V., Biriukov A.B.* Analysis of methods for diagnosing pipelines of heating networks to determine their actual technical condition 69
- Gridin S.V., Varakuta V.V., Maksimenko D.I.* Power generation based on oil and gas wells being decommissioned 80

### INFORMATION SECTION

- Rules for authors 90

Э Л Е К Т Р О Н И К А , Ф О Т О Н И К А ,  
П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е И С В Я З Ъ

EDN EFTQFY  
УДК 621.372.826

DOI 10.5281/zenodo.12548359

КОЛЕБАНИЯ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
РЕЗОНАТОРАХ

© 2024 *Добромыслов В.С.*

Диэлектрические резонаторы (ДР) с колебаниями высокого порядка известны также как резонаторы с модами шепчущей галереи или как резонаторы с азимутальными колебаниями. Нашли применение в диапазоне миллиметровых и сантиметровых волн в СВЧ генераторах с низким уровнем фазовых шумов, в частотных дискриминаторах, при исследованиях тонкопленочных материалов и при высокоточных измерениях параметров диэлектриков с малыми потерями. Представлен перечень диэлектрических материалов с небольшой проницаемостью  $\epsilon \approx 2 - 20$  и малым тангенсом угла потерь для кольцевых и дисковых ДР. Анализируются основные свойства экранированных ДР. Рассмотрено влияние экрана на резонансную частоту и добротность резонаторов. Исследованы возможности подстройки резонансных частот с использованием металлических и диэлектрических поверхностей.

**Ключевые слова:** диэлектрические резонаторы, диэлектрические материалы, резонансная частота, концентрация электромагнитной энергии, зазор, коэффициенты добротности, геометрический фактор.

**Введение.** Диэлектрические резонаторы (ДР) находят достаточно широкое применение в различных устройствах СВЧ диапазона. В основе частотно-избирательных свойств ДР лежит эффект объемного резонанса электромагнитных колебаний в диэлектрическом элементе. Как правило, диэлектрический элемент имеет правильную геометрическую форму и изготавливается в виде кольца, диска, шара.

Резонаторы в режиме низших типов электромагнитных колебаний делают на основе материалов с повышенным значением диэлектрической проницаемости ( $\epsilon > 20$ ). Имеют значительные радиационные потери и используются в основном в экранированных структурах СВЧ. На практике получили широкое распространение в качестве антенных элементов, в фильтрующих устройствах, в стабилизирующих звеньях генераторов СВЧ.

Отличительной особенностью колебаний высокого порядка в ДР являются очень малые радиационные потери – в рабочем диапазоне частот  $Q_{изл} \gg Q_{диэл}$ . При изготовлении резонаторов используются диэлектрические материалы с относительно небольшой величиной диэлектрической проницаемости  $\epsilon \approx 2 - 20$ . Первые результаты по исследованию колебаний высокого порядка в ДР были опубликованы в работах [1-4]. Колебания высокого порядка в ДР известны также как моды шепчущей галереи по аналогии с высокочастотными звуковыми волнами, направляемыми вогнутой поверхностью.

Зависимости электромагнитных полей колебаний высокого порядка ДР от радиуса  $\rho$  и угла  $\varphi$  описываются в диэлектрике гармоническими функциями:

$$\Phi(\rho, \varphi) \approx J_n(\chi\rho) \begin{cases} \sin(n\varphi + \psi) \\ \cos(n\varphi + \psi) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $n$  – азимутальный индекс или порядок колебаний,  $\chi$  – поперечное волновое число,  $\psi$  – угол, определяемый азимутальным положением источника возбуждения.

Каждому номеру  $n$  соответствуют два различных собственных колебания. По виду зависимостей  $\Phi(\rho, \varphi)$  (рис. 1) их иногда называют лепестковыми колебаниями.

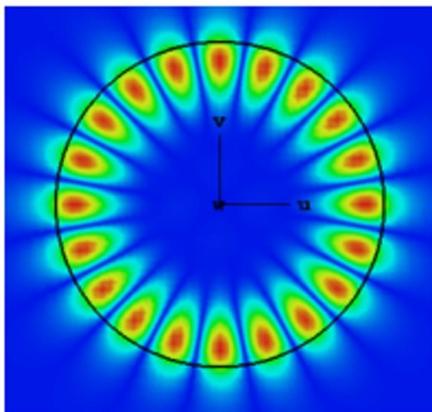


Рис. 1. Распределение электромагнитных полей в дисковом ДР ( $n=10$ )

Наибольшее распространение в практическом использовании получили ДР в форме диска. В дисковых ДР, в отличие от кольцевых, отсутствует внутренняя граница раздела диэлектрик – воздух. Электромагнитные поля резонатора локализованы в области края диска. При возбуждении ДР открытым концом волновода или коаксиальным зондом, поднесенным к диску в плоскости, проходящей через ось диска, в нем наблюдается только одно из колебаний  $\Phi(\rho, \varphi)$ . Если же возбуждение ДР осуществляется через распределенную связь с диэлектрическим волноводом или микрополосковой линией, обладающую высокой направленностью, в ДР возникают оба колебания (1), сдвинутые по фазе на  $90^\circ$  градусов.

В сумме они представляют собой волну:

$$\Phi_0 = \cos(v\phi + \psi) \pm j \cdot \sin(v\phi + \psi) = e^{\pm j(v\phi + \psi)},$$

бегущую вокруг диска. На резонансной частоте угловая постоянная распространения  $v$  равна целому числу  $n$ . Резонанс проявляется в резком изменении коэффициента передачи по связанному с диском волноводу. Такой резонансный режим называют режимом бегущей волны. Именно в таком режиме работают известные резонаторы бегущей волны.

Алгоритмы вычисления резонансных частот, концентрации электромагнитной энергии внутри диэлектрика, радиационной добротности дисковых ДР можно найти, в частности, в работах [5-8].

**Материалы для кольцевых и дисковых ДР.** Для резонаторов с колебаниями высокого порядка в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн нашли применение диэлектрики с небольшой величиной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon \approx 2 - 20$  и относительно малым тангенсом угла диэлектрических потерь  $tg\delta < 10^{-3}$ . Диэлектрики с проницаемостью  $\varepsilon \approx 2 - 3$  в основном полимерные материалы: фторопласт, полиэтилен, полистирол. От выбранного материала зависят основные параметры ДР: размеры резонатора, рабочий диапазон частот, температурная стабильность характеристик.

Температурную стабильность характеристик ДР определяют через соответствующие температурные коэффициенты. Температурный коэффициент резонансной частоты ДР зависит от температурных изменений размеров резонатора, его диэлектрической проницаемости и проницаемости окружающей среды.

Для дисковых ДР из одноосных материалов с ориентацией геометрической оси вдоль кристаллографической следуя работе [9] можно получить следующее выражение для  $TKf_p$ :

$$TKf_p = -\frac{df_p}{da}TKa - \frac{df_p}{dL}TKL - \frac{K_{Q\varepsilon_{\parallel}}}{2}TK\varepsilon_{\parallel} - \frac{K_{Q\varepsilon_{\perp}}}{2}TK\varepsilon_{\perp} - \frac{K_{Q\varepsilon_2}}{2}TK\varepsilon_2, \quad (2)$$

где  $TKa$  – температурный коэффициент расширения диэлектрика вдоль радиуса диска,  $TKL$  – температурный коэффициент расширения диэлектрика по оси резонатора,  $K_{Q\varepsilon_{\parallel}} = -2\delta f / \delta\varepsilon_{\parallel}$ ,  $K_{Q\varepsilon_{\perp}} = -2\delta f_p / \delta\varepsilon_{\perp}$ ,  $K_{Q\varepsilon_2} = -2\delta f_p / \delta\varepsilon_2$  – коэффициенты добротности, равные отношению энергии осевой и поперечных компонент электрического поля в диэлектрике, энергии в среде с проницаемостью  $\varepsilon_2$  к полному запасу энергии резонатора,  $\delta f_p = \Delta f_p / f_p$  – относительное изменение резонансной частоты,  $\delta\varepsilon_{\parallel} = \Delta\varepsilon_{\parallel} / \varepsilon_{\parallel}$ ,  $\delta\varepsilon_{\perp} = \Delta\varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\perp}$  – относительные приращения компонент тензора диэлектрической проницаемости материала диска,  $\delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_2 / \varepsilon_2$  – относительное приращение диэлектрической проницаемости окружающей резонатор среды.

В случае изотропных материалов выражение (2) сводится к виду:

$$TKf_p = -TKl - \frac{K_{Q\varepsilon_1}}{2}TK\varepsilon_1 - \frac{K_{Q\varepsilon_2}}{2}TK\varepsilon_2,$$

где  $l$  – характерный размер резонатора,  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость материала резонатора.

Далее рассмотрим ряд наиболее часто используемых материалов для кольцевых и дисковых ДР:

*Фторопласт-4.* Параметры: диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 2,05 - 2,07$ ; тангенс угла потерь при комнатной температуре в миллиметровом диапазоне составляет  $tg\delta \approx 1,7 \cdot 10^{-4}$ . Температурный коэффициент резонансной частоты дискового ДР из фторопласта-4  $TKf_p = -4,5 \cdot 10^{-5}$  [1/град].

*Полиэтилен.* Параметры: диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 2,29$ . Тангенс угла потерь зависит от марки полиэтилена. Для полиэтилена низкой плотности в диапазоне частот  $f = (30 \dots 40)$  ГГц его значение составляет  $tg\delta \approx 1,4 \cdot 10^{-4}$ .

*Полистирол.* Параметры: диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 2,53$ . Тангенс угла потерь на частоте  $f \approx 10$  ГГц составляет  $tg\delta \approx 2,5 \cdot 10^{-4}$ . Температурный коэффициент резонансной частоты дисковых ДР из полистирола  $TKf_p \approx 0,8 \cdot 10^{-5}$  [1/град].

Кольцевые и дисковые ДР из полимерных материалов для различных применений имеют приемлемые размеры в миллиметровом диапазоне волн, в сантиметровом диапазоне практически не применяются. Использование диэлектриков с более высокой проницаемостью дает возможность уменьшить размеры резонаторов. Ряд таких достаточно распространенных диэлектриков с малыми потерями на СВЧ включает: плавленый и кристаллический кварц, поликор, иттрий-алюминиевый гранат  $Y_3Al_5O_{12}$ , лейкосапфир.

*Плавленый кварц (марка KB).* Параметры: диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 3,82$ . Тангенс угла потерь на частоте  $f \approx 10$  ГГц составляет  $tg\delta \approx 1,3 \cdot 10^{-4}$ . Температурный коэффициент резонансной частоты дискового ДР из плавленого кварца  $TKf_p \approx -1,1 \cdot 10^{-5}$  [1/град].

*Кристаллический кварц.* Кристаллический кварц относится к одноосным кристаллам и характеризуется двумя компонентами тензора диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{//}$ ,  $\varepsilon_{\perp}$ . Резонаторы изготавливают из кристаллического кварца таким образом, чтобы геометрическая ось резонатора совпадала с кристаллографической осью. Добротность дисковых ДР из кристаллического кварца в миллиметровом диапазоне волн становится сравнимой с добротностью лейкосапфировых резонаторов и составляет  $Q \approx 50 \cdot 10^4$ .

Значения компонент тензора  $\varepsilon_{//}$ ,  $\varepsilon_{\perp}$  кристаллического кварца при разных температурах представлены в таблице 1 [10].

Таблица 1. Компоненты  $\varepsilon_{//}$  и  $\varepsilon_{\perp}$  монокристалла  $\text{SiO}_2$  при температуре от 77 К до 303 К

Т, К	$\varepsilon_{//}$	$\varepsilon_{\perp}$	Т, К	$\varepsilon_{//}$	$\varepsilon_{\perp}$
77	4,6307	4,4256	193	4,6341	4,4272
83	4,6309	4,4257	203	4,6344	4,4274
93	4,6312	4,4258	213	4,6347	4,4275
103	4,6315	4,4259	223	4,6350	4,4277
113	4,6318	4,4261	233	4,6353	4,4279
123	4,6321	4,4262	243	4,6356	4,4281
133	4,6324	4,4263	253	4,6359	4,4283
143	4,6326	4,4265	263	4,6362	4,4286
153	4,6329	4,4266	273	4,6365	4,4288
163	4,6332	4,4268	283	4,6368	4,4291
173	4,6335	4,4269	293	4,6371	4,4294
183	4,6338	4,4270	303	4,6374	4,4297

Температурные коэффициенты компонент тензора диэлектрической проницаемости кристаллического кварца при  $T = 20^\circ \text{C}$  составляют  $TK \varepsilon_{//} = 6,469 \cdot 10^{-6}$  [1/град],  $TK \varepsilon_{\perp} = 6,772 \cdot 10^{-6}$  [1/град].

Тангенс угла диэлектрических потерь кристаллического кварца вдоль кристаллографической оси отличается от тангенса угла потерь в нормальном к оси направлении. На частоте  $f \approx 34$  ГГц при  $T = 20^\circ \text{C}$   $tg \delta_{//} = 1,75 \cdot 10^{-5}$ ,  $tg \delta_{\perp} = 3,06 \cdot 10^{-5}$  [11].

Для дисковых ДР из кристаллического кварца величина температурного коэффициента резонансной частоты в рабочем диапазоне частот составляет  $TKf_p \approx -1,8 \cdot 10^{-5}$  [1/град].

*Поликор.* Поликор – корундовая керамика на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (изотропный диэлектрик с малыми потерями на СВЧ), известна также под маркой ВК100-1. На частотах  $f \approx 10$  ГГц диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 9,6 - 9,7$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $tg \delta \approx 0,3 \cdot 10^{-4}$ .

*Иттрий-алюминиевый гранат.* Диэлектрическая проницаемость иттрий-алюминиевого граната  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  в диапазоне температур представлена таблице 2 [12].

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости граната при  $T=0^\circ \text{C}$   $TK\varepsilon = 9,457 \cdot 10^{-5}$  [1/град]. Добротность дисковых ДР из иттрий-алюминиевого граната на частотах  $f \approx 10$  ГГц оценивается величиной  $Q \approx 60 \cdot 10^3$ .

Таблица 2. Значения  $\varepsilon$  монокристалла  $Y_3Al_5O_{12}$  при температуре от 77 К до 303 К

Т, К	$\varepsilon$	Т, К	$\varepsilon$	Т, К	$\varepsilon$
77	10,436	153	10,472	233	10,536
83	10,438	163	10,479	243	10,545
93	10,441	173	10,486	253	10,554
103	10,445	183	10,493	263	10,564
113	10,449	193	10,501	273	10,574
123	10,454	203	10,509	283	10,584
133	10,460	213	10,518	293	10,594
143	10,466	223	10,527	303	10,604

*Лейкосапфир.* Наиболее высокие добротности в СВЧ диапазоне имеют дисковые и кольцевые ДР изготовленные из лейкосапфира с ориентацией геометрической оси вдоль кристаллографической. На частотах  $f \approx 10$  ГГц их добротность достигает  $1.7 \cdot 10^5$ . При продвижении в миллиметровый диапазон волн она снижается до уровня  $5 \cdot 10^4$ . Понижение добротности обусловлено увеличением тангенса угла потерь на высоких частотах. Зависимость  $Q^{-1}$  от частоты имеет линейный характер. Показатель качества резонаторов из лейкосапфира  $fQ$  наиболее высокий и составляет приблизительно  $2 \cdot 10^{15}$  Гц для производителей различных фирм.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости монокристалла  $Al_2O_3$  при различных температурах приведены в таблице 3 [13].

Таблица 3. Компоненты  $\varepsilon_{//}$  и  $\varepsilon_{\perp}$  монокристалла  $Al_2O_3$  при температуре от 93 К до 303 К

Т, К	$\varepsilon_{//}$	$\varepsilon_{\perp}$	Т, К	$\varepsilon_{//}$	$\varepsilon_{\perp}$
93	11,351	9,274	203	11,447	9,325
103	11,355	9,277	213	11,460	9,331
113	11,360	9,281	223	11,473	9,338
123	11,366	9,285	233	11,487	9,345
133	11,373	9,289	243	11,502	9,352
143	11,381	9,293	253	11,517	9,359
153	11,390	9,297	263	11,532	9,366
163	11,400	9,302	273	11,547	9,373
173	11,411	9,307	283	11,562	9,380
183	11,422	9,313	293	11,577	9,388
193	11,434	9,319	303	11,592	9,396

Температурные коэффициенты компонент тензора диэлектрической проницаемости лейкосапфира при  $T = 20^\circ C$  составляют  $TK \varepsilon_{//} = 1,296 \cdot 10^{-4}$  [1/град],  $TK \varepsilon_{\perp} = 0,852 \cdot 10^{-4}$  [1/град].

Для дисковых ДР из лейкосапфира величина измеренного температурного коэффициента резонансной частоты в рабочем диапазоне частот:  $TKf_p \approx - (6...7) \cdot 10^{-5}$  [1/град].

Тангенс угла диэлектрических потерь лейкосапфира вдоль кристаллографической оси отличается от тангенса угла потерь в нормальном к оси направлении. На частоте  $f \approx 10$  ГГц при  $T = 20^\circ C$   $tg \delta_{//} = 0,48 \cdot 10^{-5}$ ,  $tg \delta_{\perp} = 1,0 \cdot 10^{-5}$  [11].

Из приведенных данных видно, что самые высокие добротности в сантиметровом диапазоне волн характерны для дисковых ДР из лейкосапфира. Их добротность в миллиметровом диапазоне снижается и сравнима с добротностью резонаторов из кристаллического кварца. Резонаторы из полимерных материалов имеют более низкие добротности.

**Экранированные диэлектрические резонаторы.** В большинстве практических применений необходимо защищать ДР от воздействия различных внешних факторов, способных либо нарушить режим работы резонатора и устройства в целом, либо привести к нестабильности характеристик. Защита ДР от внешних факторов предполагает использование экранов. Наиболее оптимальной и широко применяемой является конструкция экранированного ДР с коаксиально расположенным диэлектрическим диском и отражающим экраном (рис. 2).

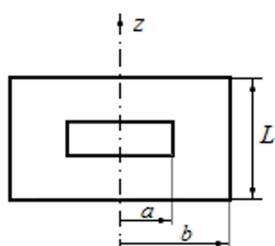


Рис. 2. Экранированный ДР

Рассматриваемая конструкция дает возможность разредить спектр колебаний при сохранении высокой (ограниченной лишь малым углом потерь диэлектрика) добротности рабочего колебания [14]. При этом высокая добротность обусловлена явлением запирания поля внутри диэлектрика. Интересно количественно исследовать это явление в зависимости от азимутального индекса  $n$  применительно к диэлектрическому диску из лейкосапфира. Далее будем считать, что экран изготовлен из меди с глубиной скин-слоя  $\Delta[\text{см}] = 6,6 / \sqrt{f[\text{ГГц}]}$ .

На рис. 3 и рис. 4 изображены зависимости  $Q_{\text{цикл}}(b)$  и  $f_p(b)$  для  $HE_{n,1,1}$  и  $EH_{n,1,1}$  колебаний экранированного ДР при разных  $n$ , начиная с  $n = 1$  и фиксированном радиусе диска  $a = 18$  мм. Высота экранирующей камеры  $L = 4$  см. Данная классификация типов колебаний соответствует обозначениям типов волн круглого ДВ [15]. Известно, что все волны круглого ДВ при  $n \neq 0$  являются гибридными, причем у  $HE$  - волн преобладает компонента поля  $E_z$ , а у  $EH$ -волн – компонента поля  $H_z$ . Если проявление резонанса трактовать как переотражение волн круглого ДВ от торцевых граней диска, естественно обозначить колебания ДР как  $HE_{n,m,l}$ , либо  $EH_{n,m,l}$ , где индексы  $n$ ,  $m$  и  $l$  равны числу вариаций поля по координатам  $\varphi$ ,  $\rho$ ,  $z$  соответственно.

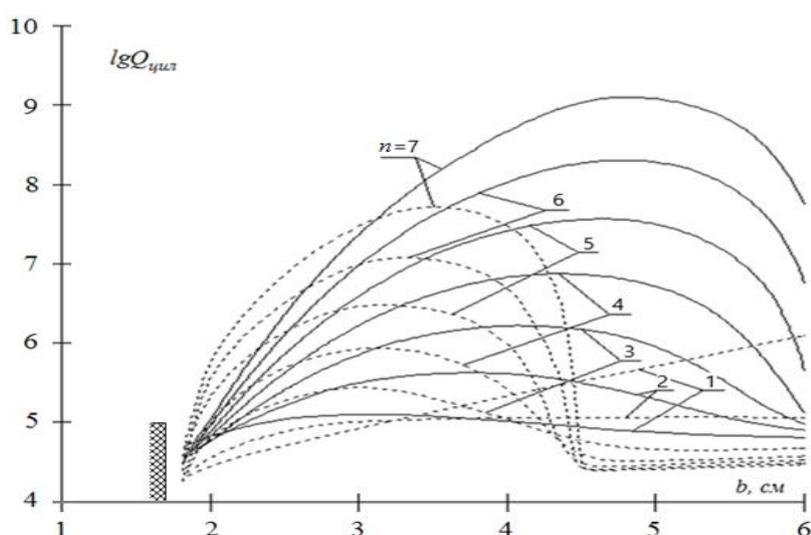


Рис. 3. Зависимости составляющей добротности  $Q_{\text{цикл}}$  от радиуса  $b$  экранирующей камеры: сплошные кривые –  $HE_{n,1,1}$ ; штриховые –  $EH_{n,1,1}$ ;  $L = 4$  см

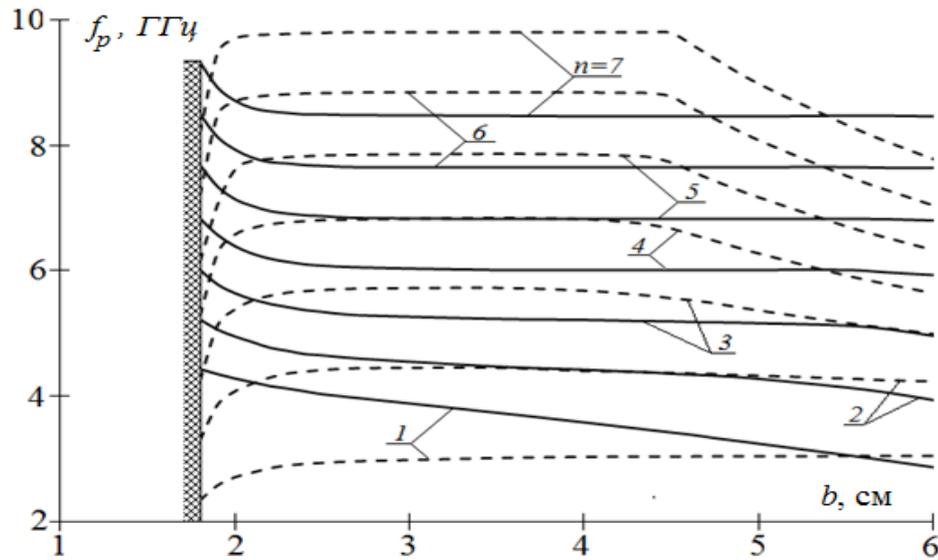


Рис. 4. Зависимости резонансной частоты от радиуса  $b$  экранирующей камеры: сплошные кривые – колебания  $HE_{n,1,1}$ ; штриховые – колебания  $EH_{n,1,1}$ ;  $L=4$  см

Ниже производится расчет резонансных частот выполняется по алгоритму, рассмотренному в работе [6].

Зависимости  $Q_{цил}(b)$  получены с использованием выражения из [14] по методу возмущений:

$$Q_{цил} = -\frac{b}{\Delta} \cdot \frac{1}{\delta f_p / \delta b} K_9,$$

где  $\Delta$  – глубина скин-слоя,  $\delta f_p = \Delta f_p / f_p$ ,  $\delta b = \Delta b / b$  – относительные приращения резонансной частоты и радиуса камеры,

$$K_9 = 1 - \int_0^L \varepsilon_0 \varepsilon |E_r(b, z)|^2 dz \Big/ \int_0^L \mu_0 \mu |H_\tau(b, z)|^2 dz,$$

$\varepsilon$ ,  $\mu$  – соответственно относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости заполняющей экранирующую камеру среды,  $E_r(b, z)$  – нормальная составляющая напряженности электрического поля на поверхности цилиндрической стенки,  $H_\tau(b, z)$  – тангенциальная составляющая магнитного поля на поверхности цилиндрической стенки,  $L$  – высота камеры.

Как и следует ожидать [16] зависимости  $Q_{цил}(b)$  имеют экстремальный характер, причем с ростом  $n$  экстремум становится все более ярко выраженным. Проявляющийся в этих зависимостях эффект запирания поля экранированных ДР внутри диэлектрика имеет общую физику с явлением высокодобротного резонанса в открытых ДР, поскольку и то и другое обусловлено малой величиной просачивания энергии через границу раздела диэлектрика при достаточно больших  $n$ .

Для реализации эффекта запирания в экранированных ДР необходимо выбрать оптимальный радиус экрана  $b_{опт}$ . Частота  $f_p$  при этом практически равна частоте соответствующего типа колебаний открытого ДР и заметно отличается от этого значения

лишь в области  $b \approx a$ , а также в области достаточно больших  $b$ . При  $n = 1$  экстремум для  $HE_{1,1,1}$  колебания выражен слабо, а для колебания  $EH_{1,1,1}$ , его нет совсем. Подобный характер зависимостей связан с явлением взаимодействия двух типов колебаний в экранированных резонаторах: колебаний непосредственно ДР и колебаний экранирующей камеры. Видно, что изломы в зависимостях  $Q_{цил}(b)$  для  $EH_{n,1,1}$  колебаний при  $b \approx 4,5$  см соответствуют перегибам кривых  $f_p(b)$  (см. рис. 4).

Характерно, что потери в цилиндрической стенке влияют на добротность колебаний резонатора аналогично вносимым потерям в связанных LC – контурах. Этим и объясняются высокие значения  $Q_{цил}$  по отношению к величине  $b/\Delta$ , которая определяет добротность колебаний воздушной полости  $E_{n10}$  за счет потерь в цилиндрической стенке.

Интересно отметить, что суммы  $lgb/\Delta + lgQ_{изл}$  в экстремальных точках зависимостей  $lgQ_{цил}(b)$  ( $Q_{изл}$  – добротность за счет потерь на излучение открытого ДР) отличаются от величины  $lg Q_{цил}$  для  $HE_{n,1,1}$  колебаний при различных  $n$  не более, чем на 1,5 %, т.е. влияние потерь в цилиндрической стенке экранирующей камеры на добротность  $Q$  уменьшено в  $Q_{изл}$  раз [14]. Данная взаимосвязь величин  $Q_{цил}$ ,  $Q_{изл}$ ,  $b/\Delta$  ранее наблюдалась и для экранированных цилиндрических ДР [16]. Отмеченное соотношение  $Q_{цил} \approx (b/\Delta) \cdot Q_{изл}$  позволяет оперативно оценивать предельно достижимую добротность экранированных дисковых ДР.

Из приведенных данных также следует, что для реализации высокодобротного резонанса в экранированных структурах можно использовать колебания с малым азимутальным индексом  $n$ , а сами дисковые ДР – с меньшими размерами по сравнению с открытыми ДР при одинаковом уровне добротности. Колебания с индексами  $m > 1$ ,  $l > 1$  при малых  $n$  практически не проявляются. Величина добротности для них существенно ниже.

Влияние потерь в торцевых стенках экранирующей камеры на добротность с увеличением азимутального индекса  $n$  резко убывает (рис. 5), что объясняется более высокой концентрацией электромагнитной энергии в диэлектрическом диске. При правильном выборе размера воздушной прослойки между диэлектрическим диском и торцевыми стенками экранирующей камеры снижения результирующей добротности не происходит.

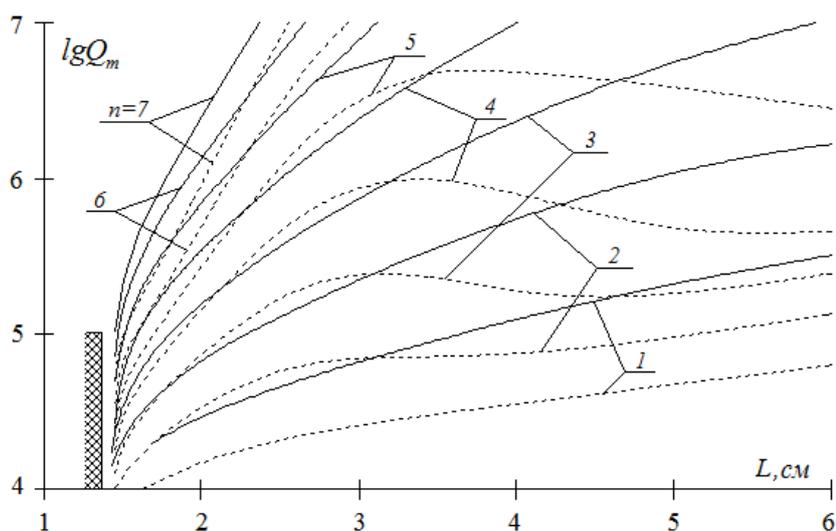


Рис. 5. Зависимость составляющей добротности  $Q_m$  от высоты экранирующей камеры  $L$ : сплошные кривые  $HE_{n,m,l}$ ; штриховые -  $EH_{n,m,l}$ ;  $b = 4$  см

Зависимости  $Q_m(L)$  получены с использованием выражения из [14]:

$$Q_m = -\frac{L}{\Delta} \cdot \frac{1}{\delta f_p / \delta L} \Delta \mu, \quad (3)$$

где  $\delta L = \Delta L/L$  – относительное изменение высоты экранирующей камеры,  $\Delta L$  – тонкие слои вблизи торцевых стенок камеры с магнитной проницаемостью  $\mu + \Delta \mu$ .

Поскольку значения  $Q_{цил}$ ,  $Q_m$  при правильном выборе размеров камеры достаточно велики, полная добротность резонатора будет определяться лишь потерями материала диска, т.е.  $Q \approx Q_d$ ,

$$Q_d = \left( K_{Q_{\epsilon_{\parallel}}} \operatorname{tg} \delta_{\parallel} + K_{Q_{\epsilon_{\perp}}} \operatorname{tg} \delta_{\perp} \right)^{-1},$$

где  $\delta_{\parallel}$ ,  $\delta_{\perp}$  – углы диэлектрических потерь материала диска в направлении оси  $z$  и нормальном оси  $z$  направлении, соответственно.

Коэффициент добротности  $K_Q = K_{Q_{\epsilon_{\parallel}}} + K_{Q_{\epsilon_{\perp}}}$  определяет отношение электромагнитной энергии, запасенной в диэлектрике, к общему запасу энергии резонатора. Для азимутальных индексов  $n > 3$  значение  $K_Q$  превосходит 0,9 и с увеличением  $n$   $K_Q \rightarrow 1$ .

Таким образом, в экранированных ДР при правильном выборе размеров камеры полная добротность резонатора зависит только лишь от тепловых потерь в диэлектрическом диске.

**Подстройка резонансных частот ДР.** Для ряда применений требуются резонаторы на заданную резонансную частоту. При известных размерах ДР резонансная частота  $f_p$  зависит от точности механической обработки, отклонений диэлектрической проницаемости используемых материалов. На практике особенно важно знать внесенные дополнительные потери элементами подстройки, что позволяет оценить уменьшение добротности ДР.

Рассмотрим возможности подстройки резонансной частоты за счет влияния металлической и диэлектрической поверхностей на ДР, рис. 6. Диск резонатора расположен в цилиндрическом металлическом экране. Вариант подстройки резонансной частоты с использованием металлической поверхности показан на рис. 6а, подстройка частоты путем изменения расстояния между диском и диэлектрической поверхностью – рис. 6б, между диском и диэлектрической пластиной – рис. 6в.

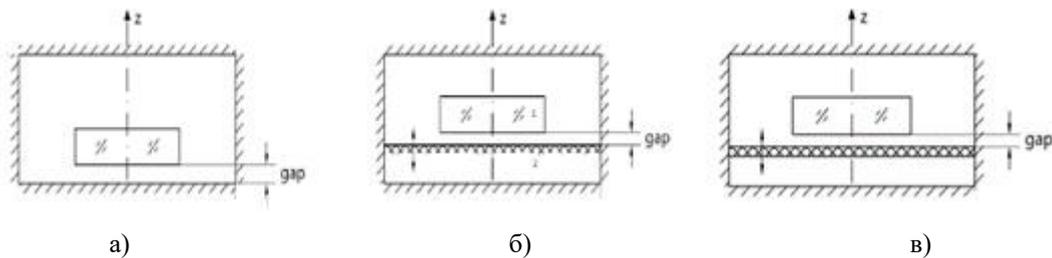


Рис. 6. Варианты подстройки резонансной частоты ДР

Метод анализа, представленный в работе [6], дает возможность определять основные характеристики экранированных ДР, в том числе исследовать многослойные диэлектрические структуры типа резонансной системы, состоящей из двух дисков, структуры «диск – диэлектрическая подложка» и др.

Поля резонатора представляются в виде бесконечных сумм цилиндрических  $E$  – и  $H$  – волн соответствующих частичных областей. Сшивание полей на границах областей приводит к системе интегро-дифференциальных уравнений, а после преобразований методом Галеркина к системе линейных алгебраических уравнений. Резонансным частотам соответствуют нули определителя системы уравнений.

Рассмотрим влияние металлической поверхности на резонансную частоту и добротность ДР (рис. 6а). Составляющая добротность  $Q_m$  за счет влияния торцевой металлической стенки зависит от глубины скин-слоя  $\Delta$ :

$$Q_m = \frac{2}{\Delta} \cdot \frac{\int \mu |\vec{H}|^2 dv}{\int_s \mu |H_\tau|^2 ds} = \frac{\omega \mu_0}{R_s} \cdot \frac{\int \mu |\vec{H}|^2 dv}{\int_s \mu |H_\tau|^2 ds} = \frac{G}{R_s},$$

где  $H_\tau$  – тангенциальная составляющая магнитного поля на поверхности стенки,  $s$  – площадь металлических стенок,  $R_s = \omega \mu_0 \Delta / 2$  – поверхностное сопротивление металла,  $G$  – геометрический фактор:

$$G = \omega \mu_0 \mu \cdot \frac{\int \mu |\vec{H}|^2 dv}{\int_s \mu |H_\tau|^2 ds}.$$

Ранее полученное выражение для  $Q_m$  (3), полученное по методу возмущений, запишем в виде:

$$Q_m = - \frac{L}{R_s} \pi f_p \mu_0 \frac{1}{\delta f_p / \delta L} \Delta \mu = \frac{G}{R_s},$$

где  $\delta L = \Delta L / L$  – относительное изменение высоты экранирующей камеры,  $\Delta L$  – тонкий слой вблизи нижней торцевой стенки камеры с магнитной проницаемостью  $\mu + \Delta \mu$ .

На рис. 7 показаны зависимости  $f_p(gap)$ ,  $Q_m(gap)$   $HE_{8,1,1}$ ,  $EH_{8,1,1}$  колебаний дискового ДР из лейкосапфира. Размеры диэлектрического диска: диаметр  $2a = 36$  мм, высота 14 мм. Радиус экранирующей камеры из меди  $b = 4$  см, высота  $L = 4$  см. Добротность за счет потерь в цилиндрической стенке камеры  $Q_{wall} > 10^8$ . Величина зазора  $gap$  между диском и нижней торцевой стенкой камеры изменяется в диапазоне 0,1 ... 2,2 мм.

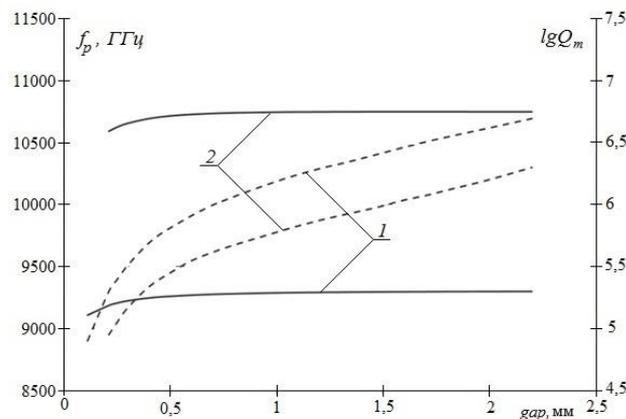


Рис. 7. Зависимости  $f_p(gap)$ ,  $Q_m(gap)$   $HE_{811}$  (кривая 1),  $EH_{811}$  (кривая 2) колебаний экранированного ДР: сплошные кривые –  $f_p$ ; штриховые –  $Q_m$

При варьировании зазора  $gap$  наблюдается плавное изменение резонансной частоты. В области малых зазоров крутизна зависимости возрастает. Диапазон перестройки резонатора для  $HE_{8,1,1}$  колебания при изменении  $gap$  от 0,2 до 2,2 мм составляет около 1,29 %. Величина  $Q_m$  при  $gap > 0,7$  мм превышает уровень  $10^6$ . Значения  $Q_m$  (добротности, связанной с потерями в нижней торцевой стенке экрана) рассчитаны для экрана из меди.

Для  $EH_{8,1,1}$  колебания заметное влияние на  $f_p$  нижняя торцевая стенка экрана оказывает при величине зазора  $gap < 1,2$  мм. Однако, при этом внесенные потери металла превосходят потери для колебания  $HE_{811}$  (добротность  $Q_m$  меняется в пределах  $10^5 \dots 10^6$ ). Диапазон перестройки резонатора при изменении  $gap$  от 0,2 до 2,2 мм составляет 1,46 %.

Зависимости геометрического фактора  $G$  от величины зазора для  $HE_{811}$  и  $EH_{811}$  колебаний показаны на рис. 8. Видно, что значение фактора  $G$  в диапазоне изменения  $gap$  от 0,4 до 2,3 мм для  $HE_{811}$  колебания в 2...2,5 раза превосходят значение  $G$  для  $EH_{811}$  колебания. Как уже отмечалось, это связано с более низким уровнем внесенных потерь металла для колебания  $HE_{811}$ . Интересно отметить, что зависимости  $G(gap)$  в области изменения параметра  $gap = 0,5 \dots 1$  мм близки к линейным.

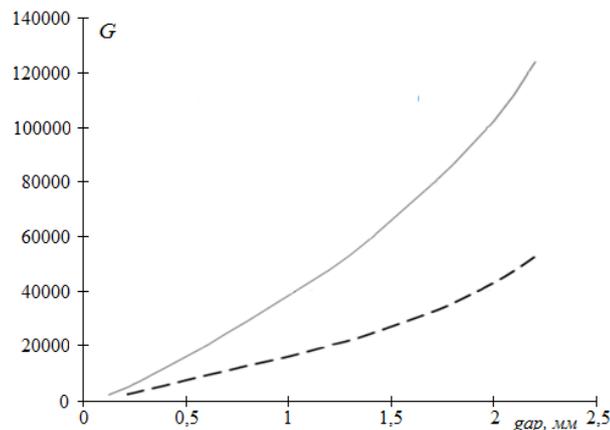


Рис. 8. Зависимости геометрического фактора  $G$  от величины зазора  $gap$ :  
сплошная кривая –  $HE_{811}$ ; штриховая –  $EH_{811}$

При перестройке частоты дисковых ДР с использованием диэлектрической плоскости, расположенной параллельно торцевой поверхности диска, рис. 6б, необходимо контролировать величину внесенных дополнительных потерь в материале диэлектрика. Данные потери можно определить по известной концентрации электромагнитного поля во внешнем диэлектрике (область 2).

Составляющую добротности за счет потерь в материале внешнего диэлектрика напишем в виде:

$$Q_s^{-1} = K_{Q_s} \operatorname{tg} \delta_s,$$

где  $K_{Q_s}$  – коэффициент добротности,  $\delta_s$  – угол диэлектрических потерь внешнего диэлектрика.

Выражение для коэффициента добротности определяется через относительное изменение резонансной частоты при варьировании диэлектрической проницаемости [17]:

$$K_{Q_s} = W_{zans} / W_{zan} = -2\delta f_p / \delta \epsilon_s, \quad (4)$$

где  $W_{зans}$  – энергия, запасенная в материале диэлектрика (область 2),  $W_{зан}$  – полная энергия, запасенная резонатором,  $\delta f_p = \Delta f_p / f_p$  – относительное изменение резонансной частоты,  $\delta \varepsilon_s = \Delta \varepsilon_s / \varepsilon_s$  – относительное приращение диэлектрической проницаемости,  $\varepsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость области 2.

На рис. 9 и рис. 10 представлены зависимости  $f_p(gap)$ ,  $K_{Q_s}(gap)$ . Радиус экранирующей камеры  $b = 4$  см, высота  $L = 4$  см. Вычисления проведены для диэлектриков с относительно малыми потерями на СВЧ: фторопласт-4 ( $\varepsilon_s = 2,05$ ), плавленый кварц ( $\varepsilon_s = 3,82$ ). Видно, что диапазон перестройки резонансной частоты с увеличением проницаемости внешнего диэлектрика возрастает. Соответственно, при  $\varepsilon_s = 2,05$  он примерно составляет 0,25% для  $HE_{811}$  и 0,27% для  $EH_{811}$  колебания, при  $\varepsilon_s = 3,82$ , соответственно 0,74% и 1,12%. Концентрация электромагнитной энергии во внешнем диэлектрике зависит от зазора  $gap$  – с уменьшением зазора возрастает. Для зазоров близких нулю её величина: при  $\varepsilon_s = 2,05$  1,1% для  $HE_{811}$  и 2,8% для  $EH_{811}$  колебания, соответственно при  $\varepsilon_s = 3,82$  - 2,9% и 7,6%.

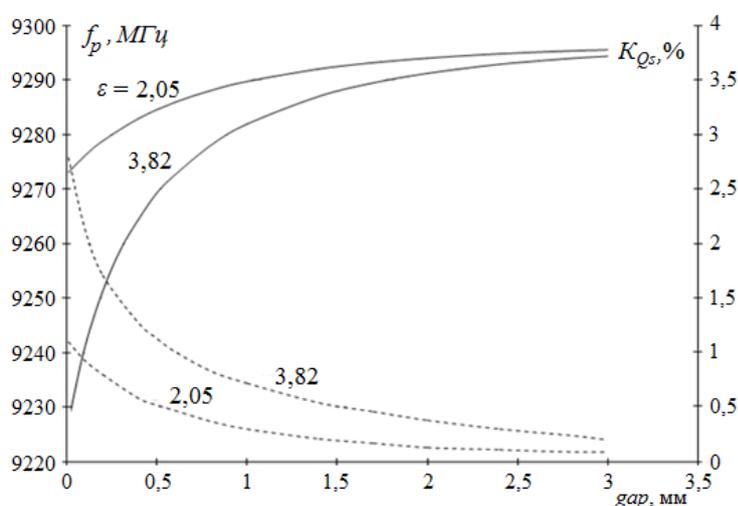


Рис. 9. Зависимости  $f_p(gap)$ ,  $K_{Q_s}(gap)$   $HE_{811}$  колебания: сплошные кривые –  $f_p$ ; штриховые –  $K_{Q_s}$

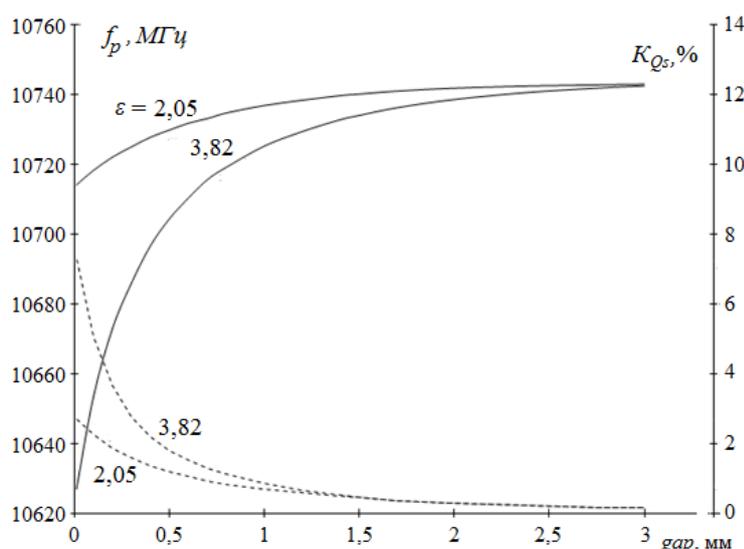


Рис. 10. Зависимости  $f_p(gap)$ ,  $K_{Q_s}(gap)$   $EH_{811}$  колебания: сплошные кривые –  $f_p$ ; штриховые –  $K_{Q_s}$

Вариант перестройки частот экранированного ДР с использованием диэлектрических пластин показан на рис. 6в. Коэффициент добротности  $K_{Q_s}$  определяется в соответствии с соотношением (4). Вычисления выполнены для пластин толщиной 1,5 мм из диэлектриков с относительно малыми потерями на СВЧ: фторопласт-4 ( $\epsilon_s = 2.05$ ), плавный кварц ( $\epsilon_s = 3,82$ ), поликор ( $\epsilon_s = 9,60$ ). На рис. 11 представлены  $f_p(gap)$ ,  $K_{Q_s}(gap)$  колебания  $HE_{811}$  экранированного ДР. Видно, что диапазон перестройки резонансной частоты с увеличением диэлектрической проницаемости пластин возрастает. Соответственно, при  $\epsilon_s = 2.05$  он примерно составляет 0.17 %, при  $\epsilon_s = 3.83$  – 0.46 %, при  $\epsilon_s = 9.60$  – 1.46 %. Крутизна зависимостей  $f_p(gap)$  при малых зазорах для пластин из разных материалов резко отличается – с увеличением проницаемости пластин возрастает. Концентрация электромагнитной энергии в пластинах, заданная через коэффициент  $K_{Q_s}$ , как видно из рис. 11, зависит от величины зазора – с уменьшением  $gap$  возрастает. Для зазоров близких нулю ее величина приблизительно составляет: 0,4 % ( $\epsilon_s = 2,05$ ), 1,2 % ( $\epsilon_s = 3,82$ ), 3,2 % ( $\epsilon_s = 9,60$ ).

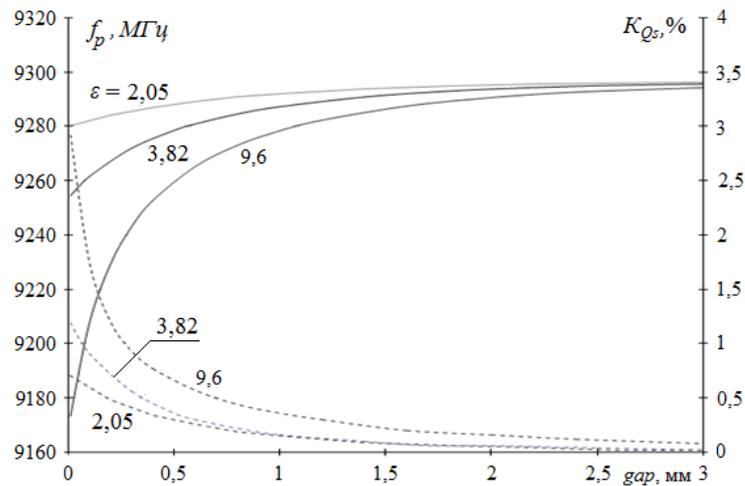


Рис. 11. Зависимости  $f_p(gap)$ ,  $K_{Q_s}(gap)$   $HE_{811}$  колебания: сплошные кривые –  $f_p$ ; штриховые –  $K_{Q_s}$

Зависимости  $f_p(gap)$ ,  $K_s(gap)$  колебания  $EH_{811}$  экранированного ДР приведены на рис. 12.

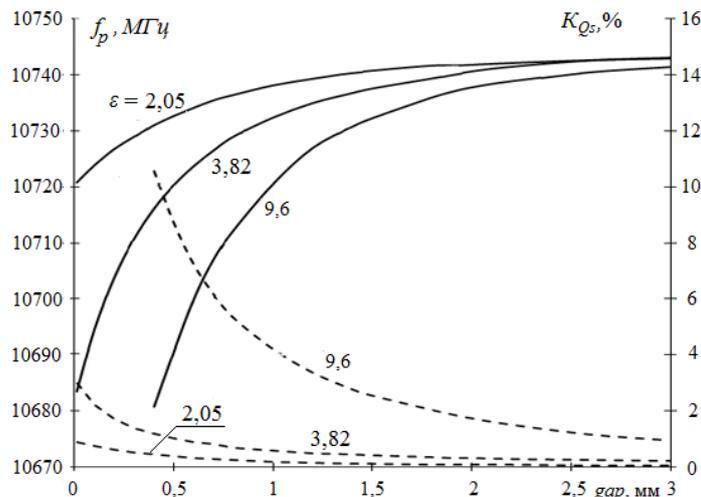


Рис. 12. Зависимости  $f_p(gap)$ ,  $K_{Q_s}(gap)$   $EH_{811}$  колебания: сплошные кривые –  $f_p$ ; штриховые –  $K_{Q_s}$

Диапазон перестройки приблизительно соответствует (несколько превосходит) диапазону для  $HE_{811}$  колебания. При  $\varepsilon_s = 2,05$  он составляет 0,21 %, при  $\varepsilon_s = 3,82$  - 0,53 %. Наблюдаемая концентрация энергии в пластинах заметно выше, особенно для  $\varepsilon_s = 3,82$ ; 9,60. В случае пластины из поликора ( $tg\delta_{пол} \approx 10^{-4} \dots 10^{-5}$ ) вклад потерь становится соизмеримым с потерями в лейкосапфировом диске.

**Выводы.** Представленный краткий обзор по диэлектрическим материалам, свойствам экранированным дисковым ДР с колебаниями высокого порядка, способам подстройки резонансных частот ДР позволяет оценить целесообразность использования резонаторов в различных устройствах миллиметрового и сантиметрового диапазонах волн.

Оценка возможности подстройки резонансных частот при условии малых внесенных потерь в резонатор весьма актуальна, поскольку механическая подгонка частот ДР особенно из кристаллических материалов является сложной и дорогостоящей процедурой.

В практическом плане приведенный анализ позволяет выбрать оптимальные размеры экранирующей камеры резонатора, спроектировать элементы подстройки резонансных частот.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Richtmyer, R. D. Dielectric resonators / R. D. Richtmyer // Journal of applied physics. – 1939. – V. 10. – P. 391–398.
2. Wait, J. R. Electromagnetic whispering gallery modes in a dielectric rod / J. R. Wait // Radio science. – 1967. – V. 2. – № 9. – P. 1005–1017.
3. Власов, С. Н. О колебаниях «шепчущей галереи» в открытых резонаторах с диэлектрическим стержнем / С. Н. Власов // Радиотехника и электроника. – 1967. – Т. 12. – № 3. – С. 572–573.
4. Добромыслов, В. С. Диэлектрические резонаторы с волнами «шепчущей галереи» / В. С. Добромыслов, В. Ф. Взятыхшев // Труды МЭИ. – 1973. – Вып. 161. – С. 78–84.
5. Веселов, Г. И. Применение метода частичных областей к задаче о собственных колебаниях диэлектрического резонатора / Г. И. Веселов, А. В. Гуреев // Электронная техника. Сер. Микроэлектронные устройства. – 1982. – Вып. 2(32). – № 11. – С. 11–18.
6. Добромыслов, В. С. Расчет спектра собственных колебаний экранированных диэлектрических резонаторов / В. С. Добромыслов, В. И. Калинин, А. В. Крюков // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1990. – Т. 33. – № 9. – С. 1068–1077.
7. Добромыслов, В. С. Радиационная добротность дисковых диэлектрических резонаторов / В. С. Добромыслов, А. В. Крюков // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36. – №10. – С. 2040–2045.
8. Добромыслов, В. С. Метод эффективной диэлектрической проницаемости для анализа мод шепчущей галереи в дисковых диэлектрических резонаторах / В. С. Добромыслов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 11–22. – EDN PNPXPF.
9. Взятыхшев, В. Ф. О термостабильности диэлектрических резонаторов / В. Ф. Взятыхшев, В. С. Добромыслов // Труды МЭИ. – 1977. – Вып. 341. – С. 59–62.
10. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 277-2011. Кварц монокристаллический. Компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне температур 77...373 К / В. Н. Егоров, М. В. Кашенко, В. Л. Масалов, Е. Ю. Токарева. – М., 2011. – 13 с., деп. в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 02.06.2011, № 869-2011 кк.
11. Егоров, В. Н. Анизотропия диэлектрических потерь в монокристаллах  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  / В. Н. Егоров, В. Л. Масалов, И. Б. Ожогов // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – Вып. 23. – С. 23–31.
12. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 278-2011. Гранат иттрий-алюминиевый. Относительная диэлектрическая проницаемость в диапазоне температур 77...373 К / В. Н. Егоров, М. В. Кашенко, В. Л. Масалов, Е. Ю. Токарева. – М., 2011. – 11 с., деп. в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 02.06.2011, № 870-2011 кк.
13. Егоров, В. Н. Измерение тензора диэлектрической проницаемости сапфира при температуре от 93 до 343 К / В. Н. Егоров, А. С. Воловиков // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44. – № 11. – С. 960–966.

14. Добромыслов, В. С. Добротность экранированных диэлектрических резонаторов / В. С. Добромыслов, А. В. Крюков // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37. – №1. – С. 2125–2133.
15. Взятыхшев, В. Ф. Диэлектрические волноводы / В. Ф. Взятыхшев. – М.: Изд-во Сов. Радио, 1970. – 216 с.
16. Экранированные диэлектрические резонаторы с азимутальными колебаниями / В. Ф. Взятыхшев, В. С. Добромыслов, В. И. Калинин, В. И. Куимов // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30. – № 1. – С. 79– 88.
17. Добромыслов, В. С. Резонансные СВЧ-устройства / В. С. Добромыслов. – М.: МЭИ, 1995. – 122 с.

*Поступила в редакцию 26.03.2024 г., рекомендована к печати 10.04.2024 г.*

## HIGH-ORDER MODES IN DIELECTRIC RESONATORS

*Dobromyslov V.S.*

High-order modes dielectric resonators (DR) are also known as whispering gallery modes resonators or azimuthal modes resonators. They are used in the range of millimeter and centimeter waves in microwave generators with a low level of phase noise, in frequency discriminators, in the study of thin-film materials and in high-precision measurements of dielectric parameters with low losses. A list of dielectric materials with low permittivity  $\epsilon \simeq 2 - 20$  and little loss for ring and disk DR is presented. The main properties of shielded DR are analyzed. The effect of the screen on the resonant frequency and  $Q$ -factor of the resonators is considered. The possibilities of tuning resonant frequencies using metallic and dielectric surfaces have been investigated.

**Keywords:** dielectric resonators, dielectric materials, resonant frequency, concentration of electromagnetic energy, gap,  $Q$ -factor, geometric factor.

### **Добромыслов Владимир Сергеевич**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», ведущий научный сотрудник ООО «Радиокомп», Российская Федерация, г. Москва.  
E-mail: mpei-dvs@mail.ru

### **Dobromyslov Vladimir Sergeevich**

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Formation and Processing of Radio Signals of National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Leading Researcher of Radiocomp LLC, Russian Federation, Moscow.

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНТРОЛЬ ПЬЕЗОСВОЙСТВ

© 2024 Спиридонов Н.А., Сидак И.Л.

---

Приведены результаты исследований влияния режимов высоковольтной поляризации пьезокерамических элементов твёрдых растворов цирконата-титаната свинца на пьезоэлектрические свойства. Показано, что свойствами поляризованных пьезокерамических элементов можно управлять не только изменяя химический состав керамического материала, но и варьируя режимы процесса поляризации.

**Ключевые слова:** высоковольтная поляризация, пьезокерамический элемент, сегнетоэлектрик, пьезоэлектрическая керамика, цирконат-титанат свинца, диэлектрическая проницаемость пьезосвойств.

---

**Введение.** Широкое применение пьезокерамических элементов в различных областях науки и техники основано на необычайно широком сочетании физических свойств сегнетоэлектриков. К настоящему времени в мире разработано и производится большое количество промышленных марок пьезоматериалов различного назначения [1, 2]. Наибольшее распространение получили пьезоматериалы на основе твёрдых растворов цирконата-титаната свинца  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$  (ЦТС) с соотношением  $Zr/Ti$  около 0,52/0,48 и расположенные в центре, так называемой, морфоторопной области – области сосуществования ромбоэдрической и тетрагональной фаз [2-4]. В этой области керамика обладает максимальным уровнем пьезосвойств [4]. Введение легирующих добавок позволяет целенаправленно изменять свойства пьезоэлементов в широких пределах. В большинстве случаев промышленные марки пьезоматериалов на основе ЦТС являются высоколегированными, то есть содержат большое количество добавок. Растущие потребности науки и техники придают актуальность разработки новых высокоэффективных пьезокерамических материалов, а также совершенствованию технологии их производства. Возникают ситуации, когда для разработки нового устройства с использованием пьезокерамических элементов известные промышленные марки являются малопригодными по техническим характеристикам, и возникает необходимость в получении новых материалов с требуемыми свойствами.

Разработка технологии изготовления новых пьезоматериалов и пьезокерамических элементов с требуемым комплексом свойств связана с большими затратами как времени, так и средств, что зачастую является крайне неудобной.

Так как процесс изготовления пьезокерамических элементов является многостадийным, то возникает вопрос возможности управления свойствами пьезоэлемента путём корректировки параметров технологии без изменения химического состава керамики. В качестве такого технологического процесса был выбран технологический процесс поляризации пьезокерамических элементов. В качестве объекта исследования использовали нелегированные и слаболегированные материалы двух составов:  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3$  и  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3 + 0,25\%$  моль  $MnO_2$ .

**Методика изготовления образцов.** Для аттестации пьезосвойств синтезированных нанодисперсных порошков пьезокерамических материалов составов:  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3$  и  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3 + 0,25\%$  моль  $MnO_2$  изготовили пьезокерамические элементы.

Из синтезированных материалов по разработанной ранее методике, готовили пресс-крупку, состоящую из керамического нанодисперсного порошка и органического связующего. Заготовки в виде дисков диаметром около 12 мм и толщиной около 1,8 – 2,0 мм формовали методом одноосного прессования в стальной пресс-форме при давлении 6 – 7 т/см<sup>2</sup>. Далее заготовки укладывали в алундовый тигель и засыпали свинецсодержащей атмосферообразующей засыпкой, которая предотвращала улетучивание паров оксида свинца при спекании, и стехиометрия керамики не нарушалась [5].

Спекание проводили на воздухе в камерной печи (КО-14) с карбидокремниевыми нагревателями. Для предотвращения растрескивания спрессованных керамических заготовок при спекании, скорость нагрева от комнатной температуры и до 400°C не превышала 100°C/ч. Далее температуру поднимали со скоростью 200°C/ч. При достижении температуры спекания осуществляли выдержку в течение 2-х часов, а затем печь выключали. Охлаждение спеченных заготовок до комнатной температуры происходило вместе с печью. Спеченные керамические заготовки шлифовали до толщины 1 мм, а затем отжигали при температуре 950°C в течение одного часа. После обжига измеряли пористость и плотность спеченных керамических заготовок. Электроды наносили методом вжигания серебряной пасты при температуре 800±20°C. Далее проводили исследования влияния режимов поляризации на свойства пьезокерамики.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных процессам поляризации пьезокерамических элементов, нет единого обоснованного подхода к выбору оптимального режима поляризации. Также не разработаны научные основы создания стабильного поляризованного состояния с высоким уровнем пьезосвойств. Это связано с многообразием процессов, происходящих в пьезокерамике и существенно зависящих от основного химического состава и примесей, микроструктуры, температуры поляризации, напряженности поляризующего электрического поля, времени поляризации, фазового состава (например, смесь ромбоэдрической и тетрагональной и других фаз в морфоторопной области) и многого другого [4, 6].

Цель работы – экспериментальные исследования влияния режимов поляризации пьезокерамических элементов на пьезоэлектрические свойства.

Известные и используемые на практике методы поляризации можно условно разделить на три основные группы:

- Высоковольтная поляризация в постоянном электрическом поле напряженностью (3 – 5 кВ/мм) с последующим охлаждением в электрическом поле до комнатной температуры. Чем выше температура поляризации, тем ниже коэрцитивное поле и, как следствие, эффективнее процесс поляризации.

- Низковольтная поляризация, заключающаяся в том, что пьезоэлемент нагревают до температуры выше точки Кюри, а затем включают постоянное поляризующее электрическое поле, напряженностью не выше 1 кВ/мм. При медленном охлаждении пьезоэлемента в постоянном электрическом поле от температуры выше точки Кюри и до комнатной, зарождаются домены сегнетоэлектрической фазы, которые ориентируются вдоль приложенного электрического поля. При таком способе поляризации достигается максимальная ориентация доменов вдоль электрического поля.

- Поляризация в пульсирующих электрических полях производится при температурах ниже точки Кюри. Поляризующее электрическое поле может быть в виде

импульсов различной формы, в том числе и при одновременном наложении постоянного электрического поля. После выдержки пьезоэлемента в электрическом пульсирующем поле при заданной температуре, выключают нагрев, и охлаждение до комнатной температуры осуществляется в электрическом поле.

Каждый метод поляризации требует выбора оптимальных значений напряженности электрического поля, температуры и времени выдержки под полем, а также способа охлаждения пьезоэлемента. Вопрос их подбора неизбежно возникает при поиске и разработке, как новых пьезокерамических материалов, так и изделий из них.

При выборе метода поляризации пьезокерамических элементов на основе твёрдых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС) прежде всего, необходимо учитывать особенности её поведения в электрических полях высокой напряженности и при повышенных температурах. Одной из особенностей пьезокерамики ЦТС является её повышенная электропроводность при температурах в окрестностях фазового перехода из сегнето – в параэлектрическое состояние и выше. Поэтому поляризацию пьезоэлементов, как правило, проводят при температурах ниже точки Кюри в электрических полях напряженностью 3 – 4 кВ/мм. Как показывает наш богатый опыт работы с пьезоматериалами ЦТС, использование методов поляризации низковольтной и пульсирующей, приводит в большинстве случаев к заниженному уровню пьезосвойств и поэтому мы редко его используем.

На основании вышеизложенного, нами выбран высоковольтный метод поляризации в постоянном электрическом поле напряженностью 3 – 5 кВ/мм в диапазоне температур от комнатной и до 150°C.

Поляризацию пьезокерамики проводили в разработанном и изготовленном нами поляризующем устройстве, в котором можно устанавливать заданную температуру в диапазоне от комнатной и до 200°C. В качестве диэлектрической жидкости, предотвращающей электрический пробой по краю пьезоэлемента в процессе его поляризации, использовали кремнийорганическую полиэтилсилоксановую жидкость ПЭС – 5. В качестве источника высокого напряжения использовали высоковольтный источник ВС – 23, позволяющий плавно устанавливать выходное напряжение до 10 кВ.

Так как в процессе поляризации может произойти электрический пробой пьезоэлемента, то для предотвращения выхода из строя высоковольтного источника в результате короткого замыкания, последовательно с каждым поляризуемым пьезоэлементом включён высоковольтный резистор сопротивлением 10 МОм. В этом случае, если даже в процессе поляризации на каком-либо пьезоэлементе произойдет короткое замыкание, то это никак не скажется на процессе поляризации остальных пьезоэлементов. Изготовленная установка позволяет одновременно поляризовать до 18 шт. пьезоэлементов.

#### **Исследование влияния режимов поляризации на свойства пьезокерамики.**

Исследование влияния режимов поляризации пьезоэлементов на их электрофизические свойства проводили на стандартных образцах, изготовленных из нанодисперсных пьезокерамических материалов двух составов –  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3$  и  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3 + 0,25\%$  моль  $MnO_2$ , по методике, описанной в стандарте [7]. На стандартных образцах были проведены исследования по влиянию режимов поляризации на пьезоэлектрические свойства пьезоэлементов. Поляризацию проводили при температурах ( $t, ^\circ C$ ), начиная от комнатной ( $\approx 20^\circ C$ ) и до 150°C с выдержкой ( $\tau$ , мин) от 15 до 60 минут. Напряженность постоянного электрического поля ( $E$ , кВ/мм) составляла от 3 до 5 кВ/мм. Также изменяли и условия охлаждения образцов до комнатной температуры – под электрическим полем и без электрического поля.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты исследований влияния режимов поляризации на свойства пьезокерамических элементов.

Таблица 1. Влияние режимов поляризации на свойства пьезокерамики, полученной из нанодисперсных порошков состава  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3$

E, кВ/мм	t, °C	τ, мин.	Условия охлаждения	$\xi_{T33}^T/\xi_0$	tgδ	K <sub>p</sub>	Q <sub>m</sub>	d <sub>31</sub> *10 <sup>12</sup> , Кл/Н
4	≈ 20	60	—	1380	0,0032	0,43	385	98
4	≈ 20	30	—	1410	0,0026	0,34	380	90
5	≈ 20	30	—	1440	0,0030	0,37	445	85
4	100	60	под полем	1180	0,0045	0,56	520	130
4	100	30	-//-	1120	0,0030	0,565	450	121
4	100	15	-//-	1230	0,0032	0,565	450	119
4	100	60	без поля	1240	0,0026	0,56	505	123
4	100	30	-//-	1300	0,0026	0,56	500	125
4	100	15	-//-	1270	0,0028	0,56	490	123
3	100	60	под полем	1200	0,0032	0,56	485	119
3	100	30	-//-	1250	0,0028	0,56	510	122
3	100	15	-//-	1270	0,0027	0,56	460	125
4	150	60	без поля	1370	0,0040	0,55	460	130
4	150	30	-//-	1320	0,0045	0,55	455	130
4	150	15	-//-	1500	0,0032	0,53	430	124
4	150	60	под полем	1140	0,0028	0,56	520	119
4	150	30	-//-	1180	0,0028	0,56	520	119
4	150	15	-//-	1200	0,0027	0,57	430	124
3	150	60	под полем	1190	0,0026	0,55	485	118
3	150	30	-//-	1200	0,0027	0,55	485	120
3	150	15	-//-	1320	0,0034	0,53	470	119

Таблица 2. Влияние режимов поляризации на свойства пьезокерамики, полученной из нанодисперсных порошков состава  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3 + 0,25\%$  моль  $MnO_2$

E, кВ/мм	t, °C	τ, мин.	Условия охлаждения	$\xi_{T33}^T/\xi_0$	tgδ	K <sub>p</sub>	Q <sub>m</sub>	d <sub>31</sub> *10 <sup>12</sup> , Кл/Н
4	≈ 20	60	—	1460	0,0025	0,44	815	120
4	≈ 20	30	—	1500	0,0020	0,35	810	110
5	≈ 20	30	—	1525	0,0023	0,38	940	105
4	100	60	под полем	1250	0,0035	0,58	1100	160
4	100	30	-//-	1260	0,0028	0,58	1080	140
4	100	15	-//-	1300	0,0025	0,57	950	146
4	100	60	без поля	1312	0,0021	0,56	1060	151
4	100	30	-//-	1375	0,0021	0,56	1050	154
4	100	15	-//-	1350	0,0022	0,56	1040	151
3	100	60	под полем	1270	0,0025	0,56	1025	146
3	100	30	-//-	1325	0,0022	0,56	1080	150
3	100	15	-//-	1350	0,0021	0,56	970	154
4	150	60	без поля	1450	0,0031	0,56	970	160
4	150	30	-//-	1400	0,0035	0,56	965	159
4	150	15	-//-	1580	0,0025	0,55	915	152
4	150	60	под полем	1210	0,0022	0,56	1100	146
4	150	30	-//-	1250	0,0022	0,56	1100	146
4	150	15	-//-	1270	0,0021	0,57	915	152
3	150	60	под полем	1260	0,0020	0,56	1030	145
3	150	30	-//-	1275	0,0021	0,56	1030	147
3	150	15	-//-	1400	0,0026	0,54	990	147

Эффективность поляризации оценивали по измерениям таких пьезосвойств, как  $\xi_{33}^T/\xi_0$  – диэлектрическая проницаемость,  $\text{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь,  $K_p$  – коэффициент электромеханической связи радиальной моды колебаний,  $Q_m$  – механическая добротность планарной моды колебаний,  $d_{31}$  – планарный пьезоэлектрический модуль по методике в соответствии с отраслевым стандартом [7].

Как следует из таблицы 1, поляризация при комнатной температуре в электрических полях 4 – 5 кВ/мм и выдержке 30 – 60 мин не эффективна – сильно занижены значения  $K_p$  и  $d_{31}$ . Поляризация при температуре 100°C в течение 30 – 60 мин. и напряженности постоянного электрического поля 3 – 4 кВ/мм приводит к близким результатам. Практически то же можно сказать и о поляризации при 150°C в течение 30 – 60 мин. Уменьшение времени поляризации до 15 минут не целесообразно, так как значения механической добротности занижены. Наилучшие результаты в этой серии опытов получены при поляризации в режиме: температура 100 – 150°C, время выдержки 30 – 60 мин. при напряженности постоянного электрического поля 4кВ/мм и охлаждение образцов под этим полем до комнатной температуры. Поляризация электрическим полем напряженностью 5 кВ/мм нецелесообразна, так как при нагреве велика вероятность разрушения пьезоэлементов в результате их электрического пробоя.

В таблице 2 приведены пьезоэлектрические свойства слаболегированной керамики состава  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3+0,25\%$  моль  $MnO_2$  в зависимости от режимов поляризации. Из таблицы видно, что введение незначительного количества легирующей добавки  $MnO_2$  значительно повысило уровень пьезосвойств. Оптимальные режимы поляризации с точки зрения достижения высокого уровня пьезосвойств находятся в широких пределах.

**Выводы.** Анализ полученных результатов указывает на то, что уровнем пьезоэлектрических свойств можно достаточно эффективно управлять не только за счёт изменения химического состава керамики, но и путём выбора оптимальных режимов поляризации. Однако следует учитывать, что при изготовлении пьезокерамических элементов для конкретных изделий потребителей, режимы поляризации всё равно необходимо оптимизировать, но с учётом полученных результатов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова; под ред. В. М. Шарапова. – Москва: Техносфера, 2006. – 632 с. – ISBN 5-94836-100-4.
2. Высокоэффективные керамические материалы. Оптимизация поиска / А. Я. Данцигер, О. Н. Разумовская, Л. А. Резниченко, С. И. Дудкина. – Ростов н/Д.: Изд-во «Пайк», 1994. – 96 с.
3. Пьезоэлектрическое приборостроение / А. В. Гориш, В. П. Дудкевич, М. Ф. Куприянов [и др.]; под ред. А. В. Гориша. – Т. 1. Физика сегнетоэлектрической керамики. – М.: ИПРЖР, 1999. – 368 с. – ISBN 5-88070-006-2.
4. Куприянов, М. Ф. Сегнетоэлектрические морфотропные переходы / М. Ф. Куприянов, Г. М. Константинов, А. Е. Панич. – Ростов н/Д.: Издательство Ростовского университета, 1991. – 245 с.
5. Окадзаки, К. Технология керамических диэлектриков / К. Окадзаки. – М.: Энергия, 1976. – 336 с.
6. Ishchuk, V. M. Effects caused by antiferroelectric nanodomains in PZT-based coarse-grained ceramics with compositions from the morphotropic boundary region / V.M. Ishchuk, D. V. Kuzenko, V. L. Sobolev // Journal of Advanced Dielectrics. – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 1750005.
7. Материалы пьезокерамические. Технические условия. Отраслевой стандарт ОСТ 11 0444-87. – М.: Электростандарт, 1987. – 140 с.

*Поступила в редакцию 28.03.2024 г., рекомендована к печати 15.04.2024 г.*

**PIEZOCERAMIC ELEMENTS POLARIZATION AND PIEZO PROPERTIES CONTROL**

© 2024 *Spiridonov N.A., Sidak I.L.*

The results of studies of the influence of high-voltage polarization modes of piezoceramic elements of lead zirconate-titanate solid solutions on the piezoelectric properties are presented. It has been shown that the properties of polarized piezoceramic elements can be controlled not only by changing the chemical composition of a ceramic material, but also by varying modes of the polarization process.

**Keywords:** high-voltage polarization, piezoceramic element, ferroelectric, piezoelectric ceramics, lead zirconate titanate, dielectric constant, piezo properties.

**Спиридонов Николай Анатольевич**

заведующий отделом наноструктурных функциональных материалов, старший научный сотрудник ФГБНУ «Научно-исследовательский институт "Реактивэлектрон"»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк  
E-mail: n.a.spir@mail.ru

**Spiridonov Nikolai Anatolevich**

Head of Department of Nanostructured Functional Materials, Senior Researcher of Research Institute «Reactivelectron»,  
Russian Federation, DPR, Donetsk

**Сидак Ирина Леонидовна**

старший научный сотрудник ФГБНУ «Научно-исследовательский институт "Реактивэлектрон"»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк  
E-mail: reaktivelektron@mail.ru

**Sidak Irina Leonidovna**

Senior Researcher of Research Institute «Reactivelectron»,  
Russian Federation, DPR, Donetsk

## ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРСИИ ЭКСИТОНОПОДОБНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НЕИДЕАЛЬНОЙ 1D ФОТОННОЙ РЕШЕТКЕ МИКРОПОР

© 2024 Безус Ю.А., Рыбалка А.Е., Румянцев В.В., Федоров С.А., Петренко А.Г.

---

Исследованы особенности спектра экситоноподобных возбуждений в 1D решетке микрорезонаторов, обусловленные наличием однородной упругой деформации и случайной вариацией положений микропор, а также трансформация плотности состояний данных элементарных возбуждений в неидеальной цепочке микропор в зависимости от концентрации указанных дефектов структуры.

**Ключевые слова:** неидеальная фотонная 1D решетка, микропоры-резонаторы, дефекты структуры экситоноподобные возбуждения, однородная упругая деформация, приближение виртуального кристалла.

---

**Введение.** Появление новых оптоэлектронных устройств, использующих различные приложения современной фотоники, начиная от сбора света нанофотонными волноводами до квантовой обработки информации, предполагает формирование соответствующих нанокompозитных материалов, как источников когерентного излучения. В частности, в последнее время большой интерес проявляется к фотонным решеткам Лайбеа [1-3], обеспечивающих сильное удержание света такими системами и открывающих пути для разработки новых схем захвата света. В качестве примера фотонной структуры может быть выбрана пространственно периодическая система связанных микрорезонаторов [4-5]. Подобные системы могут быть привлекательными объектами для целей квантовой обработки информации [6-10]. Значимость изучения оптических мод в массиве микрорезонаторов, которая проявилась в связи с созданием оптоэлектронных устройств [6-8], значительно выросла в последнее время. Прогресс, достигнутый в последнее время в плане создания высокодобротных полупроводниковых микрорезонаторов с брэгговскими зеркалами, позволил получить и исследовать бозе-эйнштейновскую – конденсацию экситон-поляритонов [10-12].

Интенсивно развивается фотоника несовершенных структур. Например, в работах авторов [13-14] рассмотрено влияние дефектов структуры на дисперсию экситоноподобных возбуждений в решетке туннельно связанных микрорезонаторов. Проведенные в рамках фотоники неидеальных структур исследования показали, что введением в исследуемый объект определенных дефектов или в результате управляемого внешнего воздействия (в частности, упругой деформации [15]) можно добиться необходимых изменений энергетического спектра элементарных возбуждений и оптических свойств исследуемой неидеальной структуры.

Важное место в физике конденсированных сред занимают исследования плотности энергетических состояний системы. Знание плотности состояний существенно при определении многих ее характеристик, например, термодинамических, кинематических и оптических. В связи с этим, вызывает интерес представленное в данной работе исследование плотности состояний квазичастичных (экситоноподобных) возбуждений в одном из типов пористых структур – неидеальной 1D цепочке микропор со случайной вариацией расстояний между ними.

**Теоретическая модель.** Общая модель квазичастичных возбуждений электромагнитного поля, локализованного в идеальной решетке микропор-резонаторов,

развита авторами ранее (см., например работы [13-14, 16]). В соответствии с этой моделью предполагается, что плотность возбужденных состояний структурных элементов в исследуемой решетке мала. В этом случае можно ограничиться квадратичной частью  $\hat{H}^{ex}$  гамильтониана  $\hat{H}$  (описывающей элементарные возбуждения в исследуемой системе), которая в одноуровневой модели в приближении Гайтлера-Лондона в общем случае идеальной решетки микропор принимает вид [17]:

$$\hat{H}^{ex} = \sum_{\mathbf{n}, \mathbf{m}, \alpha, \beta} D_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta} \hat{\Phi}_{\mathbf{n}\alpha}^+ \hat{\Phi}_{\mathbf{m}\beta} = \sum_{\alpha, \beta, \mathbf{k}} D_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) \hat{\Phi}_{\alpha}^+(\mathbf{k}) \hat{\Phi}_{\beta}(\mathbf{k}), \quad (1)$$

где:

$$D_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta} = \hbar \omega_{\mathbf{n}\alpha}^{ph} \delta_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta} - A_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta} . \quad (2)$$

В выражении (2)  $\omega_{\mathbf{n}\alpha}^{ph}$  – частота фотонной моды электромагнитного возбуждения, локализованного в  $\mathbf{n}\alpha$ -ом узле (резонаторе),  $\hat{\Phi}_{\mathbf{n}\alpha}^+, \hat{\Phi}_{\mathbf{n}\alpha}$  – Бозе-операторы рождения и уничтожения этой фотонной моды в узельном представлении,  $A_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta}$  – матрица резонансного взаимодействия, характеризующая перекрытие оптических полей резонаторов  $\mathbf{n}\alpha$ -го и  $\mathbf{m}\beta$ -го узлов решетки и, следовательно, определяющего вероятность туннельного перехода соответствующего электромагнитного возбуждения.

В равенстве (1) величины  $D_{\alpha\beta}(\mathbf{k})$  и  $\hat{\Phi}_{\alpha}(\mathbf{k})$  имеют вид соответственно:

$$D_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) = \sum_{\mathbf{m}} D_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta} \exp\left[i\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_{\mathbf{n}\alpha} - \mathbf{r}_{\mathbf{m}\beta})\right] \text{ и } \hat{\Phi}_{\alpha}(\mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{\mathbf{n}} \hat{\Phi}_{\mathbf{n}\alpha} \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_{\mathbf{n}\alpha}),$$

где  $N$  – число элементарных ячеек в исследуемой решетке.

Заметим, что волновой вектор  $\mathbf{k}$ , характеризующий собственные состояния электромагнитных возбуждений в исследуемой системе, изменяется в пределах первой зоны Бриллюэна.

Расчет собственных значений гамильтониана (1) проводится путем его диагонализации с помощью применения преобразования Боголюбова-Тябликова [17]. Выполнение указанной процедуры, позволяет получить следующее уравнение:

$$\det \left\| D_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) - \hbar \Omega(\mathbf{k}) \delta_{\alpha\beta} \right\| = 0, \quad (3)$$

решением которого является выражение для дисперсионного соотношения  $\Omega(k)$ , определяющего спектр элементарных возбуждений. Заметим, что дисперсионные соотношения для квазичастичных возбуждений фотонной системы исследуемой пористой структуры весьма схожи с аналогичными для экситонов Френкеля в молекулярных кристаллах, поэтому этот тип элементарных возбуждений локализованного в микропорах электромагнитного поля назван экситоноподобным (в этом случае  $D_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta}^{12} = D_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta}^{21} = 0$ ).

Спектр  $\Omega(k)$  экситоноподобных возбуждений в неидеальной фотонной системе получаем в рамках приближения виртуального кристалла (ПВК), используя аппарат усредненных функций Грина. В указанном приближении усредненная резольвента квазичастичного гамильтониана системы равна резольвенте усредненного гамильтониана. Поэтому величины  $D_{\mathbf{n}\alpha, \mathbf{m}\beta}$  в равенстве (1) следует заменить на их

конфигурационно усредненные (по всем возможным вариациям положений микропор) значения, т.е.  $D_{n\alpha,m\beta} \rightarrow \langle D_{n\alpha,m\beta} \rangle$  (процедура конфигурационного усреднения массива микропор обозначена угловыми скобками). Такая операция «восстанавливает» трансляционную инвариантность и позволяет перейти в  $k$  – представление с последующей диагонализацией гамильтониана с помощью процедуры Боголюбова-Тябликова [17]. Выполнение указанных процедур позволяет получить выражение (3) для дисперсионного соотношения  $\Omega(k)$ , определяющего спектр элементарных возбуждений.

**Изменение спектра экситоноподобных возбуждений в 1D решетке микропор в условиях однородной упругой деформации.** Для конкретизации задачи рассмотрим 1D решетку микропор в однородной и изотропной среде, находящуюся в условиях одноосных напряжений (сжатие или растяжение), направленных вдоль оси цепочки. При однородном деформировании исследуемого массива, которое описывается с помощью тензора деформации  $\hat{\varepsilon}$ , положение каждой микропоры меняется. Для таких деформаций постоянная  $d(\varepsilon)$  1D решетки имеет вид:

$$d(\varepsilon) = (1 + \varepsilon)d_0,$$

где  $d_0$  – постоянная решетки недеформированной структуры,  $\varepsilon$  – соответствующая компонента тензора  $\hat{\varepsilon}$ . Таким образом, необходимая для получения спектра элементарных возбуждений постоянная  $b(\varepsilon)$  обратной 1D деформированной решетки находится из очевидного соотношения:

$$b(\varepsilon) \cdot d(\varepsilon) = 2\pi.$$

В дальнейшем остановимся на исследовании двухподрешеточной 1D системы микропор-резонаторов. Положение в решетке микрорезонаторов определяет равенство:  $r_{n\alpha}(\varepsilon) = r_n(\varepsilon) + r_\alpha(\varepsilon)$ , поэтому положение микропор первой и второй подрешеток в нулевой элементарной ячейке ( $r_{n=0} = 0$ ) задают соотношения соответственно:  $r_{01} = 0$  и  $r_{02}(\varepsilon) = a(\varepsilon)$ . Спектр экситоноподобных возбуждений  $\Omega(k, \varepsilon)$  следует из соотношения (3):

$$\begin{vmatrix} \hbar\Omega(k, \varepsilon) - \hbar\omega_1^{ph} & A_{12}(k, \varepsilon) \\ A_{21}(k, \varepsilon) & \hbar\Omega(k, \varepsilon) - \hbar\omega_2^{ph} \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

Величины  $A_{\alpha\beta}(k, \varepsilon)$  в (5) – фурье-образы матрицы  $A_{n\alpha m\beta}(\varepsilon)$  резонансного взаимодействия:  $A_{\alpha\beta}(k, \varepsilon) = \sum_m A_{n\alpha m\beta}(\varepsilon) \exp\{ik[r_{n\alpha}(\varepsilon) - r_{m\beta}(\varepsilon)]\}$ . В рамках используемой модели в приближении ближайших соседей матричные элементы  $A_{\alpha\beta}(k, \varepsilon)$  приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} A_{12}(k, \varepsilon) &\cong A_{12}[a(\varepsilon)] \exp[-ik \cdot a(\varepsilon)] + A_{12}[d(\varepsilon) - a(\varepsilon)] \exp\{-ik \cdot [d(\varepsilon) - a(\varepsilon)]\}, \\ A_{21}(k, \varepsilon) &= A_{21}[a(\varepsilon)] \exp[ik \cdot a(\varepsilon)] + A_{21}[d(\varepsilon) - a(\varepsilon)] \exp\{ik \cdot [d(\varepsilon) - a(\varepsilon)]\} \end{aligned} \quad (5)$$

Величины  $A_{12(21)}[a(\varepsilon)]$ , которые являются компонентами матриц  $A_{\alpha\beta}(\varepsilon)$  резонансного взаимодействия, соответствующие ближайшим соседям имеют вид:  $A_{12(21)}[a(\varepsilon)] = A_{12(21)}(a)\exp(-\varepsilon)$ ,  $A_{12(21)}[d(\varepsilon) - a(\varepsilon)] = A_{12(21)}(d - a)\exp(-\varepsilon)$ . В дальнейшем полагаем:  $A_{12}(a) \approx A_{21}(a)$ ,  $A_{12}(d - a) \approx A_{21}(d - a)$ .

Соотношение (4) показывает, что закон дисперсии  $\Omega(k, \varepsilon)$  элементарных электромагнитных возбуждений в искомой деформированной системе микропор (рис. 1) определяется как частотными характеристиками решетки резонаторов, так и величиной  $A(k, \varepsilon)$ , а также характером деформации (например, одноосным растяжением,  $\varepsilon > 0$ , или сжатием  $\varepsilon < 0$ ).

Численный расчет соответствующих величин, определяющих особенности спектра электромагнитных возбуждений, вызванные упругой деформацией данной 1D структуры микропор при одноосной деформации, проведен для однородной и изотропной одномерной среды. Полагаем, что в рамках используемой модели значения частот резонансных фотонных мод, локализованных в резонаторах решетки,  $\omega_1^{ph} = 2\pi \times 311 \text{ ТГц}$  и  $\omega_2^{ph} = 2\pi \times 331 \text{ ТГц}$  не зависят от параметра деформации  $\varepsilon$ . Причем  $A_{12}(a)/2\hbar = 3.5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ,  $A_{12}(d - a)/2\hbar = 1.2 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ ,  $a = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ,  $d = 9 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . На рис. 1 показана зависимость  $\Omega_\nu(k, \varepsilon)$ , где  $\nu = 1; 2$  затемненный участок в плоскости  $(k, \varepsilon)$  соответствует первой зоне Бриллюэна.

Важным свойством фотонных структур с запрещенной зоной является возможность получения так называемого «медленного» света [18]. Этот эффект имеет большие перспективы применения в разработке устройств квантовой обработки оптической информации. В частности, эффективное уменьшение групповой скорости квазичастиц продемонстрировано в связанных волноводных оптических резонаторах, различных типах твердотельных многослойных полупроводниковых структурах. Ключевую роль в уменьшении групповой скорости в подобных системах играет характер эффективной массы  $m_{eff(\nu)}$  ( $\nu = 1; 2$ ). Зависимость эффективной массы

$m_{eff(\nu)}(\varepsilon) = \hbar \left[ \frac{\partial^2 \Omega_\nu(k, \varepsilon)}{\partial k^2} \Big|_{k=0} \right]^{-1}$  экситоноподобных возбуждений от степени деформации исследуемой системы приведена на рис. 2.

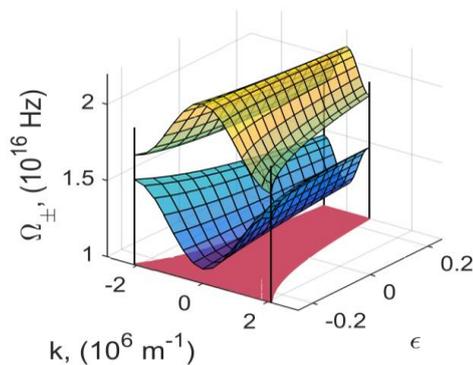


Рис. 1. Дисперсия экситоноподобных возбуждений  $\Omega_{1(2)}(k, \varepsilon)$  деформированной 1D решетки микропор

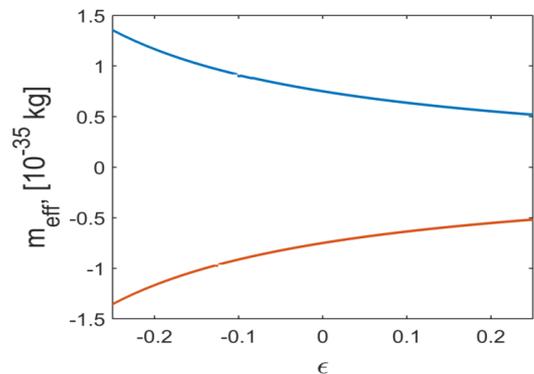


Рис. 2. Зависимость эффективной массы  $m_{eff(1,2)}(\varepsilon)$  экситоноподобных возбуждений от степени деформации

Анализ графика функции  $m_{eff} \nu \varepsilon$  показывает, что выбор конкретного диапазона величин  $\varepsilon$ , характеризующих соответствующую величину деформации структуры, позволяет достичь необходимых параметров «медленного» света.

**Экситоноподобные возбуждения в неидеальной 1D решетке туннельно связанных микропор.** Опираясь на разработанный авторами в [13-14] подход, исходя из представлений о несовершенных фотонных структурах, в рамках ПВК [18-20] рассмотрим особенности экситоноподобных возбуждений в конкретном случае топологически упорядоченной неидеальной двухподрешеточной 1D решетки туннельно связанных микропор-резонаторов (рис. 3), каждый из которых содержит по одной оптической моде. В этом случае дисперсионное соотношение  $\Omega(k)$ , определяющее спектр экситоноподобных возбуждений, имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \hbar\omega_1^{ph} - \hbar\Omega(k, C_1, C_2) & -A_{12}(k, C_1, C_2) \\ -A_{21}(k, C_1, C_2) & \hbar\omega_2^{ph} - \hbar\Omega(k, C_1, C_2) \end{vmatrix} = 0.$$

Здесь  $C_1, C_2$  – концентрации дефектов структуры (вариации положений микропор в первой и второй подрешетках соответственно).

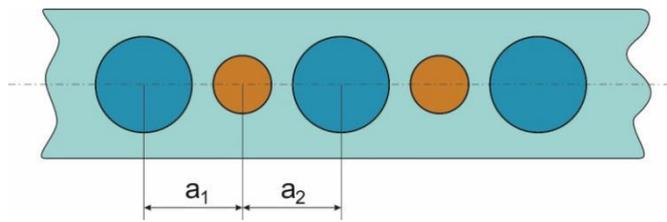


Рис. 3. Схематическое изображение виртуальной решетки микропор,  $a_1, a_2$  – положения микропор, полученные в результате конфигурационного усреднения с использованием ПВК

Численный расчет соответствующих величин, определяющих особенности спектра экситоноподобных возбуждений, выполнен в рамках используемой модели для значений параметров, указанных в предыдущем разделе. Поверхности, описывающие дисперсионную зависимость частот  $\Omega_{\pm}(k, C_1, C_2)$  исследуемых коллективных возбуждений в неидеальной решетке микрорезонаторов, представлены на рис. 4.

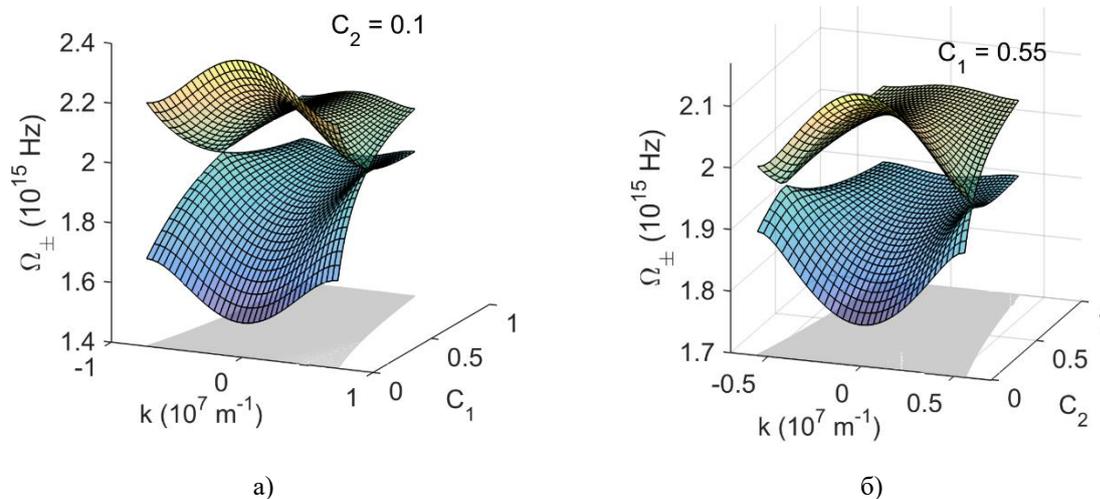


Рис. 4. Концентрационная зависимость: а)  $\Omega_{\pm}(k, C_1, C_2)$  при  $C_2 = 0.1$ ; б) при  $C_1 = 0.55$

Применительно к исследуемому случаю неидеальной 1D системы микрорезонаторов выражение для функции  $\rho_{\pm}(\Omega, C_1, C_2)$  плотности состояний имеет вид:

$$\rho_{\pm}(\Omega, C_1, C_2) = \frac{d(C_1, C_2)}{2\pi} \sum_i \frac{1}{\left| \frac{d\Omega_{\pm}(k, C_1, C_2)}{dk} \right|_{k_i}}. \quad (6)$$

Расчет (6) проведен для всех значений волнового вектора  $k_i$ , являющихся корнями уравнения  $\Omega_{\pm}(k, C_1, C_2) = \Omega$  в пределах первой зоны Бриллюэна:

$$-\frac{\pi}{d(C_1, C_2)} < k < \frac{\pi}{d(C_1, C_2)}.$$

На графиках (рис. 5) функций  $\rho_{\pm}(\Omega, C_1, C_2)$  хорошо видны особенности плотности состояний – сингулярности Ван Хова, которые, в частности, связаны с наличием локальных минимумов  $\Omega_{\pm}(k, C_1, C_2)$  в  $k$ -пространстве (рис. 4) – критических точек, в которых групповая скорость обращается в нуль как при значениях  $k = 0$ , так и при  $k \neq 0$ .

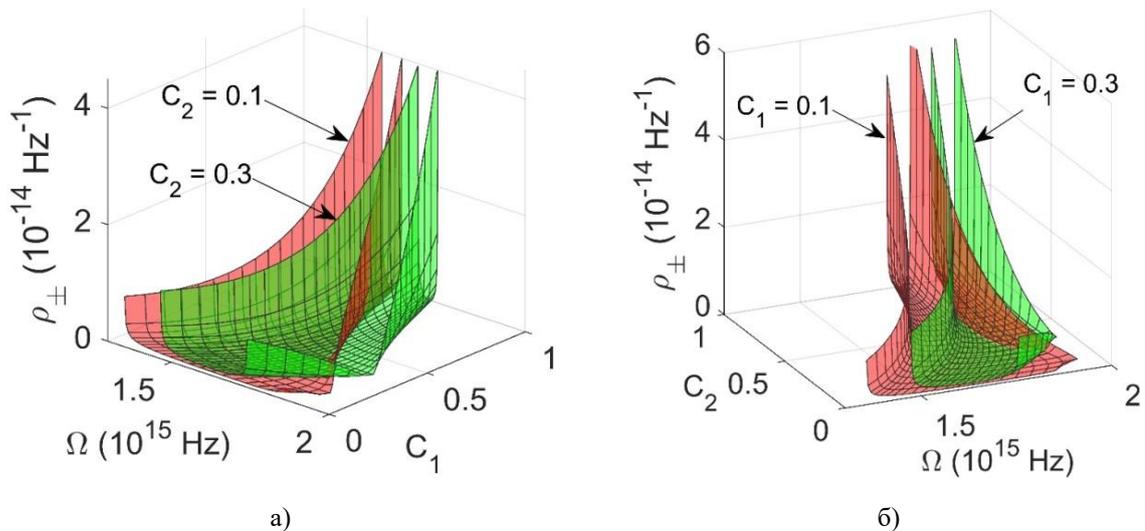


Рис. 5. Зависимость плотности состояний  $\rho_{\pm}(\Omega, C_1, C_2)$  от концентрации  $C_1$  и  $C_2$

Заметим, что эти особенности формы дисперсионной поверхности  $\Omega_{\pm}(k, C_1, C_2)$  на рис. 4 свидетельствуют о возможности существования при определенных концентрациях дефектов структуры бозе-эйнштейновского поляритонного конденсата, благодаря наличию у дисперсионных поверхностей  $\Omega_{\pm}(k, C_1, C_2)$  локального минимума при значениях  $k \neq 0$  (дополнительно к возможности существования конденсата при  $k = 0$ ).

**Выводы.** В работе представлены результаты исследований особенностей спектра экситоноподобных возбуждений в 1D решетке микропор (резонаторов), обусловленных наличием в данной системе упругой деформации, благодаря которой открывается возможность достичь необходимых параметров «медленного» света [20].

Рассмотрена также трансформация дисперсии экситоноподобных возбуждений в неидеальной двухподрешеточной 1D структуре микропор, вызванная присутствием структурных дефектов – случайной вариацией положений микропор. Исследована плотность состояний данных элементарных возбуждений в неидеальной цепочке микропор в зависимости от концентрации указанных дефектов структуры.

Представленные результаты численного моделирования позволяют расширить возможности создания нового класса функциональных материалов – фотонных кристаллических систем (цепочек микропор), позволяющих контролировать распространение электромагнитных возбуждений в таких композитных структурах, благодаря наличию дефектов структуры и/или находящихся под внешним воздействием.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Experimental observation of bulk and edge transport in photonic Lieb lattices / D. Guzman-Silva, C Mejía-Cortés, M A Bandres [et al.] // *New Journal of Physics*. – 2014. – V. 16. – P. 063061.
2. Observation of Localized States in Lieb Photonic Lattices / R. A. Vicencio, C. Cantillano, L. Morales-Inostroza [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2015. – V. 114. – P. 245503.
3. Unconventional flatband Line states in photonic Lieb lattices / S. Xia, A. Ramachandran, S. Xia [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2018. – V. 121. – №. 26. – P. 263902.
4. Kaliteevskii, M. A. Coupled vertical microcavities / M. A. Kaliteevskii // *Technical Physics Letters*. – 1997. – V. 23. – №2. – P. 120-121.
5. Vahala, K. J. Optical microcavities / K. J. Vahala // *Nature*. – 2003. – V. 424. – P. 839-846.
6. Tighineanu, P. The Mesoscopic Nature of Quantum Dots in Photon Emission / P. Tighineanu, A. Soresen, S. Stobbe [et al.] // in *Quantum Dots for Quantum Information Technologies. Nano-Optics and Nanophotonics*. – Cham: Springer, 2017. – P. 165-198.
7. Deterministic photon-emitter coupling in chiral photonic circuits / I. Söllner, S. Mahmoodian, S. Lindskov Hansen [et al.] // *Nature Nanotechnology*. – 2015. – V. 10. – P. 775.
8. Lodahl, P. Quantum-dot based photonic quantum networks / P. Lodahl // *Quantum Science and Technology*. – 2018. – V. 3. – P. 013001.
9. Alodjants, A. P. Strongly localized polaritons in an array of trapped two-level atoms interacting with a light field / A.P. Alodjants, I. O. Barinov, S. M. Arakelian // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2010. – V. 43. – P. 095502.
10. Quantum Optics with Strongly Localized Polaritons in Polaritonic Crystals / E. S. Sedov, A. P. Alodjants, S. M. Arakelian, [et al.] // *Phys. Rev. A*. – 2014. – V. 89. – P. 033828.
11. Bose-Einstein condensation of microcavity polaritons in a trap / R. Balili, V. Hartwell, D.Snoke [et al.] // *Science*. – 2007. – V. 316. – P. 1007-10010.
12. Superfluidity of polaritons in semiconductor microcavities / A. Amo, J. Lefr'ere, S. Pigeon [et al.] // *Nature Physics*. – 2009. – V. 5. – №11. – P. 805-810.
13. Exciton-like electromagnetic excitations in non-ideal microcavity supercrystals / V. Romyantsev, S. Fedorov, K. Gumennyk [et al.] // *Nature. Scientific Reports*. – 2014. – 4:6945. – 6 p.
14. Зависимость плотности состояний экситоноподобных возбуждений от концентрации дефектов в неидеальной цепочке микропор / А. Е. Рыбалка, В. В. Румянцев, С. А. Федоров [и др.] // *ФТВД*. – 2023. – Т. 33, № 2. – С.61-68.
15. Dmitriev, S. V. Effect of elastic deformation on phonon spectrum and characteristics of gap discrete breathers in crystal with NaCl-type structure / S. V. Dmitriev, Y. A. Baimova // *Technical Physics Letters*. – 2011. – V. 37(5). – P. 451-454.
16. Features of light-matter coupling in non-ideal lattice of coupled microcavities containing quantum dots / V. V. Romyantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennyk, A. E. Rybalka // *Condensed Matter*. – 2023. – V. 8(2). – P. 41.
17. Агранович, В. М. Теория экситонов / В. М. Агранович. – М.: Наука, 1968. – 382 с.
18. Займан, Дж. Модели беспорядка / Дж. Займан. – М.: Мир, 1982. – 592 с.
19. Лось, В. Ф. Метод проекционного оператора в теории неупорядоченных систем / В. Ф. Лось // *ТМФ*. – 1987. – Т. 73. – №1. – С. 85-102.
20. Milonni, P. W. *Fast Light, Slow Light and Left-Handed Light* / P. W. Milonni. – Bristol: Institute of Physics Publishing, 2005. – 247 p.

*Поступила в редакцию 02.04.2024 г., рекомендована к печати 19.04.2024 г.*

**DISPERSION OF EXCITON-LIKE EXCITATIONS IN AN IMPERFECT 1D PHOTONIC LATTICE OF MICROPORES**

*Bezus I.U.A., Rybalka A.E., Rumiantsev V.V., Fedorov S.A., Petrenko A.G.*

The features of the spectrum of exciton-like excitations in the 1D lattice of microresonators due to the presence of homogeneous elastic deformation and random variation of the positions of micropores, as well as the transformation of the density of states of these elementary excitations in an imperfect chain of micropores depending on the concentration of these structural defects, are investigated.

**Keywords:** imperfect photonic 1D lattice, micropores-resonators, structural defects, exciton-like excitations, homogeneous elastic deformation, virtual crystal approximation.

**Безус Юлия Александровна**

кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: paladyan0108@yandex.ru

**Bezus Iuliia Aleksandrovna**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Junior Researcher of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Рыбалка Алексей Евгеньевич**

младший научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: rybalka96@inbox.ru

**Rybalka Aleksei Evgenevich**

Junior Researcher of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Румянцев Владимир Васильевич**

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: vladimir.rumyantsev2011@yandex.ru

**Rumiantsev Vladimir Vasilevich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, Chief Researcher of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Федоров Станислав Афанасьевич**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: s.fedorov2023@yandex.ru

**Fedorov Stanislav Afanasevich**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Петренко Александр Григорьевич**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и нанотехнологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: t0504712123@yandex.ru

**Petrenko Aleksandr Grigorevich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Theoretical Physics and Nanotechnology of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 2024 Пометун Е.Д.

---

Рассмотрена концепция оценки неопределенности измерений температуры с помощью термопреобразователя при проведении его калибровки. Приводится пример расчета расширенной неопределенности в каждой калибруемой температурной точке термопреобразователя.

**Ключевые слова:** неопределенность измерения, температура, термопреобразователь, единство измерения, прослеживаемость результатов измерения.

---

**Введение.** С целью обеспечения единства измерения необходимо проводить поверку и калибровку эксплуатируемых средств измерений. В Российской Федерации калибровке подвергаются средства измерения применяемые вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений. Т.о., процедура калибровки носит добровольный характер, в отличие от поверки Согласно Федеральному закону № 102–ФЗ «Об обеспечении единства измерений» калибровка средств измерений - это совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений [1].

Согласно ГОСТ ISO/IEC 17025–2019 обязательной частью калибровки средств измерений является оценка неопределенности измерений [2]. Выполнение данной операции необходимо для обеспечения качества продукции, а так же повышения конкурентоспособности предприятия.

**Основная часть.** При разработке методики калибровки необходимо выполнить анализ уже разработанных методик измерения и методик поверки температурных преобразователей, а также рекомендации по расчету неопределенностей результата измерения. Под неопределенностью измерений понимают «неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации» [3]. Неопределенность стала применяться с целью гармонизации требований метрологического обеспечения в калибровочных работах. Это создает основу для прослеживаемости результатов измерений, что способствует повышению конкурентоспособности предприятия [2].

Неопределенность принято разделять на два типа [4]:

- тип А - оценивание составляющей неопределенности измерений путем статистического анализа ранее полученных многократно измеренных значений величины;

- тип Б - оценивание составляющей неопределенности измерений способами, отличными от оценивания неопределенности измерений по типу А.

Оценивание неопределенности по типу Б выполняется на основании анализа априорной информации о средстве измерения, в нашем случае термопреобразователе. К данной информации можно отнести следующие источники:

- паспортные данные термопреобразователя;
- информация, взятая из авторитетных публикаций;
- информация, полученная из сертификатов калибровки и др.

Рассмотрим пример оценивания неопределенности измерений температуры среды с помощью температурного преобразователя.

Экспериментальная оценка неопределенности измерения температуры по типу А определяется по формуле [5]:

$$u(r_{lab}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{lab}} (t_i - \bar{t})^2}{N_{lab} - 1}},$$

где  $N_{lab}$  – число отсчетов температуры;

$t_i$  – результат  $i$ -го отсчета;

$\bar{t}$  – среднее значение температуры.

При калибровке термопреобразователя суммарную стандартную и расширенную неопределенности рассчитывают в каждой температурной точке. При расчете суммарной неопределенности калибровки учитывают неопределенность измерений температуры эталонным термопреобразователем и неопределенность измеренного значения калибруемым термопреобразователем.

Для расчета неопределенности по типу Б используют информацию, полученную при проведении измерений, данные, приведенные в технической документации завода-изготовителя эталонного термопреобразователя, термостата и калибруемого термопреобразователя. При этом калибровка исследуемого термопреобразователя проводится путем непосредственного сличения с эталонным термопреобразователем при заданной температуре с помощью термостата [6].

Бюджет неопределенности для температуры, измеренной образцовым термопреобразователем, включает в себя следующие составляющие:

Стандартную неопределенность, обусловленную случайными эффектами при измерениях  $u(r_{lab1-j})$ , рассчитывают как среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения результатов измерений, выполненных образцовым термопреобразователем по формуле:

$$u(r_{lab1-j}) = \frac{u(r_{lab1})}{\sqrt{N_j}},$$

где  $u(r_{lab1})$  – СКО единичного измерения температуры эталонного термопреобразователя,  $N_j$  – число измерений.

Стандартную неопределенность, обусловленную нестабильностью температуры в термостате за время всех циклов измерений  $u(t_s)$ , рассчитывают методом по типу Б по формуле:

$$u(t_s) = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2\sqrt{3}},$$

где  $t_{\max}$ ,  $t_{\min}$  – соответственно максимальная и минимальная температура, измеренная образцовым термопреобразователем.

Стандартную неопределенность поверки образцового термопреобразователя  $u(\delta t_s)$  рассчитывают по формуле:

$$u(\delta t_s) = \frac{U_s}{2},$$

где  $U_3$  - расширенная неопределенность поверки образцового термопреобразователя при  $k = 2$ , приведенная в свидетельстве о его поверке (или доверительная погрешность при доверительной вероятности 95 %).

Стандартную неопределенность, вызванную разрешающей способностью считывающего устройства термостата  $u(\delta r_{rs})$  при измерении образцовым термопреобразователем, оценивают по типу Б по формуле:

$$u(\delta r_{rs}) = \frac{a_{rs}}{\sqrt{3}},$$

где  $\pm a_{rs}$  - разрешающая способность отображающего устройства калибратора.

Далее для удобства составляется бюджет неопределенности измерений температуры образцовым термопреобразователем (таблица 1).

Таблица 1. Бюджет неопределенности измерений температуры образцовым термопреобразователем

Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности, тип, распределение	Коэффициент влияния	Метод расчета
Случайные эффекты при измерении	Тип А, нормальное распределение	1	$u(r_{lab1-j})$
Нестабильность температуры в термостате	Тип Б, равномерное распределение	1	$u(t_s)$
Поверка образцового термопреобразователя	Тип Б, нормальное распределение	1	$u(\delta t_3)$
Разрешающая способность термостата	Тип Б, равномерное распределение	1	$u(\delta r_{rs})$

Т.о., суммарная стандартная неопределенность результата измерения температуры образцовым термопреобразователем  $u_c(t_x)$  рассчитывается по формуле:

$$u_c(t_{опр}) = \sqrt{u(r_{lab1-j})^2 + u(t_s)^2 + u(\delta t_3)^2 + u(\delta r_{rs})^2}.$$

Бюджет неопределенности измерения температуры калибруемым термопреобразователем состоит из следующих составляющих:

- 1) неопределенность, обусловленная случайными эффектами при измерениях (тип А),
- 2) разрешающая способность термопреобразователя (тип Б).

Стандартная неопределенность, обусловленная возникновением случайных эффектов при выполнении измерений  $u(r_{lab2-j})$  рассчитывается по формуле:

$$u(r_{lab2-j}) = \frac{u(r_{lab2})}{\sqrt{N_j}},$$

где  $u(r_{lab2})$  — среднее квадратическое отклонение, полученное для калибруемого термопреобразователя.

Стандартную неопределенность, обусловленную разрешающей способностью калибруемого термопреобразователя (ценой деления), рассчитывают по формуле:

$$u(\delta r_{rk}) = \frac{a_{rk}}{\sqrt{3}},$$

где  $\pm a_{rk}$  – цена деления калибруемого термопреобразователя.

Бюджет неопределенности измерения температуры исследуемым термопреобразователем представлен в таблице 2.

Таблица 2. Бюджет неопределенности измерения калибруемого преобразователя

Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности, тип, распределение	Коэффициент влияния	Метод расчета
Случайные эффекты при измерении	Тип А, нормальное распределение	1	$u(r_{lab2-j})$
Разрешающая способность термометра	Тип Б, равномерное распределение	1	$u(\delta r_{rk})$

Итоговую суммарную стандартную неопределенность измерения температуры калибруемым термопреобразователем  $u_c(t_k)$  оценивают по формуле:

$$u_c(t_k) = \sqrt{u(r_{lab2-j})^2 + u(\delta r_{rk})^2}.$$

Суммарную стандартную неопределенность  $u_c(t)$  и расширенную неопределенность  $U$  калибровки термопреобразователя в каждой температурной точке рассчитывают по формулам:

$$u_c(t) = \sqrt{u_c(t_k)^2 + u_c(t_{обр})^2},$$

$$U = k u_c(t).$$

где  $k$  – коэффициент охвата, равный  $k = 2$ .

Калибруемый термопреобразователь считается годным и продолжают дальнейшую калибровку, если отклонение результата в каждой температурной точке с учетом расширенной неопределенности результата измерения не превышает допустимую погрешность термопреобразователя, т.е. выполняется одновременно два неравенства [5]:

$$\begin{aligned} (t_k - t_{обр}) + U &\leq +\Delta_{дон}, \\ (t_k - t_{обр}) - U &\leq -\Delta_{дон}, \end{aligned}$$

где  $t_k$  – среднее значение температуры, измеренное калибруемым термопреобразователем, °С;

$t_{обр}$  – среднее значение температуры, измеренное образцовым термопреобразователем, °С;

$U$  – расширенная неопределенность калибровки термопреобразователя, °С;

$\Delta_{дон}$  – допустимая погрешность, °С.

**Выводы.** Таким образом, калибровка термопреобразователей выполняется в случае, если данное средство измерения используется вне сферы государственного метрологического надзора. Оценка неопределенности измерений является важным этапом при выполнении калибровки. Переход от концепции оценки погрешности измерения к оценке неопределенности измерений в настоящее время является актуальным направлением. Однако организациям тяжело разрабатывать методики калибровки, это в первую очередь связано с трудностями в сборе информации для оценки неопределенности по типу Б.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ : с изм. на 08 декабря 2020 г. // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902107146> (дата обращения 05.04.2024).
2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий (Переиздание) : дата введения 2019-09-01 / подготовлен ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации «Техэксперт». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200166732> (дата обращения 05.04.2024).
3. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения : дата введения 2015-01-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева" (ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева") // Электронный фонд правовой и нормативнотехнической документации «Техэксперт». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115154> (дата обращения 05.04.2024).
4. ГОСТ Р 54500.3-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения : дата введения 2012-10-01 / подготовлен Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева" (ФГУП "ВНИИМ") и Автономной некоммерческой организацией "Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем" (АНО "НИЦ КД") на основе собственного аутентичного перевода на русский язык международного документа, указанного в пункте 4. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088855> (дата обращения 05.04.2024).
5. ГОСТ 8.461-2009. ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки: дата введения 201-01-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева" (ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева"). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082861> (дата обращения 05.04.2024).
6. ГОСТ 8.558 – 2009. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры: дата введения 2012-07-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева" (ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева") // Электронный фонд правовой и нормативнотехнической документации «Техэксперт». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200086918> (дата обращения 05.04.2024).

*Поступила в редакцию 22.04.2024 г., рекомендована к печати 14.05.2024 г.*

## ESTIMATION OF UNCERTAINTY OF TEMPERATURE MEASUREMENTS DURING CALIBRATION OF THERMAL CONVERTERS

*Pometun E.D.*

The concept of estimating the uncertainty of temperature measurements using a thermal converter during its calibration is considered. An example of calculating the extended uncertainty at each calibrated temperature point of a thermal converter is given.

**Keywords:** measurement uncertainty, temperature, thermal converter, measurement unity, traceability of measurement results.

**Пометун Екатерина Дмитриевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: e.pometun.fnpme@mail.ru

**Pometun Ekaterina Dmitrievna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

EDN TUTOEZ  
УДК 004.352.242

DOI 10.5281/zenodo.12548490

### ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПОДБОРА ТОВАРОВ В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2024 Черников В.И., Нестругина Е.С.

---

В статье обосновываются преимущества использования экспертных систем в процессе подбора товаров в интернет-магазине с использованием искусственных нейронных сетей. Применение экспертных систем позволяет повысить эффективность работы интернет-магазина за счет сокращения времени поиска товаров по определенному набору характеристик. При создании экспертной системы особое внимание уделено вопросам реализации механизма подбора товаров, удобному, интуитивно понятному графическому интерфейсу и легкой интеграции с сайтом интернет-магазина.

**Ключевые слова:** экспертная система, нейронные сети, искусственный интеллект, обучение, знание.

---

**Введение.** В современном мире экспертные системы являются быстро развивающимся направлением искусственного интеллекта и находят применение в многообразных областях человеческой деятельности. Экспертные системы выполняют действия, аналогичные действиям эксперта. Они консультируют, дают советы, выполняют анализ, делают заключения, таким образом, помогая человеку принимать решения. Использование в экспертных системах искусственных нейронных систем, обладающих за счет параллельной обработки информации, более высоким быстродействием, чем современные компьютеры, позволяет значительно повысить эффективность работы. Одними из самых быстрорастущих и востребованных в розничной торговле в настоящее время являются интернет-магазины, имеющие колоссальный потенциал для привлечения новых клиентов и дальнейшего развития без значительных финансовых затрат [1].

Преимуществами интернет-магазина являются [1, 2]:

- покупки в сети доступны круглосуточно;
- экономия времени похода в магазины;
- отсутствие раздражающих продавцов-консультантов;
- в онлайн-магазине новинки появляются первыми;
- возможность проследить за процессом доставки;
- покупать в онлайн-магазинах выгоднее за счет акций и скидок;
- покупать в сети удобно и можно найти все;
- уменьшается численность персонала;
- не нужна аренда торговых помещений;
- отсутствует кассовое обслуживание.

Применение экспертных систем, основанных на знаниях, способствует повышению эффективности работы интернет-магазина. Эти системы представляют собой развивающееся направление в компьютерных технологиях, которое находит применение в различных сферах человеческой деятельности. Они позволяют решать сложные задачи и достигать результатов, превосходящих качество и эффективность, обычно достигаемые экспертами. Экспертные системы чаще всего применяются для решения задач, которые трудно формализовать, а также для задач, не имеющих четких алгоритмических решений [1].

Мировой опыт свидетельствует о том, что при диагностике и оптимизации технологических процессов наиболее эффективно использовать экспертные системы, основанные на знаниях и опыте экспертов. Они базируются на хранилище знаний, включающем факты и правила предметной области, полученные от экспертов и из специальной литературы. Экспертная система представляет собой сложную программу, использующую знания предметной области для нахождения оптимальных решений поставленной задачи. Программные средства, основанные на экспертных системах или инженерии знаний, широко распространены по всему миру [1, 2].

**Цель работы и постановка задачи.** Цель данной работы заключается в разработке экспертной системы подбора товаров в интернет-магазине с использованием искусственных нейронных сетей.

Для этого проводится сравнительный анализ основных методов подбора товаров с использованием экспертных систем с целью выявления их преимуществ и недостатков и выбора наилучшего для применения в разработке системы с использованием искусственных нейронных сетей.

**Основная часть.** Экспертные системы являются ключевым элементом искусственного интеллекта и широко применяются в различных сферах деятельности, включая бизнес. Они способны эффективно обрабатывать сложные запросы и осуществлять глубокий поиск в базах данных и хранилищах знаний. Нейронные сети, в свою очередь, обладают высокой скоростью обработки информации благодаря параллельной обработке. В экспертных системах присутствует строгий логический каркас, который автоматически проводит рассуждения и применяет правила заключения для решения поставленных задач [1, 2].

С развитием искусственного интеллекта системы становятся более сложными. Нейронные экспертные системы, использующие передовые алгоритмы, нейронные сети и экспертные знания, предлагают более точные и качественные решения, чем традиционные подходы. Эти системы, управляемые искусственным интеллектом, могут обрабатывать большие объемы данных быстро и качественно, что особенно ценно для решения срочных задач. Применение экспертных систем с использованием нейронных сетей позволяет решать сложные задачи без человеческого участия. Они также упрощают анализ данных путем мониторинга, поиска корреляций и уведомления экспертов об отклонениях от ожидаемых результатов [2].

Основные преимущества разработки таких систем включают:

- значительное увеличение производительности по сравнению с традиционными системами;
- способность быстро и точно достигать улучшенных результатов;
- обнаружение тонких закономерностей и сложных взаимосвязей;
- высокую гибкость, позволяющую адаптировать правила для эффективного принятия решений в различных сценариях.

Экспертная система состоит из базы знаний, подсистемы вывода, подсистемы объяснения, подсистемы приобретения знаний и диалогового процессора для взаимодействия с пользователем. Подсистема объяснения помогает понять, как система пришла к определенному решению, а подсистема приобретения знаний позволяет добавлять новые правила и параметры в базу знаний (рис. 1) [3].



Рис. 1. Структура экспертной системы

Экспертные системы основаны на рекомендациях специалистов в соответствующей области и воспроизводят мыслительные процессы человека. Для создания экспертной системы знания загружаются в базу данных, которая содержит правила и заключения для принятия решений. База знаний является ключевым компонентом экспертной системы. Экспертные системы, применяемые для подбора товаров в интернет-магазинах и основанные на различных методах искусственного интеллекта, обеспечивают удобный функционал для пользователей и значительно расширяют возможности выбора товаров. С развитием информационных технологий появилась возможность более точно определять характеристики и потребности целевой аудитории благодаря широким возможностям аналитики и коммуникации, предоставляемым интернет-инструментами [3, 4].

Экспертные системы используют человеческий опыт, интегрируя его в программное обеспечение. Нейронные сети, в свою очередь, способны создавать различные модели из обширных данных, распознавать сложные шаблоны и адаптироваться к новой информации. Они могут обучаться на примерах без необходимости программирования, принимать решения на основе неполной или противоречивой информации и не требуют высокой квалификации для использования. Искусственные нейросети представляют собой математические модели, основанные на биологических принципах функционирования нейронных сетей, где нейроны организованы в сложные взаимосвязанные сети [4].

Преимущества нейронных сетей включают их способность к обучению на примерах без явного программирования, адаптацию к различным типам информации и отсутствие необходимости в высококвалифицированных специалистах для их использования [4, 5].

Искусственные нейросети представляют собой математические модели, их программные реализации, созданные на основе принципов организации и функционирования биологических нейронных сетей, включающих в себя сеть взаимодействующих между собой, объединенных в слои формальных нейронов (рис. 2). Обучение нейронных сетей заключается в изменении коэффициентов в соответствии с различными методами, такими как алгоритм обратного распространения ошибки [4].

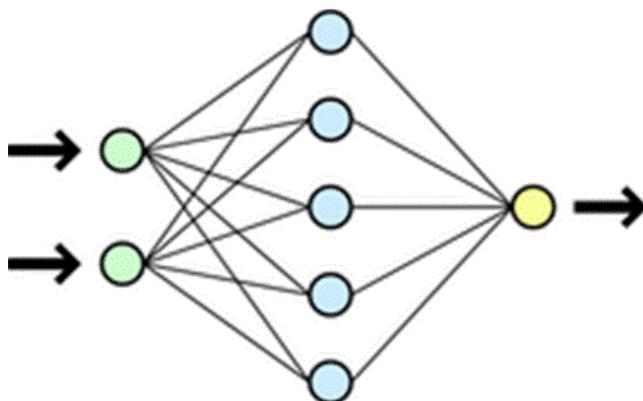


Рис. 2. Искусственная однослойная нейронная сеть

Первые искусственные нейронные сети были созданы в виде электронных схем, но с развитием вычислительной техники они стали программными [5].

В данной работе производится анализ экспертных систем поиска и подбора товаров с применением искусственных нейронных сетей.

Одной из таких экспертных систем является "Elbuz Jumper", которая обеспечивает фильтрацию товаров в интернет-магазине. Она предоставляет различные методы поиска [6]:

1. Фильтрация на основе карточки товара, позволяющая выбирать товары по их характеристикам и атрибутам (рис. 3).

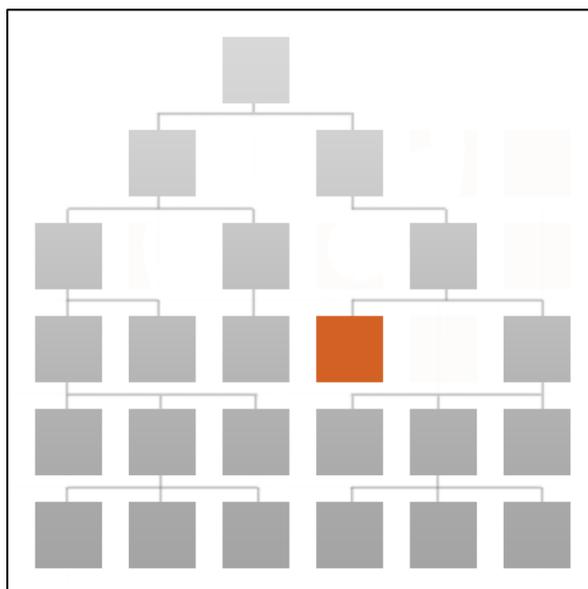


Рис. 3. Навигационный поиск элемента

2. Фасетная навигация, которая осуществляет умный поиск, например, подбор товаров для офиса (рис. 4).

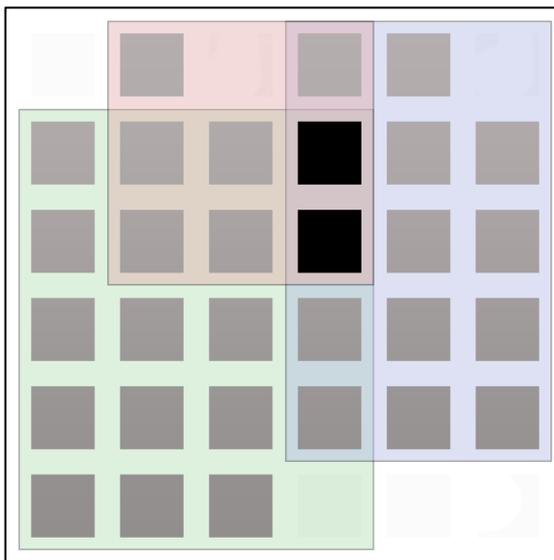


Рис. 4. Фасетный поиск элемента

3. Фильтрация по диапазону товаров, позволяющая выбирать товары в определенном диапазоне характеристик, таких как диагональ телевизора.

4. Фильтрация по новизне [6].

Подбор товаров по характеристикам помогает покупателю выбирать товары в соответствии с их свойствами. Фасетная навигация строится с учетом конкретных запросов покупателя, облегчая процесс поиска. Покупатель может применить необходимые фильтры и быстро найти нужный товар [6].

Еще одной экспертной системой является "Сотовик.ру", которая помогает быстро подобрать мобильный телефон по необходимым характеристикам из обширной базы данных, содержащей более 4000 моделей с более чем 30 параметрами [7].

Новая экспертная система поиска и подбора товаров «Эльдорадо» представляет собой инновационное решение, которое упрощает процесс выбора бытовой техники благодаря интуитивному интерфейсу, ориентированному на пользователя, и математической модели, минимизирующей количество вопросов-ответов. Она использует базу знаний, содержащую полный набор товаров, их параметры, иерархию параметров, а также вопросы, ответы и подсказки к каждому параметру [8].

Цель разработки этой экспертной системы заключается в сокращении времени на подбор товара и повышении эффективности интернет-магазина за счет автоматизации поиска по определенным характеристикам. Входные данные включают список параметров товара, сформированный на основе ответов пользователя, а выходные данные – список товаров, подобранных на основе этих параметров. Основные функции программы включают в себя удобный графический интерфейс, вывод подсказок и фотографий товаров, возможность пересмотра выбора товара в любой момент по любым параметрам, а также вывод результатов поиска. Центральным элементом экспертной системы является база знаний. Одним из наиболее распространенных способов представления знаний является продукционная модель, где каждое правило описывает фрагмент знаний в виде условия "если-то", называемого продукцией [9].

Продукционная модель имеет свои преимущества, такие как модульность, возможность замены старых правил на новые независимо друг от друга, и способность объяснения принятых решений. Однако у нее есть и недостатки, такие как менее эффективный процесс вывода, сложность управления и трудность представления иерархии понятий. Помимо продукционной модели, существует альтернативное представление знаний на основе фреймов, которое позволяет хранить родовидовую иерархию понятий в базе знаний явно. Фрейм представляет собой структуру, описывающую типичную ситуацию, включающую характеристики (слоты) и их значения. В отличие от продукционной модели, в слот могут входить несколько значений, и он может содержать фасет, определяющий диапазон или перечень возможных значений. Фреймы объединяются с помощью родовидовых связей, формируя иерархическую структуру, моделирующую предметную область. Фреймы обладают рядом преимуществ, таких как возможность включения процедур в слоты, возможность вычисления значений слотов и уменьшение объема памяти, занимаемого значениями слотов. Однако у фреймовых систем есть и недостатки, включая высокую сложность, что приводит к снижению скорости работы и увеличению сложности внесения изменений в иерархию. Семантические сети, в свою очередь, представляют собой наиболее общий способ представления знаний, где понятия и классы, а также отношения и связи между ними, представлены в виде сети. Вершины сети соответствуют объектам предметной области, а дуги представляют отношения между ними. Этот подход используется для отображения объектов, свойств и отношений в предметной области [9].

Семантические сети предоставляют множество возможностей для отражения связей между понятиями и объектами, однако они также обладают некоторыми недостатками, такими как слишком произвольная структура и необходимость различных процедур обработки информации, что усложняет программное обеспечение ЭВМ. На основе проведенного анализа выбран продукционный метод представления знаний для разработки экспертной системы. Этот выбор обусловлен рядом преимуществ данного метода, таких как высокая конкретизация и детализация информации, независимость элементов знаний друг от друга, а также возможность рассмотрения базы знаний как комплекса процессов. Продукционные модели отлично подходят для области с недостаточно формализованными знаниями и позволяют организовать решение задач асинхронно с высокой степенью параллельности [10].

**Выводы.** Использование экспертных систем, основанных на знаниях, в процессе подбора товаров в интернет-магазине позволяет повысить эффективность работы за счет сокращения времени поиска товаров и создания удобного и интуитивно понятного интерфейса для покупателей.

В результате анализа предметной области, способов реализации экспертной системы, моделей представления знаний, был выбран продукционный метод, разрешающий асинхронную организацию выполнения задач с высокой степенью параллельности. Продукционная модель является самым часто используемым способом представления знаний в экспертных системах, предполагающий поиск необходимых товаров на основе большого количества параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Махонин, В. Ю. Разработка инновационной автоматизированной интеллектуальной системы подбора товара в интернет-магазине / В. Ю. Махонин, М. П. Малыгина // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 3. – С. 5-13.
2. Журавлев, В. Г. Проектирование самообучающейся экспертной системы / В. Г. Журавлев, П. А. Хаустов // XIV Международная научно-практическая конференция «Молодежь и современные информационные технологии» (7-11 ноября 2016 года). – Томск: ТИУ, 2016. – С.16-20.
3. Экспертные системы и нейронные сети. Их использование для решения экономических задач. [Электронный ресурс] / Электронная библиотека libraryno: [Сайт]. – URL: <https://libraryno.ru/5-3-ekspertnye-sistemy-i-neuronnye-seti-ih-ispol-zovanie-dlya-resheniya-ekonomicheskikh-zadach-infsisvek/> (дата обращения 12.09.2023).
4. Кагории информационных систем. [Электронный ресурс] / Интуит: [Сайт]. – URL: [https://intuit.ru/studies/professional\\_retraining/964/courses/271/lecture/6876?page=7](https://intuit.ru/studies/professional_retraining/964/courses/271/lecture/6876?page=7) (дата обращения 12.09.2023).
5. Разработка экспертной системы подбора товаров в интернет-магазине [Электронный ресурс] / Библиофонд: [Сайт]. – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=600805> (дата обращения 12.09.2023).
6. Selection of goods by attributes - where does the search begin? [Электронный ресурс] / Elbuz: [Сайт]. – URL: <https://elbuz.com/en/podbor-tovarov-po-atributam> (дата обращения 12.09.2023).
7. Сотовик. Ру [Сайт]. – URL: <http://www.sotovik.ru> (дата обращения 12.09.2023).
8. Эльдорадо. Ру [Сайт]. – URL: <http://www.eldorado.ru> (дата обращения 12.09.2023).
9. Neural expert system in artificial intelligence [Электронный ресурс] / The AI Blog: [Сайт]. – URL: <https://aiblog.co.za/technology/neural-expert-system-in-artificial-intelligence> (дата обращения 15.09.2023).
10. Рязанов, М. Л. Анализ существующих средств разработки экспертных систем / М. Л. Рязанов // Известия Алтайского государственного университета. – 2008. – № 1. – С. 63-64.

*Поступила в редакцию 12.03.2024 г., рекомендована к печати 02.04.2024 г.*

**EXPERT SYSTEM FOR SELECTION OF GOODS IN AN ONLINE STORE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

*CHerenkov V.I., Nestrugina E.S.*

The article substantiates the advantages of using expert systems in the process of selecting goods in an online store using artificial neural networks. The use of expert systems makes it possible to increase the efficiency of an online store by reducing the time it takes to search for products based on a certain set of characteristics. When creating the expert system, special attention was paid to the implementation of the product selection mechanism, a convenient, intuitive graphical interface and easy integration with the online store website.

*Keywords:* expert system, neural networks, artificial intelligence, learning, knowledge.

**Черенков Владислав Игоревич**

магистрант кафедры компьютерных технологий  
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный  
университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: [majorzimalux@gmail.com](mailto:majorzimalux@gmail.com)

**CHerenkov Vladislav Igorevich**

Master student at Department of Computer  
Technologies of Donetsk State University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Нестругина Елена Сергеевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий  
государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: [e.nestrugina@donnu.ru](mailto:e.nestrugina@donnu.ru)

**Nestrugina Elena Sergeevna**

Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor, Associate Professor at Department of  
Computer Technologies of Donetsk State University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ И ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ПРЕДСТАВИМОСТЬ РЕШЕТОК**© 2024 *Максименко И.И.*

В данной работе рассмотрены понятия представления, фрагмента, кофрагмента, контрфрагмента и коконтрфрагмента для решеток со сложностью. Сформулированы критерии финитности двух видов представлений, описывающих процесс идентификации с эталоном в терминах предельных множеств специального «бэровского» метрического пространства.

**Ключевые слова:** представление, функциональное представление, фрагмент, кофрагмент, контрфрагмент, коконтрфрагмент, автомат, решетка со сложностью.

**Введение.** Одной из центральных проблем исследования дискретных систем управления является идентификация объекта (автомата, взвешенного графа, языка) из априорно заданного класса объектов на основе проведения с ним различных видов экспериментов. Для конечных классов автоматов получен ряд фундаментальных результатов [1-3]. Грунский И.С. в работе [3] впервые ввел идентификаторы, по которым можно восстанавливать внутренние состояния автомата. Для их изучения было введено понятие частичного графа-фрагмента с гомоморфизмом в исследуемый автомат, и противоположное понятие кофрагмента как запрещенного поведения автомата. Впервые предложено понятие идентификатора автомата, однозначно восстанавливающего компоненты автомата.

На основании понятий фрагмента и кофрагмента введено центральное понятие представления автомата-эталона относительно фиксированного класса автоматов как такой пары «фрагмент-кофрагмент» [3], которая однозначно выделяет автомат из объединения класса и автомата-эталона. В ставших уже классическими работах [2, 3] детально исследованы необходимые и достаточные условия существования представлений. В работе [3] было показано, что множество всех автоматов Мили над фиксированным вход-выходным алфавитом алгебраически являются решеткой с операциями декартового произведения и прямой суммы автоматов, что и подсказало идею исследовать представимость на абстрактных решетках.

В работах [4-6] был предложен подход к исследованию экспериментов в классах автоматов Мили на основе их представления конструктивными окрестностями в «бэровских» метрических пространствах автоматов. Позднее, данный подход был распространен на произвольные неструктурированные множества дескрипторов [7], специализированные алгебраические структуры [8] и алгебры Клини общего вида [9, 10], что позволило обобщить понятие представления, выделив самые существенные параметры экспериментов. Статья идейно перекликается с результатами работы [11], в которой рассматривается идентификация экспериментальных объектов на основании функций сложности.

Целью настоящей статьи является перенос этих идей на решетки специального вида, что позволяет исследовать свойства обобщенных представлений на основе изучения понятия идентификации класса с эталоном в терминах метрических «бэровских» пространств. В рамках данной концепции введены и изучены алгебраические свойства множеств фрагментов, кофрагментов, контрфрагментов и коконтрфрагментов на решетках со сложностью.

Статья состоит из введения, пяти разделов и выводов. В первом разделе введены необходимые понятия. Во втором разделе описаны свойства контрольных экспериментов с автоматами Мили, которые являются основой дальнейших исследований представлений на решетках. В третьем разделе изучены алгебраические свойства решеток со сложностью. В четвертом разделе введены и исследованы простые представления решеток. В пятом разделе изучаются более сложные функциональные представления решеток, обобщающие поведение и ко-поведение автоматов Мили. В четвертом и пятом разделах приведены критерии существования финитных представлений в терминах предельных множеств для «бэровских» метрик.

**Основные понятия и определения.** Приведем основные понятия и обозначения из теории множеств, теории графов, теории автоматов и теории решеток [1-4, 12].

Под автоматом Мили будем понимать систему вида  $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$ , где  $S, X, Y$  – алфавиты состояний, входов и выходов соответственно,  $\delta \subseteq S \times X \times S$  – функция переходов, а  $\lambda \subseteq S \times X \times Y$  – функция выходов [3].

Контрольным экспериментом относительно априорного класса  $F \subseteq A(U)$  и автомата-эталона  $A \in A(U)$  назовем такое конечное множество вход-выходных слов  $W \subseteq L_A$ , что из включения  $W \subseteq L_B$  для некоторого  $B \in F$ , вытекает  $A = B$ .

Множество всех вход-выходных слов автомата  $A$  длины не больше  $k$  обозначим через  $L_A^k$ . Для исследования свойств контрольных экспериментов на классе  $A(U)$  введем специальную «бэровскую» метрику  $\beta$  [4], полагая, что  $\beta(A, B) = 0$ , если  $A = B$  и  $\beta(A, B) = \frac{1}{k}$ , где  $L_A^k \neq L_B^k$  и  $L_A^{k-1} = L_B^{k-1}$ . В работе [4] показано, что данная метрика является вычислимой, то есть существует алгоритм вычисления расстояния между произвольными точками метрического пространства автоматов  $(A(U), \beta)$ .

Окрестностью с центром  $A \in (A(U), \beta)$  и радиусом  $r \in R^+$  называется следующее множество автоматов  $O_r(A) = \{B \mid \beta(A, B) < r\}$ . Автомат  $A \in (A(U), \beta)$  является предельным автоматом класса  $F \subseteq A(U)$ , если для произвольного  $r > 0$  класс автоматов  $O_r(A) \cap (F - \{A\})$  не пуст.

В статье рассматриваются решетки вида  $\mathbb{R} = \langle A, \vee, \wedge, n \rangle$ , где  $\vee, \wedge$  – решеточные операции [12], а  $n: A \rightarrow N^+ \cup \infty$  – такая невозрастающая функция сложности, что для любых двух объектов решетки  $A, B$  и некоторого фиксированного натурального числа  $K$  выполнено соотношение  $n(A \vee B) \leq \max(n(A), n(B)) + K$ .

Элементы решетки будем называть объектами, чтобы подчеркнуть идейную связь с теорией автоматов. Объект  $A$  решетки назовем финитным объектом, если его сложность  $n(A)$  конечна и инфинитным в противном случае. Частичный порядок  $\leq$  на объектах индуцируется решеточными операциями [12].

Каждому объекту  $A$  поставим в соответствие множество фрагментов  $Fr(A) = \{B \mid B \leq A\}$ , кофрагментов  $CoFr(A) = \{B \mid A \leq B\}$  и контрфрагментов  $CtFr(A) = \{B \mid A \neg \leq B, B \neg \leq A\}$ . Эти понятия естественным образом переносятся на множества объектов. Объект решетки  $C$  назовем разделяющим для объектов  $A$  и  $B$  ( $C \in S(A, B)$ ), если выполнено точно одно из соотношений  $(C \leq A, C \neg \leq B)$  или  $(C \neg \leq A, C \leq B)$ .

Решетку назовем финитно разделимой, если для произвольных различных объектов существует разделяющих их финитный объект. На множестве объектов финитно разделимой решетки зададим «расстояние» между объектами  $\beta$  аналогично «бэровской» метрике [4], полагая, что  $\beta(A, B) = 0$ , если  $A \cong B$  и  $\beta(A, B) = 1/r$ , где  $r = \inf\{n(C) \mid C \in S(A, B)\}$  в противном случае.

Через  $LimF$  обозначим множество предельных точек некоторого множества  $F$  в метрическом пространстве  $(A(U), \beta)$  [4]. Пару объектов  $(A, B) \in Fr(A_0) \times CtFr(A_0)$  будем считать представлением для  $A_0 \in \mathbb{R}, F \subseteq \mathbb{R}$ , если для некоторого  $C \in F$  из включения  $(A, B) \in Fr(C) \times CtFr(C)$  вытекает  $C = A_0$ . Зафиксируем некоторый верхний гомоморфизм полной решетки [12]  $\Omega : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . Далее, на решетке определим новую функцию  $\Omega^\infty : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , полагая  $\Omega^\infty = \bigvee_{k=0}^\infty \Omega^k$ . Такая функция существует в силу полноты решетки и является аналогом «поведения» автомата [3, 12].

Рассмотрим теперь функциональный подход к изучению представлений на решетках со сложностью. Пусть на некоторой решетке  $\mathbb{R}$  заданы две такие произвольные функции  $F : \mathbb{R} \rightarrow 2^{\mathbb{R}}$  и  $G : \mathbb{R} \rightarrow 2^{\mathbb{R}}$ , что для любых двух объектов решетки  $A, B$  выполнены следующие соотношения

$$F(A \vee B) = F(A) \cup F(B), F(A \wedge B) = F(A) \cap F(B) \quad \text{для функции } F \text{ и}$$

$$G(A \vee B) = G(A) \cap G(B), G(A \wedge B) = G(A) \cup G(B) \quad \text{для функции } G.$$

Для полных решеток данные функции легко распространяются на произвольное число объектов. Для объекта  $A$  множество  $F(A)$  является обобщением понятия поведения автомата, а множество  $G(A)$  – ко-поведения соответственно [3].

Действительно, рассмотрим множество всех инициальных автоматов Мили в некотором вход-выходном алфавите  $U$ . Это множество является решеткой с двумя решеточными операциями – декартовое произведение и прямая сумма автоматов [3]. Через  $F(A)$  обозначим множество всех слов автомата, порождаемых инициальной вершиной. Множество  $G(A)$  определим как дополнение  $U^* - F(A)$ . Нетрудно показать, что функции  $F, G$  удовлетворяют вышеприведенным соотношениям.

Для произвольного объекта  $A$  множества  $F(A), G(A), \overline{F(A)}, \overline{G(A)}$  обобщают понятия множеств фрагментов, кофрагментов, контрфрагментов и коконтрфрагментов [10] соответственно.

Формулой назовем произвольное выражение, полученную из  $F(A), G(A), \overline{F(A)}, \overline{G(A)}$  конечным применением операций  $\cup, \cap$ . Функция сложности легко распространяется на формулы с сохранением свойства не возрастания относительно включения  $\subseteq$  по принципу  $n(T(A)) \leq n(A) + K_T$ , где  $T(A)$  – любая функция из перечня  $F(A), G(A), \overline{F(A)}, \overline{G(A)}$ .

Формулу  $P$  назовем функциональным разделителем объектов  $A$  и  $B$  ( $P \in S_F(A, B)$ ), если выполнено точно одно из соотношений  $A \in P, B \notin P$  или  $A \notin P, B \in P$ . Решетку назовем функционально разделимой, если для любых различных объектов существует некоторый функциональный разделитель. Формула  $P$  является функциональным представлением для  $A_0 \in P, F \subseteq \mathbb{R}$ , если для произвольного объекта  $C \in F$  из включения  $C \in P$  вытекает, что  $A_0 = C$ .

**Контрольные эксперименты с конечными автоматами.** Для метрического пространства автоматов Мили  $(A(U), \beta)$  справедлив метрический критерий существования контрольного эксперимента – теорема 1:

**Теорема 1.** Множество вход-выходных слов  $L_A^k$  для некоторого натурального числа  $k$  является контрольным экспериментом относительно класса  $F \subseteq A(U)$  и автомата-эталона  $A \in A(U)$  тогда и только тогда, когда  $A$  не является предельной точкой  $F$ .

Справедливо топологическое следствие 2:

**Следствие 2.** Всегда существует контрольный эксперимент для открытого класса автоматов  $F \subseteq A(U)$  и автомата-эталона  $A \in A(U)$  в метрическом пространстве автоматов  $(A(U), \beta)$ .

В работе [3] было показано, что для любого конечного класса автоматов и автомата-эталона всегда существует алгоритм построения контрольного эксперимента.

Для произвольных потенциально бесконечных классов изучение свойств контрольных экспериментов носит часто не конструктивный характер и в общем случае далеко от завершения [3, 4]. Однако, автором в [5, 6] найден ряд финитно-определенных потенциально бесконечных классов, для которых существует алгоритм построения контрольных экспериментов.

**Алгебраические свойства подмножеств решеток.** Для решеток со сложностью  $\mathbb{R} = \langle A, \vee, \wedge, n \rangle$  имеет место утверждение 3:

**Утверждение 3.** Функция на полной решетке  $\Omega^\infty : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  является функцией замыкания решетки [12].

Алгебраическая структура множеств фрагментов, кофрагментов и контрфрагментов характеризуется теоремой 4:

**Теорема 4.**

1. Для произвольного объекта  $A$  решетки (полной решетки) множество  $Fr(A)$  является решеткой (полной решеткой).
2. Для произвольных объектов решетки  $A$  и  $B$  выполнены соотношения:

$$Fr(A \wedge B) = Fr(A) \cap Fr(B), Fr(A \vee B) \supseteq Fr(A) \cup Fr(B).$$

3. Для произвольного объекта  $A$  решетки (полной решетки) множество  $CoFr(A)$  является решеткой (полной решеткой).
4. Для произвольных объектов решетки  $A$  и  $B$  выполнены соотношения:

$$CoFr(A \vee B) = CoFr(A) \cap CoFr(B), CoFr(A \wedge B) \supseteq CoFr(A) \cup CoFr(B).$$

5. Для произвольного объекта решетки множество его контрфрагментов в общем случае не является решеткой.

Структура полурешеток решетки описана в утверждении 5:

**Утверждение 5.**

1. Для произвольной верхней полурешетки  $X$  решетки  $\mathbb{R}$  множество  $Fr(X)$  является решеточным идеалом.
2. Для произвольной нижней полурешетки  $X$  решетки  $\mathbb{R}$  множество  $CoFr(X)$  является решеточным фильтром.

Из теоремы Кнастера-Тарского о неподвижных точках [12] вытекает следующее утверждение 6:

**Утверждение 6.**

1. Все  $\Omega^\infty$  - замкнутые объекты полной решетки составляют полную решетку.
2. Все  $\Omega^\infty$  - замкнутые фрагменты  $\Omega^\infty$ -замкнутого объекта полной решетки составляют полную решетку.

Функциональная делимость описана в утверждении 7:

**Утверждение 7.**

1. Для функционально делимой решетки при фиксированных объектах  $A, B$  множество  $S_F(A, B)$  является нижней полурешеткой относительно операции пересечения.
2. Для функционально делимой полной решетки при фиксированных объектах  $A, B$  множество разделителей  $S_F(A, B)$  является нижней полной полурешеткой относительно операции пересечения.

Алгебраическую структуру функциональных фрагментов, кофрагментов, контрфрагментов и коконтрфрагментов характеризует теорема 8:

**Теорема 8.**

1. Для решетки  $\mathbb{R}$  множества  $F(\mathbb{R}), G(\mathbb{R}), \overline{F(\mathbb{R})}, \overline{G(\mathbb{R})}$  являются решетками относительно операций  $\cup, \cap$ .
2. Для полной решетки  $\mathbb{R}$  множества  $F(\mathbb{R}), G(\mathbb{R}), \overline{F(\mathbb{R})}, \overline{G(\mathbb{R})}$  являются полными решетками относительно операций  $\cup, \cap$ .
3. Для финитной решетки  $\mathbb{R}$  множества  $F(\mathbb{R}), G(\mathbb{R}), \overline{F(\mathbb{R})}, \overline{G(\mathbb{R})}$  являются финитными решетками относительно операций  $\cup, \cap$ .
4. Для полной финитной решетки  $\mathbb{R}$  множества  $F(\mathbb{R}), G(\mathbb{R}), \overline{F(\mathbb{R})}, \overline{G(\mathbb{R})}$  являются полными финитными решетками относительно операций  $\cup, \cap$ .

**Представимость на решетках.** Имеет место утверждение 9, не имеющее аналогов в теории экспериментов с автоматами:

**Утверждение 9.**

1. Для произвольной решетки существует, в общем случае инфинитное, представление для произвольного объекта  $A \in \mathbb{R}$  и конечного множества  $F \subseteq \mathbb{R}$ .
2. Для любой полной решетки существует, в общем случае инфинитное, представление для объекта  $A \in \mathbb{R}$  и произвольного множества  $F \subseteq \mathbb{R}$ .

Данное утверждение показывает принципиальное различие в представлении автоматов и произвольных решеток со сложностью.

Для замыкания  $\Omega^\infty$  выполнено утверждение 10 об инвариантности представлений относительно операции замыкания:

**Утверждение 10.** Если пара объектов  $(C, D)$  является представлением относительно  $A \in \mathbb{R}$  и класса  $F \subseteq \mathbb{R}$  в полной решетке, тогда пара  $(\Omega^\infty(C), \Omega^\infty(D))$  является представлением соответственно для  $\Omega^\infty(A) \in \mathbb{R}$  и  $\Omega^\infty(F) \subseteq \mathbb{R}$ .

Для финитно делимых полных решеток справедлив следующий метрический критерий финитной представимости-теорема 11:

**Теорема 11.** Для финитно делимой полной решетки  $A$  существует финитное представление для любых  $A \in \mathbb{R}$  и  $F \subseteq \mathbb{R}$  тогда и только тогда, когда выполнено соотношение  $A \notin \lim F$ .

Теорема 11 показывает тесную связь теории представлений на различных алгебраических структурах с теорией метрических пространств со специальной «бэровской» метрикой [7-10].

**Функциональное представление решеток.** Для функционально разделимых решеток справедливо следующее утверждение 12, аналогичное утверждению для автоматов:

**Утверждение 12.** *Для произвольной функционально разделимой решетки существует функциональное представление для произвольного объекта  $A \in \mathbb{R}$  и конечного множества  $F \subseteq \mathbb{R}$ .*

Для полных функционально разделимых решеток справедливо следующее утверждение 13, которое не имеет аналогов в теории автоматов, что показывает целесообразность изучения такого рода представлений:

**Утверждение 13.** *Для произвольной полной функционально разделимой решетки существует функциональное, в общем случае инфинитное, представление для произвольного объекта  $A \in \mathbb{R}$  и любого множества  $F \subseteq \mathbb{R}$ .*

Для финитно разделимых полных решеток со сложностью справедлив следующий метрический критерий финитной представимости-теорема 14:

**Теорема 14.** *Для финитно функционально разделимой полной решетки финитное представление для всякого  $A \in \mathbb{R}$  и произвольного множества  $F \subseteq \mathbb{R}$  существует тогда и только тогда, когда  $A \notin \lim F$ .*

Теоремы 11 и 14 показывают наличие общего критерия финитной представимости, аналогичного критерию для классов автоматов [4], неструктурированных объектов [7], алгебраических систем специального вида [8] и алгебр Клини на полукольцах [9, 10], что позволяет говорить о наличии некоторой общей теории представлений на большом классе алгебраических структур.

**Выводы.** В данной работе исследования по теории представлений для автоматов Мили обобщены на решетки со сложностью. Данная идея возникла из исследований Грунского И.С. и его учеников, которые начали рассматривать множество автоматов с фиксированным алфавитом как решетку с решеточными операциями декартового произведения и прямой суммы автоматов. Показано, что для различных определений представимости выполнен центральный критерий финитной представимости в терминах предельных множеств «бэровских» метрических пространств. Данный метод позволяет получить аналогичные метрические критерии для целого ряда алгебраических структур. Общность таких результатов позволяет сделать вывод о наличии достаточно общей абстрактной теории представимости классов объектов как автоматной, так и не автоматной природы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцев, А. Б. Введение в теорию автоматов / А. Б. Кудрявцев, С. В. Алешин, А. С. Подколзин. – М.: Наука, 1985. – 320 с.
2. Грунский, И. С. Представления конечных автоматов фрагментами поведения / И. С. Грунский, В. А. Козловский, Г. Г. Пономаренко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.
3. Грунский, И. С. Синтез и идентификация автоматов / И. С. Грунский, В. А. Козловский. – Киев.: Наук. думка, 2004. – 245 с.
4. Максименко, И. И. Эксперименты в финитно-определенных метрических пространствах автоматов : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.01.09 / Максименко Игорь Иванович ; СГУ. – Саратов, 2000. – 16 с.
5. Максименко, И. И. Распознавание в эффективно-заданных классах автоматов / И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 1998. – Т. 2. – С. 115-123.

6. Максименко, И. И. Эксперименты в классах реализации недетерминированных автоматов / И. И. Максименко // Доклады НАН Украины. – 1999 г. – Т. 7. – С. 95-99.
7. Грунский, И. С. Распознавание неструктурированных объектов / И. С. Грунский, И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 2010. – Т. 21. – С. 76-85.
8. Максименко, И. И. Фinitные представления в алгебраических системах / И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 2011. – Т. 18. – С. 56-67.
9. Максименко, И. И. Распознавание в алгебрах Клини на идемпотентных полукольцах / И. И. Максименко, В. Н. Котенко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 24-32. – EDN ХВВТЮУ.
10. Максименко, И. И. Алгебраические представления в «бэровских» пространствах / И. И. Максименко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 54-64. – EDN УВТКЮ.
11. Третьяков, И. А. Функции сложности для выделения и распознавания характерных участков экспериментальных кривых / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2017. – № 2. – С. 101-107. – EDN YMDWPZ.
12. Гретцер, Г. Общая теория решеток: пер. с английского / под ред. Д. М. Смирнова / Г. Гретцер. – М.: Мир, 1981. – 456 с.

*Поступила в редакцию 15.03.2024 г., рекомендована к печати 09.04.2024 г.*

## ALGEBRAIC AND TOPOLOGICAL REPRESENTATIONS IN LATTICES

***Maksimenko I.I.***

This paper examines the concepts of representation, fragment, cofragment, contrfragment and cocontrfragment for lattices with complexity. Criteria for the finiteness of two types of representations are formulated that describe the process of identification with the standard in terms of limit sets of a special “Beere” metric space.

**Keywords:** representation, functional representation, fragment, cofragment, contrfragment, cocontrfragment, finite automata, lattice with complexity.

**Максименко Игорь Иванович**

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: igor.maksimenko\_1967@mail.ru

**Maksimenko Igor Ivanovich**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer at Department of Computer Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

## МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ОБЪЁМА ПОБОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

© 2024 *Рушечников Я.И., Данилов В.В., Третьяков И.А., Ступак В.А.*

В данной работе осуществлена попытка оценки объема побочных электромагнитных излучений и наводок посредством программно-определяемой радиосистемы SDR Play RSP1 и математического аппарата табличного процессора MS Excel. Представлена универсальная алгоритм-методика оценки количественных параметров радиосигналов.

**Ключевые слова:** ПЭМИН, программно-определяемая радиосистема, спектральный анализ, быстрое преобразование Фурье, АСНИ радиосигналов.

**Введение.** В условиях постоянно растущей компьютеризации всех отраслей человеческой деятельности особенно важной проблемой информационной безопасности являются побочные электромагнитные излучения (ПЭМИН) [1]. Исследования данного явления в условиях сегодняшней постоянно растущей сложности электромагнитной обстановки носят востребованный характер [2-4]. Несмотря на наличие функциональных аналогов, реализующих механизм оценки ПЭМИН, разработка новых способов определения характеристик ПЭМИН является перспективной и востребованной научно-технической задачей. По многочисленности и разнообразию вычислений решение такой задачи невозможно без применения инструментов идентификации [5-7] и создания специализированных средств автоматизации, таких как автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) радиосигналов [8, 9]. Такие АСНИ представляют собой сочетание технических средств, специализированного программного обеспечения и рекомендаций по их применению.

**Анализ специализированных комплексов.** Существует целый класс специализированного оборудования для оценки защищённости технических средств, а также для проведения специальных аттестационных испытаний объектов автоматизации от утечек посредством сверхнормативных ПЭМИН, например комплексы Навигатор (ПЗМ-П6М), Легенда-20, Сигурд. Такие комплексы, аналогично АСНИ, состоят из набора оборудования, программного обеспечения и методической документации, что позволяет производить оценку показателей защищённости от утечек по ПЭМИН в соответствии с действующим законодательством. В состав подобного рода комплексов обычно входят:

1. Анализатор спектра с сенсорными параметрами, максимумы которых раскрываются в частотном диапазоне частого наблюдения ПЭМИН.
2. Набор измерительных антенн.
3. Калиброванные частотные источники и пробники напряжения.
4. Проприетарное программное обеспечение.
5. Набор технической и методической документации для проведения испытаний.

*Исследование проводилось в рамках научной г/б темы «Исследование природы каналов побочных электромагнитных излучений и наводок элементов и устройств офисной вычислительной техники» (регистрационный номер 124012400347-2).*

Проведенный анализ показывает, что основной особенностью подобного рода комплексов является синтез элементной базы, кроме того, установлено:

1. Большая часть сенсорных способностей комплекса определяется спектроанализатором. К ним относятся чувствительность на разных диапазонах, а также уровень собственных шумов прибора.
2. Некоторая часть функционала, реализующая поиск и анализ ПЭМИН, основана на разнообразных компьютерных моделях и выражена в виде программного обеспечения.
3. Дополнительные функции по повышению качества и возможно скорости измерения также реализуются средствами программного обеспечения с использованием современных средств, таких как машинное обучение и глубокие нейронные сети.

В качестве примера такого специализированного комплекса рассмотрен Навигатор П5М, представленный на рисунке 1. Характеристики непосредственно спектроанализатора в комплексе Навигатор П5М следующие: диапазон рабочих частот от 1 кГц до 13.6 ГГц, значение уровня собственных шумов - не менее -128 дБм, значение погрешности измерения уровня сигнала  $\pm 0,5$  дБ. Также стоит отметить, что Навигатор П5М в качестве своего ядра может использовать и другие спектроанализаторы.



Рис. 1. Комплекс Навигатор П5М

В рамках данной работы осуществлена попытка оценки объема ПЭМИН используя в качестве широкополосного спектроанализатора программно-определяемую радиосистему SDR Play RSP1 (стоимость которой ниже более чем в 100 раз, чем у вышерассмотренных комплексов), а также математический аппарат табличного процессора MS Excel.

**Спектральный анализ, как основной метод оценки характеристик ПЭМИН.** Программно-определяемая радиосистема SDR Play RSP1, которая в рамках исследования используется в качестве широкополосного спектроанализатора, имеет механизм экспорта результатов измерений, формирующий данные, пригодные для обработки в таких программах, как MS Excel либо MATLAB. На основе таких экспортированных данных можно провести некоторую количественную оценку сигнала (полосы частот), на основе которой можно сформировать автоматизированный вывод, относительно принадлежности сигнала к классу, в том числе и к ПЭМИН.

Так как базовую часть компьютерной обработки — это вычисление быстрого преобразования Фурье (FFT), делает сам SDRPlay, то используется тот же закон, что и для обычных случаев анализа сигнала, а именно:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn},$$

где:

$X_k$  - комплексные значения, полученные в результате преобразования Фурье,

$x_n$  - входные временные данные (в нашем случае, сигнал из SDR),

$N$  - количество отсчетов (длина входной последовательности),

$k$  - индекс частотной компоненты в результате FFT.

Если визуализировать полученные данные на этом этапе, то получается спектрограмма, которая во многом сходна с тем, что было на экране монитора SDR Play Spectrum Analyzer, за исключением того, что для отрисовки на мониторе использовалась явная выборочная децимация, или прореживание сигнала, а при визуализации спектра в Excel (рис. 2), все данные алгоритма передаются на вход визуализатора.



Рис. 2. Визуализация спектра сигнала в MS Excel

При помощи функционального аппарата табличного процессора MS Excel можно реализовать некоторый расчет дополнительных параметров, расширяющих информативность исследуемого сигнала. К таким параметрам можно отнести спектральную плотность (PSD). Данная характеристика описывает распределение мощности сигнала по частотам в его спектре. Она представляет собой меру, указывающую, какая часть мощности сигнала находится в каждом частотном диапазоне.

Вычисление спектральной плотности имеет свои особенности, связанные с тем, что данный алгоритм в рамках таблиц удобнее всего реализовывать итерационно, благодаря чему, можно явно контролировать параметры на этап выполнения вычислений, особенно если учитывать, что размерность выборки с экспериментальными данным и составляет более 40000 записей.

Процесс расчета спектральной плотности средствами Excel представляет собой формулу следующего вида ( $=\text{IMABS}(\text{Ячейка с параметром FFT})^2$ ). Далее указанная формула масштабируется для всей выборки экспериментальных данных (40962 строк).

Если визуализировать полученный результат спектральной плотности (рис. 3), то можно заметить закономерность, которая указывает на то, что полученный график является зеркальным отражением спектрограммы от анализатора (рис. 2), с тем учётом, что порядок величин дополнительно нормироваться на частоту дискретизации. При этом основная форма и базовые элементы никаким образом не поменяли форму. Из этого можно сделать вывод, что выходные данные спектроанализатора и есть непосредственно спектральная плотность сигнала.



Рис. 3. Рассчитанная спектральная плотность сигнала ПЭМИН

**Формализация алгоритма оценки ПЭМИН.** Опираясь на то, что представленный на рисунке 2 спектр сигнала ПЭМИН при математической обработке и попытке вычисления спектральной плотности на массиве выборок не позволяет качественно оценить сигнал, было принято решение о статистической обработке экспериментальных данных, по которой можно судить о явной принадлежности сигнала к классу ПЭМИН.

Обоснованность данной гипотезы основывается на непосредственном сравнении спектра сигнала ПЭМИН и спектра сигнала вещательной станции, которые представлены на рис. 4 и рис. 5.

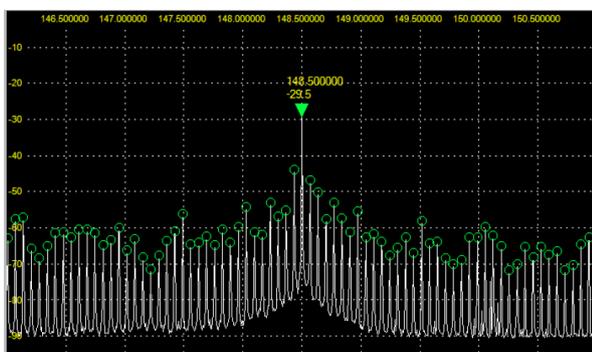


Рис. 4. Спектр сигнала ПЭМИН

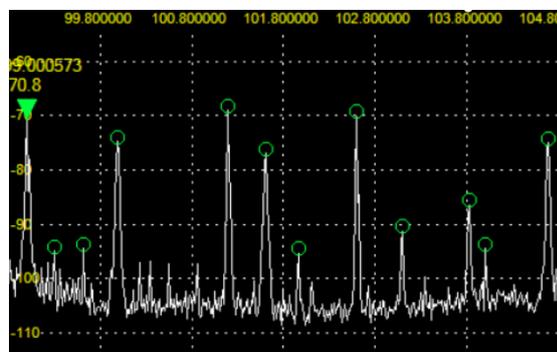


Рис. 5. Спектр сигнала вещательных станций VHF

Инструмент автоматизированного определения количества локальных максимумов, который встроен практически в каждый современный спектроанализатор позволяет наглядно оценить, что в случае спектра ПЭМИН сигнала (рис. 4) количество максимумов при пересчёте на частотную область значительно выше, нежели у сигналов вещательных станций. Кроме того, закономерность, следующая из удалённости сигналов по частотной оси от главного пика (рис. 4), также свидетельствует о том, что сигнал в комплексе имеет структуру, подходящую на ПЭМИН.

Используя математический аппарат MS Excel установлено, что количество локальных максимумов в случаях с ПЭМИН и с вещательной станцией практически равны в идентичных условиях экспериментов, но их распределение и концентрация отличаются следующим образом:

1. Совокупности локальных максимумов для ПЭМИН сигнала имеют зеркальную структуру, и несколько схожи по своей форме на нормальное распределение.
2. Совокупности локальных максимумов для сигнала вещательной станции имеют более случайную природу, как с непосредственными значениями мощности, так и в порядке их разброса на частотной оси.

Для реализации попытки масштабирования в ширину данного подхода необходимо провести следующий итеративный эксперимент: фиксируя все основные характеристики спектроанализатора (кроме полосы пропускания) произвести измерения ПЭМИН и вещательного сигнала с систематизацией и автоматизированным расчетом. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сводная характеристика количественных параметров в спектре сигнала

Ширина обзора	ПЭМИН (148,5 МГц)		Вещательная станция (103,8 МГц)		Количество точек в выборке
	Количество пиков в SDR Play	Количество пиков в Excel	Количество пиков в SDR Play	Количество пиков в Excel	
500 кГц	11	7800	3	803	32769
1 МГц	19	8286	3	1269	32769
2 МГц	31	8018	8	3953	40699
5 МГц	87	19680	10	7945	80000
10 МГц	65	39917	13	10176	160000
20 МГц	59	78936	19	19793	320000

Как видно из таблицы 1, количество локальных максимумов, которые вычисляются алгоритмом в Excel коррелировано с количеством максимумов в программном обеспечении спектроанализатора. Данная структура корреляция сохраняется практически на всех ширинах окна обзора спектроанализатора вплоть до 20 МГц. Если же производить испытания в условиях наличия и отсутствия ПЭМИН сигнала на одинаковых частотах, то подобная статистическая картина будет демонстрировать ещё большую корреляцию в соотношении количества локальных максимумов к ширине обзора.

Резюмируя вышеизложенное, сформулирована следующая (рис. 6) алгоритм-методика оценки количественных параметров, входящих в сигнал, для непосредственной классификации, например ПЭМИН или НЕ ПЭМИН.

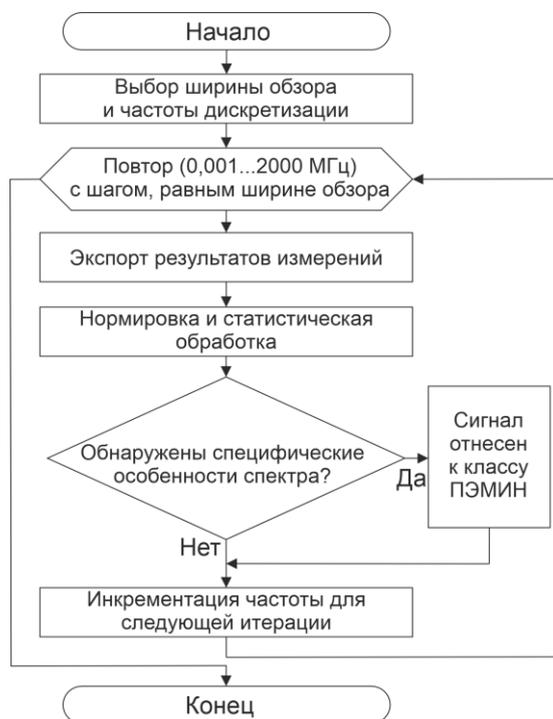


Рис. 6. Алгоритм-методика оценки количественных параметров сигнала

**Выводы.** Таким образом, представленная алгоритм-методика позволяет автоматизировано определять принадлежность исследуемого сигнала к классу ПЭМИН при помощи оценки количественных характеристик в виде локальных максимумов, а также их плотности на оси частот. Последующий анализ комбинаций локальных максимумов позволит определить энергетические характеристики сигнала, а также оценить потенциальный периметр контролируемой зоны, в рамках которой сигналы ПЭМИН является техническим каналом утечки информации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Проблемы информационной безопасности электромагнитных излучений и наводок в средствах вычислительной техники / И. А. Третьяков, Я. И. Рушечников // Информационные системы и технологии: материалы международного научного конгресса по информатике. В 3 ч. (Минск, 27–28 октября 2022 г.). – Ч. 1. – Минск: БГУ, 2022. – С. 108-112. – EDN GTKGIM.
2. Шпилевой, А. А. О возможности аналитического обнаружения сигнала ПЭМИН в видеоинтерфейсах стандарта HDMI / А. А. Шпилевой, А. А. Персичкин // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физ.-мат. и техн. науки. – 2022. – № 1. – С. 34-39. – EDN AWTJYC.
3. Паршуткин, А. В. Повышение защищенности информации от утечки через побочные электромагнитные излучения / А. В. Паршуткин, М. Р. Неаскина // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 3(49). – С. 82-89. – DOI 10.21681/2311-3456-2022-3-82-89. – EDN ARQCJO.
4. Foziljonov, Kh. Active methods and means of information protection against leakage through channels of side electromagnetic radiation and interference / Kh. Foziljonov, I. Faziljanov // Science and innovation. – 2023. – V. 2(A4). – P. 46-52. – DOI 10.5281/zenodo.7818479.
5. Третьяков, И. А. Процедура формирования грамматики для описания спектрограмм технических каналов утечки информации / И. А. Третьяков // Информатика и кибернетика. – 2022. – № 2(28). – С. 11-16. – EDN FAGXJS.

6. Третьяков, И. А. Определение типа модуляции сигнала посредством машинного обучения / И. А. Третьяков, Я. И. Рушечников, В. В. Данилов // Искусственный интеллект: теоретические аспекты и практическое применение : материалы Донецкого международного научного круглого стола (Донецк, 24 мая 2023 г.). – Донецк: ФГБНУ «ИПИИ», 2023. – С. 212-216. – EDN CTZTNE.
7. Максименко, И. И. Распознавание в алгебрах Клини на идемпотентных полукольцах / И. И. Максименко, В. Н. Котенко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 24-32. – EDN XVBTYW.
8. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, С. В. Борщевский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 34-39. – EDN CADMAM.
9. Третьяков, И. А. Применение оптических методов обработки информации в АСНИ радиосигналов / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, В. А. Ступак // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 42-49. – DOI 10.5281/zenodo.10974622. – EDN LSKSPA.

*Поступила в редакцию 03.04.2024 г., рекомендована к печати 25.04.2024 г.*

## THE METHOD OF AUTOMATED ASSESSMENT OF THE VOLUME OF SIDE ELECTROMAGNETIC EMISSIONS

*Rushechnikov I.A.I., Danilov V.V., Tretiakov I.A., Stupak V.A.*

In this paper an attempt is made to estimate the volume of side electromagnetic radiation and interference by means of the software-defined SDR Play RSP1 radio system and the mathematical apparatus of the MS Excel spreadsheet processor. A universal algorithm-methodology for estimating the quantitative parameters of radio signals is presented.

**Keywords:** TEMPEST, software-defined radio system, spectral analysis, FFT, ASRS of radio signals.

### **Рушечников Ярослав Иванович**

старший преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: ya.rushechnikov@donnu.ru

### **Rushechnikov I.Aroslav Ivanovich**

Senior Lecturer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Данилов Владимир Васильевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: ut5iv@mail.ru

### **Danilov Vladimir Vasilevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Третьяков Игорь Александрович**

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

### **Tretiakov Igor Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Ступак Владимир Аврамович**

старший научный сотрудник кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: v.a.s.19470415@gmail.com

### **Stupak Vladimir Avramovich**

Senior Researcher at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ В СТОМАТОЛОГИИ

© 2024 *Нестругина Е.С., Поддубев К.С.*

---

В статье обосновываются преимущества использования экспертных систем для автоматизации диагностики заболеваний полости рта в стоматологии. Показано, что применение экспертных систем позволяет снизить вероятность ошибок в диагностике и лечении, а, следовательно, повысить эффективность работы врача-стоматолога. Рассмотрено генетическое программирование, Байесовская модель, фреймовая модель представления знаний в стоматологии, позволяющие эффективно организовывать и представлять необходимую информацию о различных аспектах стоматологической практики.

**Ключевые слова:** экспертная система, генетическое программирование, Байесовская модель, фреймовая модель, стоматология.

---

**Введение.** Современные технологические достижения оказывают влияние на различные области нашей жизни, включая медицину. Одной из новаторских инноваций, которые меняют подход к работе врачей-стоматологов, являются экспертные системы. Эти компьютерные программы способны анализировать данные о состоянии полости рта, проводить диагностику заболеваний и предлагать оптимальное лечение. Преимущество экспертных систем в стоматологии заключается в их способности обрабатывать большие объемы данных и проводить анализ с высокой точностью. Эти системы могут анализировать рентгеновские снимки, фотографии зубов и десен, и данные из анамнеза пациента, чтобы выявить возможные проблемы и разработать индивидуальный план лечения. Это позволяет врачам-стоматологам принимать более обоснованные решения и повышает эффективность лечения. Каждый пациент имеет свои уникальные потребности в лечении, которые могут существенно отличаться от других. Экспертные системы в стоматологии позволяют создавать персонализированные подходы к лечению, учитывая особенности каждого индивидуального случая. Это включает выбор оптимальных методов лечения, подбор подходящих материалов для восстановления зубов и учет индивидуальных факторов, таких как общее состояние здоровья и предпочтения пациента. Экспертные системы также могут быть использованы для обучения молодых специалистов и консультирования врачей-стоматологов в случаях, требующих сложного подхода. Благодаря доступу к базам знаний и алгоритмам диагностики, эти системы способствуют расширению знаний и опыта врачей, что в итоге повышает качество стоматологической помощи [1].

Применение экспертных систем позволяет сократить возможность ошибок в диагностике и лечении, что имеет особенно важное значение в стоматологии, где точность является важным фактором. Автоматизация процессов анализа и принятия решений помогает исключить влияние человеческого фактора и уменьшить риск неправильного диагноза или неподходящего назначения лечения. У пациентов посещение стоматолога может вызывать стресс и дискомфорт. Однако, применение экспертных систем может избежать этого, предоставляя более точные и быстрые диагнозы, сокращая время ожидания результатов и предоставляя более информативные консультации. Такой подход способствует повышению удовлетворенности пациентов и улучшению их взаимоотношений с врачами-стоматологами [1, 2].

В современной стоматологии экспертные системы становятся все более значимыми, содействуя врачам в повышении качества оказываемой помощи, снижении рисков и улучшении настроения пациентов. С развитием технологий и расширением баз знаний, эти системы будут продолжать развиваться, делая стоматологическую помощь более эффективной и доступной для каждого [1, 3].

Одним из главных преимуществ использования экспертных систем в стоматологии является повышение точности диагностики. Благодаря возможности анализировать большие объемы данных и учитывать множество факторов, экспертные системы могут помочь выявить даже самые сложные случаи заболеваний [1].

Кроме того, экспертные системы обеспечивают стоматологов информацией о последних научных исследованиях, лечебных протоколах и клинических рекомендациях, что позволяет им принимать обоснованные решения на основе самых актуальных данных [1-3].

**Постановка задачи.** Сравнить основные применяемые методы в диагностике заболеваний ротовой полости с помощью экспертных систем с целью определения преимуществ и недостатков, и выбрать наилучший для применения его при разработке экспертной системы, которая будет способствовать улучшению диагностики и планированию лечения.

**Основная часть.** В последнее десятилетие искусственный интеллект стал все более значимым в медицине. Одной из областей, где использование экспертных систем может привести к значительным перспективам развития, является стоматология. Экспертные системы в стоматологии представляют инновационные инструменты, которые помогают врачам-стоматологам в диагностике, планировании лечения и принятии решений [1, 2].

Экспертные системы в стоматологии могут анализировать данные, собранные при обследовании пациентов, и предоставлять точные диагнозы и рекомендации по лечению. Они основаны на знаниях и опыте врачей-специалистов, а также на алгоритмах интеллектуального анализа данных. Путем анализа симптомов и медицинских историй пациентов, экспертные системы могут предоставлять рекомендации по выбору оптимального лечебного плана и прогнозированию результатов. Они также могут помочь врачам планировать операции и процедуры, учитывая индивидуальные особенности пациентов и риски возможных осложнений. Экспертные системы могут учитывать медицинскую историю пациента, аллергические реакции на лекарства, наличие хронических заболеваний и другие факторы, специфичные для каждого пациента. При наличии сложных случаев, экспертные системы могут предупредить врача о потенциальных осложнениях и побочных эффектах, позволяя ему принять необходимые меры для минимизации рисков и обеспечения безопасности пациента. Таким образом, применение экспертных систем в стоматологии может существенно повысить безопасность и результативность операций и процедур, увеличивая качество заботы о пациентах и улучшая результаты лечения [2].

Экспертные системы в стоматологии могут анализировать данные о состоянии зубов и тканей полости рта пациента, предлагая рекомендации по выбору наиболее эффективной и безопасной процедуры. Благодаря этим данным, экспертные системы могут помочь врачу принять обоснованное решение о том, какая процедура или операция будет наиболее безопасной и эффективной для пациента. Применение экспертных систем в стоматологии может существенно повысить точность диагностики, оптимизировать планирование лечения и улучшить результаты для пациентов. Они могут помочь врачам принимать правильные решения на основе объективных данных и опыта других специалистов [2, 3].

Таким образом, экспертные системы являются мощными инструментами, которые могут преобразить стоматологическую практику и значительно улучшить уровень заботы о пациентах [3]. Экспертные системы обычно разрабатываются для решения узкоспециализированных практических задач в различных областях. Благодаря своей способности эффективно решать специфические задачи, экспертные системы привлекли широкое внимание и стали значимым достижением в области искусственного интеллекта [3, 4].

В начале 1980-х годов исследования в области искусственного интеллекта привели к появлению нового направления – экспертные системы. Основной целью их разработки стало создание программного обеспечения, способного эффективно решать сложные задачи, которые обычно требуют экспертных знаний в соответствующих областях. Эти системы должны предоставлять решения на уровне, сопоставимом с решениями человека-эксперта. Принципиальное отличие экспертных систем от других систем искусственного интеллекта заключается в их способности решать конкретные задачи в узкоспециализированных областях, отличающихся высокой степенью экспертизы. Например, нейронные сети или генетические алгоритмы нацелены на решение более общих и универсальных задач. Одной из ключевых составляющих экспертной системы является экспертное знание, которое объединяет теоретическое понимание проблемы и практические навыки ее решения, полученные опытными экспертами в данной области. База знаний, на которой строится экспертная система, разрабатывается на основе экспертных знаний специалистов и играет ключевую роль в работе экспертной системы. Успешный выбор эксперта и правильная формализация его знаний позволяют обеспечить экспертную систему уникальными и ценными знаниями. Врачи-стоматологи успешно диагностируют заболевания и назначают лечение благодаря своему качественному медицинскому образованию и обширному опыту в практике лечения пациентов. Эти навыки и знания не являются врожденными, а приобретаются благодаря обучению и практике. Именно поэтому создание экспертных систем в стоматологии имеет большую ценность – они могут использовать знания и опыт экспертов в виде базы данных для диагностики и планирования лечения. В стоматологии одной из актуальных проблем является оценка вероятности развития стоматологических заболеваний и прогнозирование их течения и клинических результатов. Именно поэтому исследование, посвященное разработке экспертной системы врача-стоматолога, представляет собой важный шаг в современной стоматологии. Эта система будет способствовать улучшению диагностики и планированию лечения, а также развитию современных методов прогнозирования и оптимизации практики в области стоматологии. Экспертные системы возникли в результате развития методов обработки данных на компьютерах. Они представляют собой попытку автоматизировать обработку информации, которую обычно выполняют люди. Экспертная система представляет собой программное обеспечение искусственного интеллекта, которое использует знания в узкой области для решения задач, возникающих в этой области. Она работает по принципу диалога с пользователем, который предоставляет необходимые данные для системы [4].

Экспертная система для врачей-стоматологов применяет различные методы искусственного интеллекта, такие как машинное обучение, интеллектуальный анализ данных и логическое программирование, чтобы анализировать информацию о пациентах и делать выводы о состоянии их зубов и полости рта [5].

В стоматологии успешно применяются разные экспертные системы. Одним из примеров является система, помогающая врачам анализировать рентгенологические снимки зубов и обнаруживать кариес, пульпиты и другие патологии. Еще один пример – система, использующая машинное обучение для анализа данных о состоянии зубов и десен пациента и прогнозирования риска развития стоматологических заболеваний в будущем. Это помогает врачам разрабатывать индивидуальные профилактические программы для каждого пациента. Существуют различные медицинские задачи, которые могут быть решены с помощью экспертных систем [5]:

1. Прогнозирование риска развития определенной патологии, позволяющее заранее определить, находится ли пациент в группе риска. Применение экспертных систем особенно важно при диагностике онкологических заболеваний, где раннее обнаружение опухоли значительно повышает шансы на полное выздоровление.

2. Назначение необходимых лабораторных и диагностических исследований на основе первоначального анамнеза. Это помогает оптимизировать использование материальных и технических ресурсов лечебного учреждения, а также сэкономить средства пациента, избегая множественных повторных тестов и анализов, включая дорогостоящее медицинское оборудование.

3. Поддержка принятия врачебного решения, включая постановку и обоснование конкретного диагноза на основе клинической картины. Экспертные системы могут оказать помощь врачам, предоставляя им релевантную информацию и анализ данных, помогающие сделать обоснованный клинический диагноз.

4. Предоставление диагностического решения и оценка осложнений при критических и неотложных состояниях. В таких ситуациях экспертные системы могут быстро оценить критическое состояние пациента, предлагая соответствующие диагностические решения и помогая предсказать возможные осложнения.

Структурная схема экспертной системы приведена на рисунке 1.

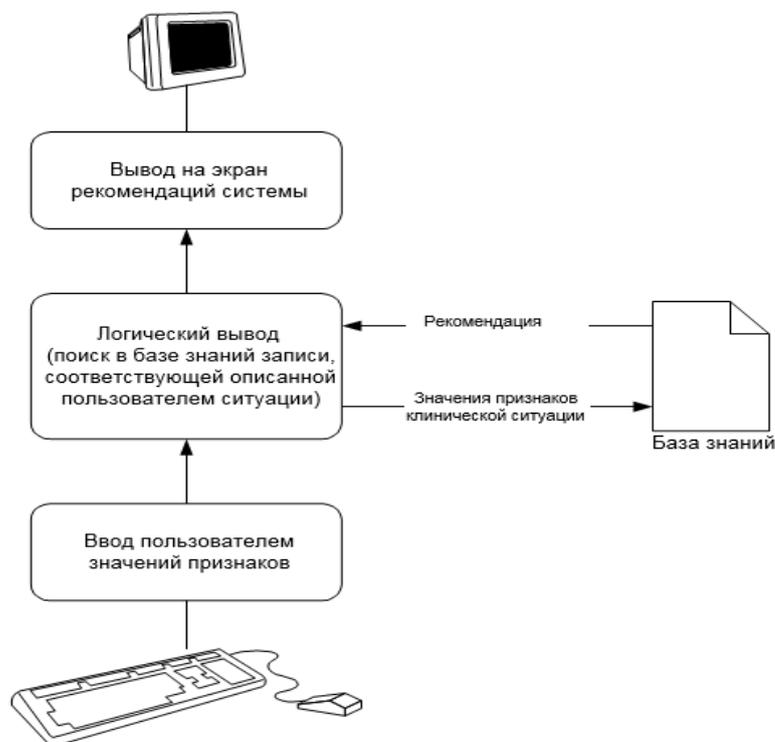


Рис. 1. Структурная схема экспертной системы врача-стоматолога

Таким образом, экспертные системы в медицине играют важную роль в прогнозировании, оптимизации процесса диагностики, поддержке врачебных решений и диагностическом прогнозе при критических состояниях. Экспертная система работает на основе базы данных, которая содержит информацию о различных заболеваниях, их симптомах, методах диагностики и лечения, и механизма принятия решений, который позволяет системе делать предварительные диагнозы без участия специалиста [5].

Эта система может использовать различные подходы: логический, математический или гибридный. В логическом подходе система использует формализованные факты и правила логического вывода. В математическом подходе применяются математические методы для вывода результатов. Гибридный подход объединяет оба подхода. Когда врач вводит информацию о пациенте, система анализирует эти данные, основываясь на имеющихся знаниях в базе данных, и предлагает самые вероятные диагнозы и планы лечения. Современные экспертные системы могут быть классифицированы следующим образом [6]:

1. Оболочки экспертных систем: эти системы обладают механизмом ввода-вывода, но пустой базой знаний. Они требуют специальной настройки под конкретную предметную область и могут обучаться в процессе работы, накапливая знания и опыт.

2. Гибридные экспертные системы: такие системы разработаны для решения разнообразных задач и используют комплексный подход, включая базу знаний и методы системного анализа, исследования операций, математической статистики и обработки информации. Пользователь имеет доступ к объективированным знаниям, содержащимся в базе данных и пакетах прикладных программ.

3. Сетевые экспертные системы: эти системы состоят из нескольких взаимосвязанных экспертных систем. Результаты принятия решений одной системы могут быть использованы в качестве входных данных для другой. Такой подход позволяет эффективно обрабатывать информацию в распределенной среде.

Каждый из этих типов экспертных систем имеет свои преимущества и может быть применен в различных областях, в зависимости от требований и целей [6].

Фреймовая модель представления знаний, впервые предложенная М. Минским в 1979 году, является одним из методов описания пространственных сцен и восприятия. В данной модели, абстрактный образ, называемый фреймом, состоит из различных элементов, таких как слоты. Слоты заполняются данными, представляющими значения этих элементов для конкретного объекта. Слот может содержать не только конкретное значение, но и ссылку на процедуру, которая позволяет вычислить его согласно определенному алгоритму. Также в слоте могут быть заданы одно или несколько правил, которые определяют, как можно получить это значение. Одним слотом может быть обозначено несколько значений. Некоторые слоты могут содержать фасеты – компоненты, которые определяют диапазон или список возможных значений этого слота. У каждого слота есть возможность привязать несколько процедур. Чаще всего слоты связываются с тремя типами процедур [7]:

1. IF – ADDED: процедура, которая выполняется, когда новая информация добавляется в слот.

2. IF – DELETED: процедура, которая выполняется, когда информация удаляется из слота.

3. IF – NEEDED: процедура, которая выполняется, когда запрашивается информация из пустого слота.

Эти процедуры могут отслеживать добавление информации к определенному узлу и проверять, что при изменении значения происходят соответствующие действия. На рисунке 2 показано, как связаны слоты фреймов с процедурами [7].

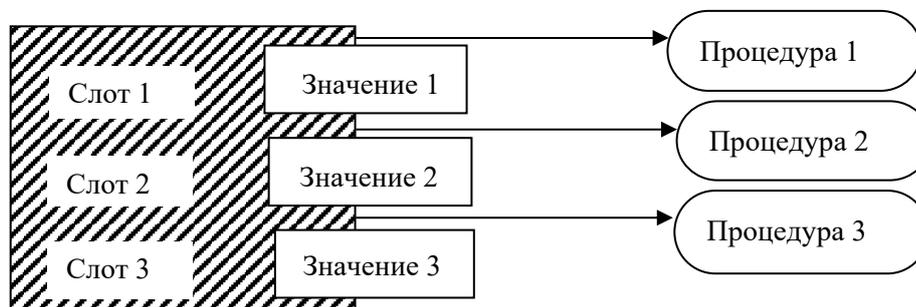


Рис. 2. Иллюстрация связи слотов фрейма с процедурами

Из структуры фреймов понятно, что системы, которые используют фреймы, хорошо подходят для предметных областей, где ожидания по форме и содержанию данных играют важную роль. Например, такие системы могут быть полезны при интерпретации визуальной информации или понимании речи. Для описания фреймовых структур созданы специальные языки программирования. Модель представления знаний в стоматологии, основанная на фреймах, является системой, которая упорядочивает информацию о различных аспектах стоматологической практики. Она состоит из структурированных фреймов, где каждый фрейм представляет объект или концепцию, связанную со стоматологией. Внутри каждого фрейма содержатся свойства, описывающие атрибуты и характеристики объекта, а также связи между различными фреймами. Это позволяет эффективно организовывать и извлекать информацию о пациентах, зубах, процедурах лечения и других важных аспектах стоматологической практики, способствуя улучшению качества предоставляемой стоматологической помощи. Фреймовая модель является одним из основных методов представления знаний в экспертных системах и находит широкое применение в различных сферах, включая стоматологию. Фреймовая модель представления знаний позволяет организовать и структурировать информацию о различных аспектах стоматологической практики, что способствует более эффективному использованию данных и улучшению качества предоставляемой стоматологической помощи. В фреймовых моделях каждый фрейм представляет концепт или объект в системе. В случае стоматологии, это могут быть пациенты, зубы, процедуры лечения и т.д. Каждый фрейм содержит свойства, которые описывают атрибуты и характеристики этого объекта. Например, для фрейма пациента могут быть определены свойства, такие как имя, возраст, контактные данные и медицинская история. Это позволяет врачам и другим медицинским специалистам быстро получать доступ к необходимой информации о пациентах. Одним из главных преимуществ фреймовых моделей является их гибкость. Они могут быть легко расширены и модифицированы для включения новых данных и свойств объектов. Например, если в стоматологической практике внедряются новые процедуры или технологии, фреймовая модель может быть изменена, чтобы включить эти новые данные и свойства. Это позволяет системе быть всегда актуальной и соответствовать последним требованиям и разработкам в области стоматологии [7].

Другим важным аспектом фреймовых моделей в стоматологических экспертных системах является возможность установления связей между различными фреймами. Это позволяет описывать сложные отношения и взаимодействия между различными аспектами стоматологической практики. Например, фрейм пациента может быть связан с фреймом процедуры лечения, чтобы указать, какие процедуры были проведены для данного пациента. Это существенно способствует получению полной и целостной информации о пациентах и обеспечивает более точные и качественные диагнозы и рекомендации. Фреймовые модели представления знаний в экспертных системах стоматологии помогают управлять и организовывать информацию о пациентах, зубах, процедурах лечения и других важных аспектах стоматологической практики. Это в свою очередь улучшает качество и эффективность предоставляемой стоматологической помощи, позволяет быстрее получать доступ к нужным данным и делать более точные рекомендации и диагнозы. Внедрение фреймовых моделей в экспертных системах в стоматологии является важным шагом в совершенствовании и оптимизации стоматологической практики [7].

Также находят применение два метода приобретения знаний: "снизу вверх" и "сверху вниз". Подход "снизу вверх" использован для описания процесса приобретения знаний, при котором знания вытекают из наблюдений и опыта, извлекая общие закономерности и причинно-следственные связи. В то же время, подход "сверху вниз" подразумевает формулирование знаний на основе априорных правил и гипотез, которые затем проверяются и адаптируются на основе наблюдений и опыта. В задачах оптимизации, поиска, машинного обучения и других областях, требующих эвристического метода для нахождения решений, широко используются генетические алгоритмы. Такой подход позволяет обрабатывать данные и выполнять операции с ними. Возможно использование генетического программирования для формирования диагноза в экспертной системе. Для реализации алгоритма принятия решений в экспертной системе используется алгоритм генетического программирования. Чтобы успешно применить этот метод, необходимо выполнить два этапа: структурировать объекты поиска в виде иерархических деревьев и разработать формализованную процедуру их оценки (рисунки 3 и 4) [8].

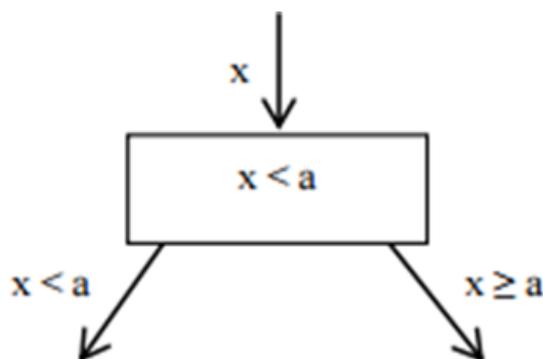


Рис. 3. Функциональный узел дерева принятия решений:  $x$  – входные данные;  $a$  – параметр узла

Генетическое программирование основывается на скрещивании и отборе различных вариантов решений для создания новых поколений путем мутации, при которой сохраняются некоторые характеристики предыдущего поколения. Мутация включает случайные изменения в деревьях принятия решений с низкой вероятностью. Во время мутации функциональные вершины могут быть заменены другими функциональными, а терминальные вершины остаются неизменными [8, 9].

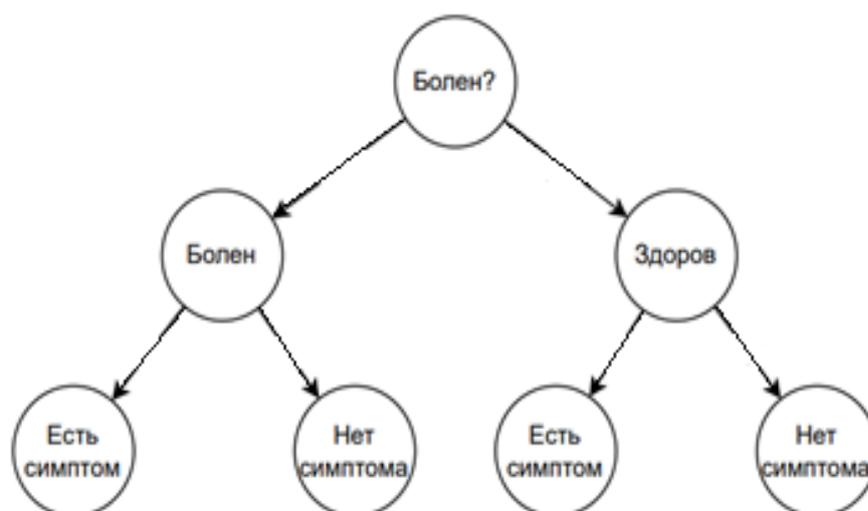


Рис. 4. Дерево принятия решений

Процесс скрещивания, отбора и мутации повторяется до достижения определенного числа поколений или истечения времени работы программы. Результат работы экспертной системы, основанной на генетическом программировании, представляет собой дерево принятия решений с наилучшей приспособленностью. Экспертная система, которая использует генетическое программирование, имеет свои недостатки, такие как требование большого времени для отбора всех вариантов и ограниченное количество поколений [9]. Использование математических методов может помочь преодолеть указанные недостатки [9, 10].

Медицинская экспертная система производит сопоставление матрицы симптомов пациента с эталонными матрицами заболеваний, которые содержат весовые коэффициенты для каждого симптома в конкретном заболевании. Частота встречаемости симптомов определяется на основе эмпирических данных, полученных от пациентов [10]:

$$f = \frac{N_+}{N_+ + N_-} \times 100\% ,$$

где  $N_+$  – пациенты из выборки с наличием данного симптома,  $N_-$  – пациенты, у которых данный симптом отсутствует.

При использовании математического подхода принятия решений, весовой коэффициент  $k_i$ -го симптома рассчитывается следующим образом [10]:

$$k_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \times 100\% ,$$

где  $f_i$  – частота встречаемости  $i$ -го симптома, соответствующая данному весовому коэффициенту.

В экспертных системах часто используется Байесовская модель для принятия решений и оценки вероятностей различных событий на основе логических и статистических выводов. Использование этой модели позволяет учесть неопределенность, априорные знания и экспертные оценки при принятии решений, что делает ее важным инструментом для анализа, диагностики и прогнозирования в различных областях [11].

Теорема Байеса предоставляет возможность вычислить вероятность события при условии, что произошло другое связанное с ним событие. Эта теорема позволяет расчет вероятности события, если поменять местами причину и следствие. Например, зная распространенность симптома среди больных и здоровых, мы можем вычислить вероятность заболевания при наличии этого симптома [11].

$$P(A | B) = P(B | A) \frac{P(A)}{P(B)}.$$

В символах, обозначим событие как А, вероятность этого события будет P(A). P(A|B) означает условную вероятность события А при условии, что произошло событие В. P(B) обозначает вероятность события В. Вероятность события может быть выражена в процентах (от 0% до 100%) или в виде десятичной дроби (от 0 до 1).

После изучения применяемых технологий было принято решение при создании экспертной системы использовать метод, основанный на Байесовской модели, для оценки вероятности возникновения стоматологических заболеваний. Для улучшения эффективности этой модели применить генетический алгоритм, который позволит достичь более точных прогнозов [11].

Общий принцип работы системы приведен на рисунке 5.

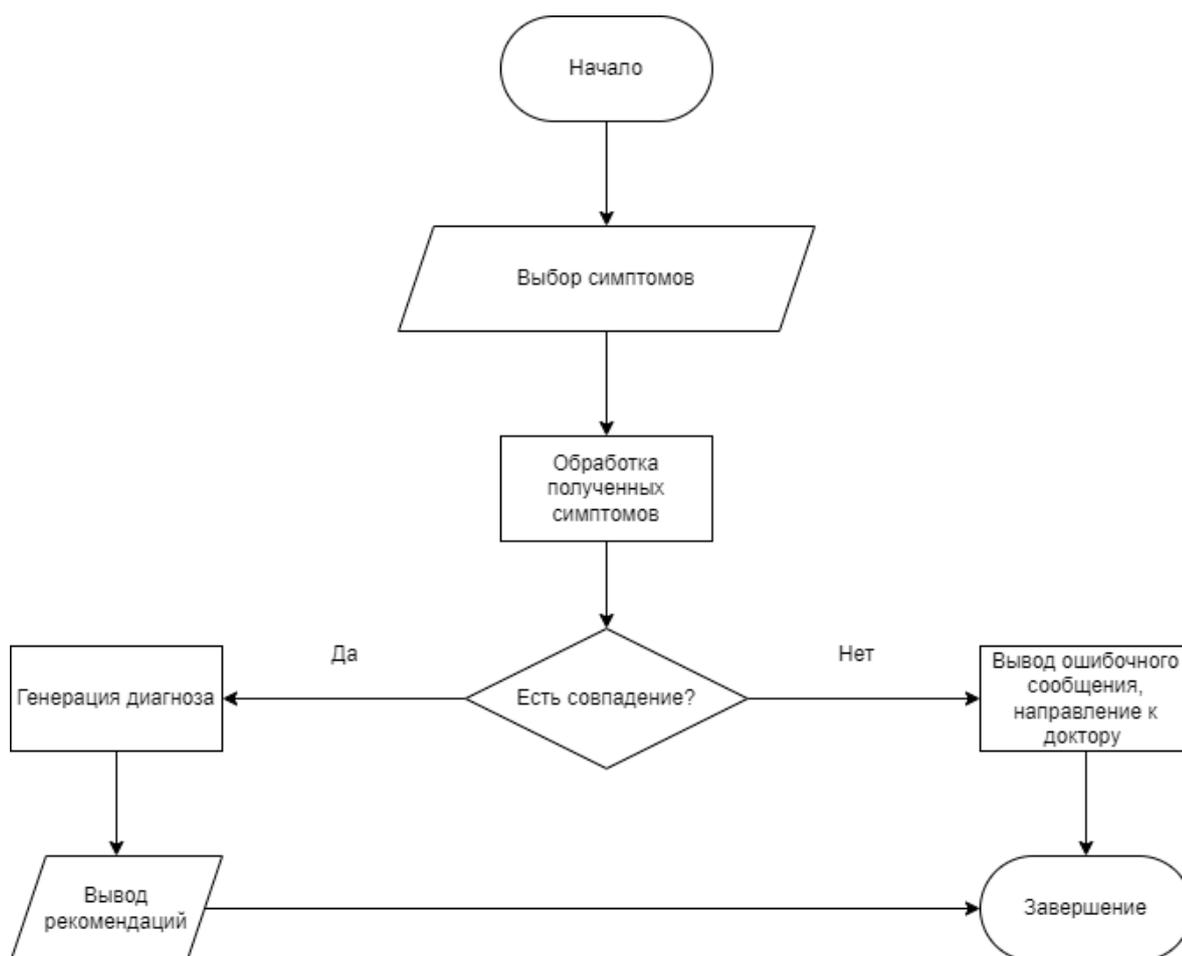


Рис. 5. Общий принцип работы системы

**Выводы.** Экспертные системы могут обрабатывать большие объемы данных, анализировать медицинскую информацию и помогать в принятии врачебных решений на основе актуальных клинических знаний. Это позволяет достичь более точной диагностики, определения оптимального лечения и прогнозирования результатов. Таким образом, применение экспертных систем в стоматологии открывает новые горизонты для улучшения здравоохранения и обеспечения более эффективного и индивидуального подхода к пациентам.

По результатам анализа существующих технологий в диагностике заболеваний ротовой полости с помощью экспертных систем, было принято решение использовать при разработке экспертной системы подход, базирующийся на теореме Байеса, для вычисления вероятностей развития стоматологических патологий. Для улучшения эффективности работы системы и с целью повышения точности прогнозов в данную вероятностную модель интегрирован генетический алгоритм, позволяющий оптимизировать расчеты, что будет способствовать улучшению диагностики и планирования лечения.

Экспертные системы в стоматологии представляют собой мощный инструмент, который может значительно улучшить качество диагностики и лечения стоматологических заболеваний. Они объединяют в себе передовые технологии искусственного интеллекта с богатым опытом и знаниями врачей-стоматологов, создавая новые возможности для прогресса в данной области.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреева, С. Н. Экспертные системы в стоматологии / С. Н. Андреева // Институт стоматологии. – 2018. – №3(80). – С. 43-45.
2. Медицинская экспертная система «Доктор» [Электронный ресурс] / Казанмеджурнал : [Сайт]. – URL: <https://kazanmedjournal.ru/kazanmedj/article/view/90973> / (дата обращения 12.03.2024).
3. Журавлев, В. Г. Проектирование самообучающейся экспертной системы / В. Г. Журавлев, П.А.Хаустов // XIV Международная научно-практическая конференция «Молодежь и современные информационные технологии» (7-11 ноября 2016 года). – Томск: ТИУ, 2016. – С. 16-20.
4. Медицинские экспертные системы. [Электронный ресурс] / Спарм : [Сайт]. – URL: <https://sparm.com/publications/mediciznskie-ekspertnye-sistemy> (дата обращения 21.03.2024).
5. Жулев, Е. Н. Экспертная система определения показаний для применения металлокерамических мостовидных протезов / Е. Н. Жулев, Д. Н. Демин, О. В. Брагина // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С 64-68.
6. Герман, О. В. Введение в теорию экспертных систем и обработку знаний / О. В. Герман. – Мн.: ДизайнПРО, 1995. – 255 с.
7. Рязанов, М. Л. Анализ существующих средств разработки экспертных систем / М. Л. Рязанов // Известия Алтайского государственного университета. – 2008. – № 1. – С. 63-64.
8. Бутова, В. Г. Критерии качества стоматологической помощи, представляемой в амбулаторных условиях / В. Г. Бутова, Р. Ш. Гветадзе, В. И. Бычков // Российский стоматологический журнал. – 2016. – №6(20). – С. 327-331.
9. Ревюк, Ю. В. Экспертная система для оценки состояния слизистой оболочки полости рта / Ю. В. Ревюк, Т. Б. Ткаченко, А. В. Тишков // Российская стоматология. – 2015. – 8(1) – С.12-14.
10. Экспертные медицинские системы. [Электронный ресурс] / Абсофтсайте : [Сайт]. – URL: <http://www.absoftsite.com/solutions/medicine/expert-systems> (дата обращения 21.03.2024).
11. Schatz, C. V. Intelligent and Expert Systems in Medicine - A Review / C. V. Schatz, F. K. Schneider // XVIII Congreso Argentino de Bioingenieria SABI 2011 - VII Jornadas de Ingenieria Clinica. – 2011. – P. 326-331.

*Поступила в редакцию 29.04.2024 г., рекомендована к печати 14.05.2024 г.*

APPLICATION OF AN EXPERT SYSTEM FOR AUTOMATING DISEASE DIAGNOSIS IN DENTISTRY

*Nestrugina E.S., Podduev K.S.*

The article substantiates the advantages of using expert systems to automate the diagnosis of oral diseases in dentistry. It has been shown that the use of expert systems can reduce the likelihood of errors in diagnosis and symptoms, and, as a result, increase the efficiency of the dentist. Considered genetic programming, Bayesian model, framework model, knowledge representation in dentistry, which allows you to effectively organize and prepare the necessary information about various aspects of dental practice.

**Keywords:** expert system, genetic programming, Bayesian model, frame model, dentistry.

**Нестругина Елена Сергеевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: e.nestrugina@donnu.ru

**Nestrugina Elena Sergeevna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Computer Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Поддубев Константин Станиславович**

магистрант кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: shelyag80@mail.ru

**Podduev Konstantin Stanislavovich**

Master student at Department of Computer Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

EDN YNJMLH  
УДК 621.192

DOI 10.5281/zenodo.12548579

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**© 2024 *Гридин С.В., Бирюков А.Б.*

Статья посвящена актуальной проблеме оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса эксплуатации трубопроводов тепловых сетей. Дан краткий анализ существующих статистических данных и научных изысканий по рассматриваемой проблеме. Проанализированы особенности применения различных методов диагностирования и выделены ключевые из них для оценки надежности тепловых сетей. Установлено, что для своевременного и обоснованного включения участков тепловых сетей в планы реконструкции и капитального ремонта на основе результатов технической диагностики необходимо анализировать статистику по повреждаемости оборудования и трубопроводов с учетом показателей удельной повреждаемости и динамики возрастания числа дефектов, а также коэффициентов вероятности образования течей, потока отказов, надежности и аварийно-опасности.

**Ключевые слова:** диагностика, тепловая сеть, трубопровод, коррозия, напряжения в металле, аварийно-опасность, поток отказов, рабочий ресурс, неразрушающий контроль, дефект, авария.

**Введение.** Тепловые сети (ТС) на сегодня - это наиболее уязвимое звено во всей цепочке теплоснабжения «генерация–транспорт–распределение». Общая протяженность ТС, по данным Росстата [1], составляет 167,220 тыс. км, с общей площадью поверхности около 180 км<sup>2</sup>, количество абонентов - примерно 44 млн.

В целом по РФ около 70% ТС работает более 25 лет, т.е. свыше нормативного срока службы [1], из них срок службы более 30 лет имеют 45% сетей, от 25 до 30 лет – 25%, и лишь 30% имеют срок службы менее 25 лет. Протяженность ТС, нуждающихся в замене, в 2022 г. составила 50,597 тыс. км в двухтрубном исчислении [1]. Это почти 30,3% всех ТС в стране (табл. 1 [1]). Ежегодно необходимо менять не менее 4-5% от всех сетей в год [2-5], но по факту в среднем заменяется около 2%, что ведет к наращиванию их износа.

Таблица 1. Доля в общей длине тепловых и паровых сетей, нуждающихся в замене, ветхих и замененных, в двухтрубном исчислении в РФ в 2000-2022 гг., % (по данным Росстата [1], без учета статистической информации по ДНР, ЛНР, Запорожской и Херсонской областям)

Показатель	2000	2006	2010	2015	2018	2020	2021	2022
Доля нуждающихся в замене	16,0	25,0	28,0	29,1	28,9	30,8	30,2	30,3
Доля ветхих	21,1	21,3	21,7	22,1	22,4	23,2	23,0	23,3
Доля заменённых	2,8	2,1	2,0	2,2	1,9	2,0	1,94	1,87

*Работа выполнена в рамках научной темы «Повышение энергоэффективности выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии» (код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FRRF-2023-0003, регистрационный номер 1023031000013-2-2.2.3.)*

Потери тепловой энергии в ТС в 2022 г. составляли 13,7%, однако многие эксперты считают, что реальные потери выше и достигают 20-30%, судя по тому, что, например, в 2020 г. произошло 3693 аварии, в 2021 г. - 4176; в 2022 г. - 3661 [1, 6]. В настоящее время количество повреждений на 1 км трубопровода (удельная повреждаемость) по стране составляет 0,022 [1]. При этом средняя удельная повреждаемость трубопроводов тепловых и паровых сетей имеет тенденцию к снижению в сравнении с 2000 г. (1,79, в 80 раз больше, чем в 2022 г.). По данным системы мониторинга и контроля устранения аварий и инцидентов на объектах ЖКХ РФ в городе с населением около 100000 жителей в среднем в год происходит около 300 инцидентов, связанных с повреждениями или авариями на ТС. Усредненная стоимость ликвидации одного повреждения составляет около 40 тыс. руб., с учетом 44 млн. абонентов нетрудно оценить общую сумму, в которую обходятся ремонтные работы в масштабах страны.

Поэтому для своевременного определения мест дефектов и утечек в тепловых сетях нужно периодически проводить мероприятия по технической диагностике теплопроводов. Такой подход позволяет решить проблемы повышения эксплуатационной надежности теплопроводов ТС, их безотказности, долговечности, ремонтпригодности и продления срока службы на основании комплексного учета многих факторов, что является актуальной и до сих пор не решенной задачей.

Основными причинами прекращения теплоснабжения в Российской Федерации являются износ и повреждение оборудования на источниках тепловой энергии и теплопроводах тепловых сетей, порывы труб и их устранение. При этом системными проблемами являются: высокий уровень фактических потерь в ТС за счет их неудовлетворительного технического состояния, большой степени износа, превышения критического уровня частоты отказов (неисправностей или аварий) и роста доли сетей, нуждающихся в срочной замене; заниженный по сравнению с реальным уровень тепловых потерь в ТС, нарушение гидравлических режимов и тепловой изоляции ТС и высокий уровень затрат на эксплуатацию сетей. Устранение этих проблем предполагает как применение стандартных методов технической диагностики, так и внедрение новых, что позволит прогнозировать остаточный ресурс трубопроводов ТС и планировать сроки их капитального ремонта.

Анализ причин аварий в тепловых сетях показывает, что основными источниками разрушения труб и образования течей являются зоны концентрации повышенных механических напряжений. Их появление вызвано утонением стенки трубы за счет наружной и внутренней коррозии вследствие химического или электрохимического взаимодействия с коррозионной средой, либо из-за искривления трубы при несоблюдении требований компенсации температурного удлинения и других нарушений.

Например, для работы сетей в климатических условиях России характерно расположение труб бесканально в зоне промерзания грунта в зимний период, где изоляция труб соприкасается с влажным грунтом. В весенний период при оттаивании грунта происходит «выпучивание» теплопровода с появлением дополнительных напряжений. Задвижки на трубопроводах отказывают из-за коррозии и трещин корпуса, байпаса, неплотностей фланцевых соединений. На сильфонных компенсаторах коррозии подвергаются внутренние слои стальных гофр и внешние гофры, изменяются геометрические характеристики элементов конструкции, возникают дефекты с проникновением теплоносителя во внутреннее пространство слоев гофр [7]. Коррозии и разрушению подвержены каркасы, кронштейны и другие стальные конструкции под трубопроводы ТС, а также осевые сальниковые компенсаторы, скользящие или мертвые опоры, плиты перекрытий и др. В подземных прокладках коррозия труб обусловлена большой водопроницаемостью железобетонных элементов канала из-за некачественной заделки стыков стенок и перекрытий.

При соблюдении качественного графика регулирования отпуска тепловой энергии от источников за счет подмеса воды из обратного трубопровода общее количество циклов сжатие-растяжение составляет более  $8 \cdot 10^4$  раз за нормативный срок службы теплопровода, что на несколько порядков выше, чем на теплопроводах, эксплуатируемых, к примеру, в европейских странах, где теплопроводы подвержены намного менее жестким условиям эксплуатации. Температура теплоносителя в подающем трубопроводе также отличается: в России – в зависимости от температуры наружного воздуха (температурные графики - 150/70°C, 130/70°C, 110/70°C); в Европе – постоянная (110°C, 100°C и до 60°C [8]).

Если попытаться перенять европейский опыт и снизить количество тепла, требуемого для отопления, например, перейти на температурный график 95/70°C без изменения диаметров теплопроводов, то при достаточной пропускной способности ТС потребуются наличие как групповых, так и индивидуальных насосов смешения взамен групповых элеваторов. Кроме того, необходимо определять прямую и обратную зависимости расхода и температуры теплоносителя в подающем теплопроводе, чтобы обеспечить заданный тепловой поток и оценить тепловые потери в сети, а также подобрать оптимальные диаметры труб, расход электроэнергии на перекачку теплоносителя, толщину тепловой изоляции и т.д. [9].

Наиболее частой причиной повреждения трубопроводов (до 80%), является наружная коррозия вследствие химического и электрохимического взаимодействия с почвой. Опасность почвенной коррозии напрямую зависит от коррозионной активности грунтов, определяющейся влажностью, типом и структурой почвы; составом и концентрацией растворенных веществ; характером проникновения воздуха; наличием бактерий; температурой и удельным электросопротивлением почвы.

Повреждения, вызванные внутренней коррозией, имеют вид небольших сквозных отверстий (язвы, свищи), образующихся при достижении дном коррозионной лунки внешней поверхности трубы или щели в сварочном шве. Скорость язвенной очаговой коррозии достигает 1,4-1,8 мм/год, менее опасна сплошная равномерная коррозия 0,1 - 0,2 мм/год. Но если ее не устранить, то на наружной поверхности трубы создаются подходящие условия для быстрого развития сплошного утонения металла на большой площади, и стенка разрушается после уменьшения её толщины до критической [10].

Таким образом, обеспечить надежную и безопасную эксплуатацию ТС невозможно без своевременного обнаружения дефектов и утечек и выявления основных причин отказов различными методами технического диагностирования, поэтому необходимо рассмотреть их характеристики и особенности применения.

**Постановка задачи.** Целью работы является анализ методов и технологий технического диагностирования теплопроводов ТС для своевременного обнаружения дефектов и утечек и выявления основных причин прекращения теплоснабжения, а также формализация выбора расчетных формул для определения показателей надежности теплопроводов на основе оценки их фактического технического состояния и остаточного рабочего ресурса.

Для достижения этих целей необходимо проанализировать эффективность применения различных методов технического диагностирования фактического состояния трубопроводов; классифицировать основные причины возникновения технических отказов по степени их аварийно-опасности; оценить уровни дефектов и предложить расчетные формулы для определения показателей надежности ТС с учетом анализа статистики потока отказов.

**Основная часть.** Визуальный метод применяется при обходах и осмотрах сетей и камер, проводимых бригадами слесарей-обходчиков и мастерами тепловых сетей по заранее разработанным и утверждённым маршрутам. Частота обходов и объемы работ устанавливаются в зависимости от состояния оборудования, типов прокладки, состояния грунта, времени года, сейсмичности и других факторов [11]. При этом проверяется исправное состояние перекрытий, горловин и стен колодцев, редукторов и арматуры, крышек люков, герметичность установленного в тепловых камерах и павильонах оборудования и всех соединений трубопроводов с устранением протечек и парения. Теплотрассы инспектируются на наличие протечек, провалов и парения, а также загромождений посторонними предметами. Недочёты и неисправности устраняются сразу или становятся основанием для включения в производственную программу. Дефекты, угрожающие аварией, должны устраняться, сведения о других дефектах, которые невозможно устранить без отключения трубопроводов, должны фиксироваться в журнале ремонтов.

Физические методы делятся на тепловые испытания на максимальную температуру теплоносителя и разрушающий метод гидравлических испытаний (опрессовка) на герметичность и прочность повышенным давлением. Тепловые испытания проводятся для выявления дефектов трубопроводов, компенсаторов, опор, а также проверки компенсирующей способности ТС в условиях температурных деформаций. Для получения стабильных результатов их проводят в конце отопительного периода, когда вся конструкция теплопроводов и прилегающий грунт прогреты достаточно равномерно. Испытания проводят на участках ТС, тип прокладки и конструкции тепловой изоляции которых являются характерными для данной сети, их минимальный объём должен быть не менее  $\phi \geq 20\%$  материальной характеристики всей сети  $M_c$  при теплоперепаде на концах участка не менее  $\Delta t \geq 8^\circ\text{C}$ :

$$\phi = \frac{M_x}{M_c} = \frac{\sum_x (d_n L)}{\sum_c (d_n L)} \geq 0,2,$$

где:  $M_x = \sum_x (d_n L)$  - материальная характеристика для подающего или обратного трубопровода сети, просуммированная по всем участкам,  $\text{м}^2$ ;

$M_c = \sum_c (d_n L)$  - материальная характеристика для подающего или обратного

трубопровода, просуммированная по всей сети в целом,  $\text{м}^2$ ;

$d_n$  - наружный диаметр труб в пределах одного участка сети (по подающей или обратной линии при равных диаметрах труб),  $\text{м}$ ;

$L$  - протяженность участка сети,  $\text{м}$ .

Гидравлические испытания проводятся ежегодно перед началом отопительного периода с целью разрушения слабых мест трубопроводов с толщиной стенки до 1 мм [11]. Критерием для определения достаточных значений фактической толщины стенки трубы является её допустимая толщина (не менее 80% от проектной толщины), при которой возможна работа теплопровода на расчетных параметрах в течение расчетного ресурса. Отдельно прессуются подающий и обратный трубопроводы, давление в испытываемой трубе следует поднимать плавно и равномерно, и контролировать его не менее чем двумя манометрами одного типа около 10 мин [12]. Трубопровод считают выдержавшим испытание, если не будут обнаружены течи, потение в сварных соединениях и в металле труб, видимые остаточные деформации, трещины или признаки разрыва, падение давления по манометру.

Гидравлические и тепловые испытания наряду с преимуществами (надежно обнаруживают элементы ТС в состоянии предразрушения) несут и отрицательные последствия, так как резкое изменение температуры и давления сетевой воды оказывает сильное стрессовое воздействие на структуру металла труб [13]. Гидроопрессовка существенно снижает прочность труб, поскольку возрастает скорость протекания коррозионных процессов [11, 13, 14], причем если при проведении испытаний трубопровод разрушится, то без их проведения он мог бы эксплуатироваться еще не один год.

Контроль за отклонениями в параметрах теплоносителя осуществляется в ходе круглосуточного мониторинга состояния ТС оперативными диспетчерскими службами.

Метод акустических корреляционных течеискателей применяется при оперативном поиске мест утечки теплоносителя на трубопроводах, утонений стенки трубы, наличия внешних коррозионных отложений и внутренней язвенной коррозии, мест смещения опор, обрушения плит перекрытий, провисания труб, перенапряжения на компенсаторах и т.п. дефектоскопистами служб диагностики и контроля качества.

В основе метода акустической эмиссии лежит физический процесс эмиссии сигналов акустических частот местами с полем градиента напряжений [15]. Диагностируются трубопроводы тепловых сетей наземной, подземной канальной и бесканальной прокладки диаметром от 80 мм и более, находящихся в эксплуатационном режиме при наличии тока воды и давлении теплоносителя более 0,25 МПа. Длина единичного диагностируемого участка от 40 до 200 м, поэтому работы часто проводятся без вскрытия теплотрасс. В точках доступа по концам участка размещаются виброакустические датчики, сигналы от шума тока воды записываются на магнитный носитель с компьютерной обработкой. Энергия сигнала эмиссии позволяет судить об уровне напряжений и оценить опасность дефекта либо аварии, далее методом корреляционного анализа определяется местоположение дефекта [15].

Контроль за состоянием влажности теплоизоляции трубопроводов с пенополиуретановой (ППУ) изоляцией и обнаружение участков с повышенной влажностью осуществляется системой оперативно-дистанционного контроля (СОДК) [16]. Наличие СОДК позволяет вовремя находить и устранять увлажнение ППУ без необходимости устройства дренажа и защиты от блуждающих токов, за счет чего есть возможность предупреждать аварии, типичные для тепловых сетей других конструкций. Принцип работы СОДК заключается в измерении электросопротивления проводников-индикаторов в контрольных точках теплоизоляции трубы по всей её длине. Сопротивление меняется при увлажнении изоляции, что указывает на наличие дефекта.

Однако анализ результатов эксплуатации трубопроводов с СОДК показывает, что в отопительный период не всегда возможно своевременное проведение ремонтных работ при срабатывании системы. За время ожидания ремонта происходит намокание изоляции вдоль трубы, во влаге растворяются коррозионно-агрессивные вещества, что ведет к росту наружной коррозии. Следует обратить особое внимание на температуру наружного воздуха: при отрицательной температуре из влаги в ППУ изоляции образуются тонкие ледяные прослойки и линзы и удельное сопротивление возрастает в несколько раз. Так, трубопровод с намокшей ППУ изоляцией при температуре выше 0°C имеет электросопротивление менее 1 МОм, а при -15°C - более 1000 Ом [16].

Термографический метод бесконтактной и дистанционной регистрации всех видов излучения объекта в инфракрасном диапазоне спектра с помощью тепловизора применяется в ходе ежегодного наземного тепловизионного обследования перед завершением отопительного периода и после начала нового отопительного сезона. Метод позволяет выявить скрытые утечки теплоносителя, неисправности запорной арматуры тепловых камер, неполадки в работе дренажной системы, нарушение изоляции труб и т.п. в труднодоступных местах вне зависимости от сезонных изменений метеословий.

Постоянный мониторинг качества сетевой воды проводится путем химического контроля за качеством исходной, прямой, обратной и подпиточной воды.

Методы неразрушающего контроля (НК) внутритрубной диагностики и санации трубопроводов включают в себя: радиационный и электромагнитно-акустический ультразвуковой контроль, методы визуально-измерительного контроля, акустического резонанса и магнитной памяти металла. С помощью дистанционно телеуправляемого робота и комплекса модулей НК выявляются коррозионные повреждения, трещины, деформации труб и другие дефекты. Метод акустического резонанса применяется для определения коррозионного износа и остаточной толщины стенки трубопровода с помощью внутритрубного диагностического «снаряда». Метод магнитной памяти металла позволяет выявлять коррозию на внутренней и наружной поверхности трубы через слой отложений высотой до 15 мм. Эти методы не требуют слива теплоносителя, предварительной подготовки и снятия теплоизоляционного слоя.

В лаборатории входного контроля диагностируется качество и проводится техническая экспертиза труб, запорных устройств и арматуры. Выходной контроль проводится для проверки качества строительного-монтажных работ [10].

Анализ статистики по опыту внедрения методов диагностики на предприятиях ТС показывает, что ряд из них имеет ограничения по применению, связанные с доступностью к местам контроля, с качеством контролируемой поверхности, с сезонностью проведения диагностики, а также с недостаточностью апробации методов. Поэтому около 98% работ по поддержанию надежности ТС, позволяющих оценивать состояние тепловых сетей в приемлемые сроки, планируются, как правило, на основании двух методов: опрессовка и тепловизионная съёмка.

При наличии статистических данных интенсивность отказов (инцидентов, которые не считаются авариями) участка тепловых сетей  $p_i$ , течь/(км·ч) за год (8760 часов), рассчитывается по формуле:

$$p_i = \frac{n_{отки}}{8760 \cdot L_i},$$

где:  $n_{отки}$  - число отказов (течей) на  $i$ -ом участке ТС за предыдущий год, ед.;

$L_i$  - протяженность  $i$ -ого участка тепловой сети в погонных километрах, п.км.

При отсутствии статистических данных расчет производится по формуле:

$$p_i = p_{нач} \left(0,1 \cdot \tau_i^{ЭК} \right)^{\tau_i^{-1}},$$

где:  $p_{нач}$  - интенсивность отказов участка тепловой сети, соответствующая начальному периоду эксплуатации, течь/(п.км·год);

$\tau_i^{ЭК}$  - продолжительность эксплуатации участка тепловой сети, лет;

$\tau_i$  - безразмерный коэффициент, учитывающий продолжительность эксплуатации участка тепловой сети, определяется из условий:

$$\tau_i = \begin{cases} 0,8 - \text{при } 0 < \tau_i^{ЭК} \leq 3 \\ 1,0 - \text{при } 3 < \tau_i^{ЭК} \leq 17 \\ 0,5 \exp\left(\frac{\tau_i^{ЭК}}{20}\right) - \text{при } \tau_i^{ЭК} > 17 \end{cases} .$$

Интенсивность отказов участка ТС  $p_i$  связана с протяженностью  $L_i$   $i$ -ого участка трубопровода ТС и удельным коэффициентом  $k_i$  - потоком отказов (течей) на  $i$ -ом участке (числом отказов за год, отнесенным к одному погонному километру протяженности участка), течь/п.км в год, соотношением:

$$k_i = p_i L_i. \quad (1)$$

Расчет значений суммарного потока отказов  $k$  проводится для оценки технического состояния труб в качестве критерия степени опасности дефектов: удовлетворительное состояние –  $k < 0,15$  течь/п.км в год; докритический дефект –  $0,15 < k < 1,7$  течь/п км в год; - критический дефект –  $1,7 < k < 4$  течь/п.км в год, авария –  $k > 4$  течь/п.км в год [17].

Из (1) видно, что поток отказов не зависит от диаметра трубопровода, такое допущение объясняется тем, что вероятность появления нескольких повреждений на участке по длине окружности трубы определяется как произведение вероятностей нескольких событий, то есть бесконечно малая величина.

Согласно [18], основным показателем технического состояния тепловой сети, состоящей из отдельных участков, является коэффициент надежности сети  $K_c$  ( $0,5 \leq K_c \leq 1$ ). Принятая в [18] градация по значениям  $K_c$  (табл. 2) позволяет оценить текущее техническое состояние труб и принять решение о перекладке.

Таблица 2. Оценка надежности тепловых сетей

Характеристика	Доля ветхих сетей	Коэффициент надежности $K_c$	Вероятность отказа $F$	Поток отказов $k$
Высоконадежные	до 10%	более 0,8 до 1,0	0,1	менее 0,176
Надежные	от 10 до 20%	более 0,6 до 0,8	0,11-0,25	0,48-0,176
Малонадежные	от 20 до 30%	от 0,5 до 0,6	0,26-0,5	1,16-0,48
Ненадежные	свыше 30%	менее 0,5	более 0,5	более 1,16

Коэффициент надежности  $K_c$  отражает опасность возникновения течей и связан следующими соотношениями с  $k$  и вероятностью образования течи  $F$  [17]:

$$K_c = e^{-kt},$$

$$F = 1 - e^{-kt} = 1 - K_c,$$

где:  $t$  - отопительный период (принимается равным 0,6 года).

Для определения значения  $K_c$  необходимо иметь информацию об отказах за весь период эксплуатации. Однако у большинства предприятий теплоснабжения база данных по повреждениям существует либо совсем недавно, либо на уровне последних 20 лет, после введения соответствующих предписаний, поэтому значение потока отказов в их случае будет несколько ниже. Поэтому для корректного расчета  $K_c$  необходимо иметь дополнительную информацию о дефектах, которую можно получить в ходе диагностики трубопроводов различными методами, результаты которой должны быть представлены либо через коэффициент вероятности образования течи, либо через поток отказов.

Оценка технического состояния трубы осуществляется в ходе расчета коэффициента аварийно-опасности  $\lambda$ , что позволяет ранжировать диагностируемые трубы и определять участки, подлежащие замене. Этот коэффициент показывает расчетное значение потока отказов на участке трубопровода за год, отнесенным к одному погонному километру трубопровода, течь/(п.км·год). Коэффициент аварийно-опасности  $\lambda$  рассчитывается по формуле [2, 19]:

$$\lambda = \frac{(4\sum L_k + 1,7\sum L_{\text{док}} + 0,15(L - \sum L_k - \sum L_{\text{док}}))}{L},$$

где:  $\sum L_k$  - сумма длин интервалов для критических дефектов,  
 $\sum L_{\text{док}}$  - сумма длин интервалов для докритических дефектов,  
 $L$  - длина участка по трубе, м.

Критерием для оценки допустимости дальнейшей эксплуатации трубопровода является сравнение  $\lambda$  с его пороговым значением  $\lambda_k$ , определяющимся через условный проход трубы  $D_y$ , мм, по формуле:

$$\lambda_k = 25 \cdot 10^{-8} \cdot (D_y)^2 - 7,4 \cdot 10^{-4} \cdot (D_y) + 1,26.$$

При  $\lambda < 0,8\lambda_k$  техническое состояние трубопровода признается работоспособным (проектный рабочий ресурс), при  $0,8\lambda_k < \lambda < \lambda_k$  - с ограниченным рабочим ресурсом (допускается дальнейшая эксплуатация в течение 1-2-х лет без профилактического ремонта), при  $\lambda > \lambda_k$  - неработоспособным (в ветхом состоянии, из-за опасности образования течей требуется проведение капитального ремонта с перекладкой).

Продолжение эксплуатации участков тепловой сети с докритическим уровнем дефектов в течение последующих 1-2-х лет позволит ежегодно экономить до 12% от стоимости нового трубопровода для магистральных и до 10% для разводящих тепловых сетей. При признании участка неработоспособным все усложняется. Практика показывает, что выводимые в перекладку трубопроводы на протяжении 60% своей длины имеют высокий остаточный рабочий ресурс (даже на одном участке коррозионный износ стенок трубы не всегда одинаков) и могут эксплуатироваться не один сезон. Тогда в рамках существующего бюджета можно определить наиболее изношенные участки из всего объема теплосетей, и осуществить их локальную замену в межотопительный период [20].

С экономической точки зрения, согласно Соколову Е.Я. [21], трубопровод должен быть выведен в перекладку, когда затраты на аварийные ремонтные работы превысят приведенные затраты на эксплуатацию. При этом расчет показателей сводится к поиску минимума затрат, что не дает однозначной оценки для любой системы теплоснабжения в отсутствие суммы затрат на аварийную работу, поскольку очень сложно выделить затраты на ремонт повреждений из документации теплоснабжающих компаний.

Определение остаточного ресурса и срока службы ТС на основе показателя потока отказов, на наш взгляд, выглядит более достоверным, поэтому конечные результаты технической диагностики наиболее рационально представлять через этот показатель или коэффициенты, равнозначные с ним.

Представление технического состояния трубопровода через коэффициент аварийно-опасности  $\lambda$  с использованием результатов статистического анализа по течам позволяет учесть совместное влияние уровня напряжений в местах коррозионного утонения и изменения прочностных свойств металла. Для этого в анализ предлагается ввести параметр скорости коррозии, как один из перспективных для дальнейших направлений исследований. Современные методики предлагают определять его по результатам сравнения тепловизионной съёмки за разные промежутки времени. Однако для подземной прокладки этот метод не даёт точных данных о зависимости между скоростью коррозии трубы под слоем земли и температурой на поверхности грунта над теплотрассой, так как определяющими факторами являются не только теплопоступления от труб, но и время года, влажность и состав грунта, глубина залегания, утечки и т.п.

Сегодня невозможно однозначно выделить точные и надежные методы диагностики фактического состояния трубопроводов в процессе их эксплуатации. Согласно требований [2], допустимую скорость внутренней коррозии следует принимать 0,085 мм/год (при условии соблюдения качества теплоносителя, соответствующего нормам химводоподготовки [10]), скорость наружной коррозии не должна превышать 0,03 мм/год.

Основным показателем эффективности эксплуатации ТС является удельная повреждаемость оборудования и трубопроводов  $n_c = N_c / M_c$ , шт./м<sup>2</sup> как отношение количества повреждений за год  $N_c$  на 1 м<sup>2</sup> материальной характеристики трубопроводов сети  $M_c$ , просуммированной по всей сети в целом. Повреждаемость зависит от срока эксплуатации оборудования, условий прокладки трубопроводов, уровня давления в тепловой сети, качества сетевой воды, соответствия производительности химической водоподготовки и способа обработки подпиточной воды.

Структура общей повреждаемости характеризуется удельными показателями: а) по месту возникновения повреждений: трубопроводы –  $n_{tc} = N_{tc} / M_c$ , шт./м<sup>2</sup>; арматура –  $n_{ac} = N_{ac} / M_c$ , шт./м<sup>2</sup>; б) по причинам повреждения трубопроводов: наружная коррозия –  $n_{nc} = N_{nc} / M_c$ , шт./м<sup>2</sup> (состояние прокладок и каналов); внутренняя коррозия –  $n_{vc} = N_{vc} / M_c$ , шт./м<sup>2</sup> (качество обработки подпиточной воды); в) по условиям возникновения повреждений: в период эксплуатации –  $n_{эc} = N_{эc} / M_c$ , шт./м<sup>2</sup>; при опрессовках –  $n_{oc} = N_{oc} / M_c$ , шт./м<sup>2</sup>.

Значение удельной повреждаемости  $n_c$  участка рассчитывается по формуле:

$$n_c = \frac{N_{tc} + N_{ac} + N_{nc} + N_{vc} + N_{эc} + N_{oc}}{M_c} = n_{tc} + n_{ac} + n_{nc} + n_{vc} + n_{эc} + n_{oc}.$$

Таким образом, техническая диагностика должна проводиться наиболее подходящими по условиям эксплуатации и дающими достоверный результат методами, что позволит формализовать выбор очередности участков тепловых сетей при составлении планов реконструкции и капитального ремонта.

**Выводы.** В настоящее время не представляется возможным однозначно утверждать о существовании единого высокоэффективного метода диагностики фактического состояния трубопроводов тепловых сетей в процессе их эксплуатации, который бы сочетал простоту, широкий диапазон применения и достоверность результатов. Поэтому на предприятиях тепловых сетей до сих пор используются несколько видов технической диагностики, достоверность которых проверяется в ходе визуально-измерительного контроля, выборочной ультразвуковой толщинометрии и других методов.

Более продуктивным представляется сочетание уже опробованных методов диагностики трубопроводов с активным поиском и апробацией новых методов неразрушающего контроля и алгоритмов обработки полученной информации. Критериями для принятия решения о допустимости дальнейшей эксплуатации трубопроводов или проведения различных видов ремонтных работ являются результаты статистического анализа технической диагностики. Анализировать статистику повреждаемости трубопроводов предлагается с учетом удельной повреждаемости и динамики возрастания количества дефектов, а также коэффициентов вероятности образования течей, потока отказов, надежности и аварийно-опасности, что позволит своевременно и обоснованно включать участки тепловых сетей в планы ремонта.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сведения о суммарной мощности источников теплоснабжения, форма 6-ТП. Росстат РФ, 2020-2022 гг. [Электронный ресурс] / ФСГС: [Сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Jkh3.xlsx> (дата обращения: 09.10.2023).
2. СП 124.13330.2012. Свод правил. Тепловые сети / Минрегион России. – Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003: введен 01.01.2013. – Москва : ФАУ ФЦС, 2012. – 74 с.
3. Стенников, В. А. Теплоснабжение потребителей в условиях рынка: современное состояние и тенденции развития / В. А. Стенников, А. В. Пеньковский // ЭКО. – 2019. – №3. – С. 8–20.
4. Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2014-2018 годах // [Электронный ресурс] / Минэнерго России: [Сайт]. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/17737> (дата обращения: 09.10.2023).
5. Официальный сайт ГУП ДНР «ДОНБАССТЕПЛОЭНЕРГО» [Сайт]. – URL: <https://dtedn.ru/> (дата обращения 09.10.2023).
6. Дёмина, О. В. Регулирование теплоэнергетики в России: реакция локальных рынков / О. В. Дёмина // Пространственная экономика. – 2017. – № 3. – С. 62-82.
7. Исследование причин и выявление доминирующих механизмов разрушения сильфонных компенсаторов теплофикационных трубопроводов ОАО “МОЭК” / Г.В. Томаров, А.Э. Николаев, В.Н. Семенов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2015. – № 6. – С. 72–79.
8. 4th generation district heating (4GDH) integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems / H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire [et al.] // Energy. – 2014. – V. 68. – P. 1–11.
9. Сафьянц, С. М. Определение необходимой толщины теплоизоляционного слоя / С. М. Сафьянц, Ю. Р. Патана, С. В. Гридин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 68-72. – EDN CXEF1Y.
10. Балабан-Ирменин, Ю. В. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей / Ю. В. Балабан-Ирменин, В. М. Липовских, А. М. Рубашов. – М.: Новости теплоснабжения, 2008. – 287 с.
11. Андреева, С. А. Инновационные методы диагностики тепловых сетей / С. А. Андреева // Электронный журнал ЭНЕРГОСОВЕТ. – 2017. – № 4. – С. 17-24.
12. Результаты применения ретроспективного анализа для гидравлических испытаний систем централизованного теплоснабжения / С. В. Чичерин, А. В. Жуйков, А. И. Матюшенко, В.А. Кулагин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – № 14(6). – С. 623–640.
13. Матвеев, В. И. Последствия проведения гидравлических испытаний и альтернативные пути обеспечения надежной эксплуатации тепловых сетей / В. И. Матвеев, С. Я. Алибеков // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 8 (84). – 3 с.
14. Анализ влияния скорости коррозии на изменение конструктивной прочности труб тепловых сетей и установление кинетической зависимости влияния этих изменений на уровень напряжений при рабочих и испытательных давлениях / В. Г. Плешивцев, Ю. А. Пак, М.В. Глухих [и др.] // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2009. – № 3. – С.43–51.
15. Звягинцев, М. Ю. Поиск утечек в трубопроводах тепловых сетей, имеющих ППУ изоляцию / М. Ю. Звягинцев // Новости теплоснабжения. – 2015. – №4 (179). – 3 с.
16. Система оперативного дистанционного контроля трубопроводов пенополиуретановой изоляции // [Электронный ресурс] / СТС Изоляция: [Сайт]. – URL: [http://www.stscom.ru/sts/product/?id\\_product=17](http://www.stscom.ru/sts/product/?id_product=17) (дата обращения: 09.10.2023).
17. Теплоснабжение: учебник для вузов / А. А. Ионин, Б. М. Хлыбов, В. Н. Братенков, Е. Н. Терлецкая. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с
18. МДК 4-01.2001. Методические рекомендации по техническому расследованию и учету технологических нарушений в системах коммунального энергоснабжения и работе энергетических организаций жилищно-коммунального комплекса : дата введения 2001-08-20 / разработан Российским акционерным обществом «Роскоммунэнерго» // Электронный фонд правовой и нормативнотехнической документации «Техэксперт». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200013118> (дата обращения 09.10.2023).

19. Методические указания по анализу показателей, используемых для оценки надежности систем теплоснабжения: дата введения 2013-07-26 / разработан Минрегион России // Электронный фонд правовой и нормативнотехнической документации «Техэксперт». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/499038726> (дата обращения 09.10.2023).
20. Самойлов, Е. В. Диагностика трубопроводов тепловых сетей как альтернатива летним опрессовкам / Е. В. Самойлов // ЖКХ Журнал руководителя и главного бухгалтера. – 2003. – №4. – 3 с.
21. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебное пособие / Е. Я. Соколов. – М.: МЭИ, 2012. – 472 с.

*Поступила в редакцию 11.03.2024 г., рекомендована к печати 08.04.2024 г.*

#### ANALYSIS OF METHODS FOR DIAGNOSING PIPELINES OF HEATING NETWORKS TO DETERMINE THEIR ACTUAL TECHNICAL CONDITION

**Gridin S.V., Biriukov A.B.**

The article is devoted to the actual problem of assessing the technical condition and accurate forecasting of the residual service life of pipelines of heating networks. A brief analysis of the existing statistical data and scientific research on the problem under consideration is given. The features of the application of various diagnostic methods are analyzed and the key ones for assessing the reliability of heating networks are highlighted. It is established that in order to timely and reasonably include sections of heating networks when drawing up reconstruction and overhaul plans based on the results of technical diagnostics, it is necessary to analyze statistics on damage to equipment and pipelines, taking into account the value of specific damage and the dynamics of increasing the number of defects, the probability coefficients of leaks, the failure rate, reliability and emergency hazard.

**Keywords:** diagnostics, heating network, pipeline, corrosion, stresses in metal, emergency hazard, failure rate, service life, non-destructive testing, defect, accident.

**Гридин Сергей Васильевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: gridin@donntu.ru

**Gridin Sergei Vasilevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Industrial Heat and Power Engineering of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Бирюков Алексей Борисович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

**Biriukov Aleksei Borisovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ НА БАЗЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН, ВЫВОДИМЫХ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2024 *Гридин С.В., Варакута В.В., Максименко Д.И.*

---

В статье рассматривается возможность и актуальность производства электроэнергии с использованием в качестве первичного источника геотермального тепла выводимых из эксплуатации обводнённых нефтегазодобывающих скважин. Оценена энергетическая и экономическая целесообразность продления срока эксплуатации скважин в геотермальном режиме.

**Ключевые слова:** геотермальная скважина, добыча нефти и газа, альтернативные источники энергии, обводненная скважина, электрогенерация, геотермальная электростанция.

---

**Введение.** Стремительный рост энергопотребления и бурно развивающееся производство электроэнергии при ограниченности невозобновляемых природных ресурсов и росте цен на них, а также сопутствующих экологических проблемах при их добыче, вынуждают задуматься о поиске и освоении нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. К тому же современные электростанции - это крупные сооружения, поэтому намечается тенденция вынесения их за пределы городов, что неизбежно приводит к увеличению площадей земель, занимаемых под линии передачи энергии к потребителю. Очевидно, что рост производства электроэнергии на основе традиционных источников энергии должен вскоре затормозиться, и необходимы более совершенные методы ее выработки и распределения.

В этом отношении особого внимания заслуживает применение практически неистощаемых геотермальных ресурсов (суммарная геотермальная энергия, поступающая из недр Земли к ее поверхности, оценивается примерно в 32 тыс. ГВт). На глубине до 5 км количество тепла во много раз превышает потенциальную энергию всех существующих запасов полезных ископаемых (нефти, газа, угля, торфа). При этом тепло недр, скрытое на территории одной только России, эквивалентно теплу, образующемся при сжигании более 990–1015 тонн условного топлива.

В настоящее время интерес к геотермальной энергии проявляется еще и потому, что она представляет собой новый, наиболее безопасный для окружающей среды и не загрязняющий её источник электроэнергии. Поэтому, особенно при обсуждении экономичности геотермальных систем, предполагают, что тепловая энергия будет полезной, если она доставляется на поверхность при температуре, достаточно высокой, чтобы обеспечить работу генераторов электроэнергии. Минимальная температура, необходимая для работы геотермальной электростанции (ГеоЭС), равна 260°C, хотя имеются системы, действующие при более низких температурах, например, системы с изобутановым циклом, работающие при температуре 170°C и ниже. Непосредственное использование геотермальных теплоносителей с невысокой температурой значительно увеличивает эффективность геотермальных энергосистем.

Поэтому перевод выводимых из эксплуатации обводнённых добычных нефтегазовых скважин в геотермальный режим с целью электрогенерации для обеспечения цикла нефтегазодобычи электроэнергией, вырабатываемой с использованием собственных, бесплатных ресурсов, не приобретая её по закупочным ценам от внешнего источника ТЭС, является актуальным на сегодняшний день.

**Постановка задачи.** Традиционный способ получения геотермальной энергии предполагает прямой доступ к источнику тепла с выводом теплоносителя по скважинному каналу. При реализации фонтанного метода происходит самоизливание ресурса за счет внутреннего давления скопившегося в недрах пара. Добыча с применением насосных станций применяется в ситуациях, когда второй вариант с самостоятельным доступом к скважине практически нереализуем. Геоциркуляционный метод характеризуется тем, что полностью отработанный ресурс отправляют обратно в земные недра.

При рассмотрении принципа работы ГеоЭС важно учитывать существующие методы получения электроэнергии. В соответствии с состоянием используемого энергоносителя в геотермальной практике различают три способа и три типа ГеоЭС, соответственно: прямой доступ на геотермальной паровой электростанции, при реализации которого для вращения турбин используется сухой пар; непрямой метод на гидротермальной электростанции, предполагающий применение водяного пара с рабочей температурой более 150°C; бинарный или смешанный способ с двойным рабочим циклом на геотермальной электростанции с бинарным циклом, при котором в горячую жидкую среду добавляется особый хладагент.

При этом принцип работы ГеоЭС во всех рассмотренных случаях один: турбина вращает ротор электрогенератора, который вырабатывает электрический ток нужного качества и величины, поступающий в нагрузку потребителя. Отработанный пар через скважину нагнетания возвращается обратно в недра. Впервые в мире пар геотермального происхождения был использован для выработки электроэнергии на паросиловой установке в 1904 году в итальянском городе Лардерелло. Принцип работы электростанции был основан на закачивании воды под землю через нагнетающую скважину. Вода под воздействием тепла земных слоев превращается в пар, пар накапливается и под давлением через вторую эксплуатационную (добывающую) скважину вырывается наружу и попадает на лопасти турбины, соединенной с осью электрогенератора. В настоящее время ГеоЭС «Лардерелло» в Италии продолжает работать и имеет мощность около 400 МВт.

Суммарная установленная мощность геотермальных электростанций в мире на начало 90-х годов прошлого века составляла уже около 5 ГВт. В 2000 году в Японии прошел Всемирный геотермальный конгресс, в котором участвовало около 2 тыс. человек из 43 стран. Конгресс подтвердил: во всем мире возрастает использование геотермальных ресурсов. ГеоЭС работали более чем в 20 странах, их суммарная установленная мощность составляла около 8 ГВт и было выработано около 50 ГВт·ч электроэнергии. Освоение тепла недр происходило весьма активно: с 1995 по 2000 гг. было пробурено 1165 скважин глубиной более 100 м. Лидерами освоения стали Филиппины - 682 МВт, Индонезия - 280 МВт, Италия - 153 МВт, Новая Зеландия - 151 МВт, и ряд других государств [1].

В первые годы XXI столетия в мире уже работали 233 ГеоЭС, их суммарная мощность составляла 5,136 ГВт, были построены ещё 117 станций общей мощностью 2,017 ГВт. Ведущее место в мире в то время занимали США (более 40% действующих мощностей). На ГеоЭС Филиппинских островов установленная мощность составляла около 1930 МВт, в Исландии – 790 МВт, в Мексике – 953 МВт, в Италии – 500 МВт, в России – 21 МВт. В конце 2008 года суммарная мощность геотермальных электростанций планеты выросла до 10,5 ГВт [1]. В 2010 г. в мире суммарная мощность геотермальных электростанций составляла около 10,71 ГВт, а геотермальных систем теплоснабжения – около 20 МВт. По состоянию на 2022 г. общая мощность геотермальных электростанций в 83 странах мира превышает 13 ГВт.

Запасы геотермальной энергии в России составляют  $19,75 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> в сутки. Освоение этих запасов началось в 1966 г. на Камбальном месторождении парогидротерм, находящемся в юго-западном окончании Камчатского полуострова (пос. Паужетка) в долине одноименной речки, где была построена первая в мире экспериментальная Паужетская геотермальная электростанция [2] для обеспечения дешевым термальным электричеством рыбоперерабатывающих заводов и ближайших поселков, а также горячей водой для отопления домов и обогрева теплиц. Паужетская ГеоЭС оборудована собственной системой водозабора и сброса охлажденной жидкости. В цикле подготовки теплового носителя задействовано восемь скважин, функционирующих в прерывающемся режиме, на которых установлены скважинные сепараторы. Реальная мощность ГеоЭС первоначально составляла всего 5,8 МВт, в 1982 году она была увеличена до 11 МВт.

ОАО «Паужетская ГеоЭС» превратилась в те годы в научно-исследовательский полигон, на котором изучались возможности геотермальной энергетики. Именно на ней были изучены и внедрены в практику передовые разработки сотрудников научно-учебного центра геотермальной энергетики МЭИ. В конце 60-х годов были исследованы основы создания турбинной ступени-сепаратора, разделителя пароводяной смеси на фракции. Успешно решались проблемы нейтрализации агрессивных составляющих геотермального пара, выяснялись причины повреждения рабочих лопаток и дисков турбин, создавались методы защиты металлических деталей от коррозии и т.д. Также изучались возможности создания более эффективных ГеоЭС с использованием некондиционных скважин, исследовались перспективы бинарных установок, позволяющих получать электроэнергию непосредственно из горячей воды вблизи точки кипения (подобная схема используется на Паужетской ГеоЭС), рассматривались экологически чистые технологии, исключая выбросы конденсата, продуктов сепарации в атмосферу и т.д.

Первая в мире Паратунская бинарная электростанция с двойным рабочим циклом [2, 3], использующая для получения электричества более низкие температуры, чем обычно (до 57°C, для производства электроэнергии обычно требуется повышенная температура – от 150°C), была изобретена и построена в 1967 г. в России в 70 км от Петропавловска-Камчатского. Станция проработала 2000 часов в экспериментальном режиме с 1967 по 1969 г.г. Согласно тепловой схеме станции, сухой пар из геотермальных источников через добывающую скважину проходит через теплообменник с рабочей средой, где происходил нагрев рабочей жидкой среды, в которую добавлялся особый хладагент. Охлажденный пар через скважину нагнетания возвращался обратно в источник. Горячая рабочая жидкая среда с хладагентом напрямую поступала на турбину, питающую электрогенератор, и после охлаждения поступала обратно в теплообменник. На рис. 1 показана тепловая схема ГеоЭС бинарного цикла. Рабочим телом второго контура является низкокипящий теплоноситель (НТ) изобутан, что даёт возможность использования геотермальных ресурсов с пониженной температурой для выработки электроэнергии [4].

Разработаны проекты ТЭЦ, в которых решается задача повышения эффективности работы тепловой схемы, в замкнутом контуре которой используется НТ. Способ усовершенствования тепловой схемы – реализация второго каскада параллельно сетевой установке. В качестве НТ второго каскада выбран фреон, который наиболее подходит по термодинамическим и экологическим показателям. Проведенные предварительные расчетные исследования показали, что за счет применения второго каскада электрическая мощность установки увеличивается почти вдвое [5].



За десять лет с 2010 по 2020 г.г. доля геотермальной энергии в общем объеме выработки электроэнергии России выросла в шесть раз — с 0,05 до 0,3%. Установленная мощность российских геотермальных станций сегодня достигла 74 МВт.

Очевидно, что доля когенерации геотермальными ЭС в общем балансе производства энергии будет расти как в России, так и в других странах, где есть в наличии геотермальные источники и буровые скважины, пригодные для производства и использования геотермальной энергии. С учетом современного уровня техники бурения следует также предположить, что для достижения достаточно горячей породы, по-видимому, нецелесообразно бурение скважин глубиной более 6 км. Например, шведская компания «E.ON», планирует возвести до 2028 г. 5 геотермальных станций со скважинами глубиной 5–7 км, общая тепловая мощность которых составит 250 МВт [7]. Отработанное тепло от ГеоЭС будет рассеиваться в атмосферу теплообменниками с принудительным воздушным охлаждением. Они дороже градирен, но позволяют сберегать значительное количество воды и не допускать тепловое загрязнение водоёмов. Стоимость станций, включая сооружение подземной циркуляционной системы, предварительно оценивается в 186 долл./кВт производимой мощности, а стоимость выработки электроэнергии составляет около  $4,7 \cdot 10^{-3}$  долл./кВт·ч на сборательных шинах, то есть, система сможет конкурировать с АЭС и ТЭС.

Вместе с тем в настоящее время одним из условий технологии добычи нефти и газа является то, что большая часть добычных нефтегазовых скважин в третьей и четвёртой стадии эксплуатации месторождения становятся обводнёнными и не обеспечивают дебита продукта. Поэтому вопрос о максимально возможных дебитах скважин является ещё одним вопросом, требующим специальных обсуждений и исследований для решения проблемы, тормозящей развитие геотермальной энергетики. Основное техническое решение, используемое при этом – вывод обводнённых скважин из эксплуатации путём консервации либо глушения. Геолого-физические характеристики современных месторождений таковы, что продуктивные пласты залегают на глубине 4...5 км, температура вмещающих пород достигает 90...100°C, а длина эксплуатируемых скважин может превышать 10 км (например, месторождение «Сахалин-2»). Поэтому целесообразно обводнённые добычные скважины переводить в геотермальный режим с целью получения в конечном итоге электроэнергии.

**Основная часть.** Целью работы является оценка возможности перевода обводнённых нефтегазовых скважин, выводимых из эксплуатации, в геотермальный режим для использования в качестве первичного источника при производстве электроэнергии непосредственно на месторождении.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить запасы геотермальной энергии месторождения, которые могут быть использованы для производства электроэнергии;
- разработать схему трансформации низкопотенциальной геотермальной теплоты (НГТ) в электрическую;
- определить мощность электрогенерации, приведенную к среднестатистическому кусту нефтяного месторождения, исходя из запасов геотермальной энергии и укрупнённых характеристик энергетической эффективности предложенной схемы.

Посредством укрупнённого расчёта определим запасы геотермальной энергии для среднестатистического месторождения района Нефтеюганска [8]. В данных условиях, учитывая наличие водоносных пластов и технологической воды, применяемой для нефтедобычи, возможно использование двух способов отбора теплоты.

Первый способ. Отбор петрагеотермальной НГТ. Мощность потока НГТ  $Q_1$  в первом варианте можно оценить, как:

$$Q_1 = 70 \cdot L_{скв} = 70 \cdot 4000 = 280 \text{ кВт},$$

где 70 – удельное количество теплоты, которое может быть отобрано от вмещающих пород, Вт/пм;  $L_{скв}=4000$  м – среднестатистическая усреднённая длина скважины рассматриваемых месторождений.

Второй способ. Отбор гидрогеотермальной НГТ. Мощность потока НГТ  $Q_2$  во втором варианте составляет:

$$Q_2 = G \cdot C \cdot \Delta T = 0,51 \cdot 4205 \cdot 98 = 210,166 \text{ кВт},$$

где  $G = 0,51$  кг/с – секундный дебит скважины;  $C = 4205$  Дж/кг·К – удельная теплоёмкость воды при 90°C;  $\Delta T = 98$  К - разница между температурой воды на выходе из скважины и среднегодовой температурой атмосферного воздуха.

Тогда суммарная мощность теплового потока НГТ одной скважины составит:

$$Q_{сум} = Q_1 + Q_2 = 280,0 + 210,166 = 490,166 \text{ кВт}.$$

Тепловыми потерями при транспортировке теплоносителя по каналу скважины для определения укрупнённых запасов геотермального тепла на данном этапе можно пренебречь, поскольку современные теплоизоляционные материалы при температурном потенциале в 115°C позволяют удерживать тепловые потери в трубопроводах в пределах 1% на 1 км длины скважины.

Для производства электроэнергии может быть применена схема двухконтурного электрогенерирующего комплекса (рис. 2) с отдельным подводом теплоты к каждому контуру от источников с разной температурой, регенерацией теплоты, отводимой от первого контура, при отсутствии массообмена между контурами. Первый контур представляет собой традиционную паротурбинную установку (ПТУ) замкнутого цикла на низкокипящем рабочем теле. Второй контур - гравитационная установка (Гру).

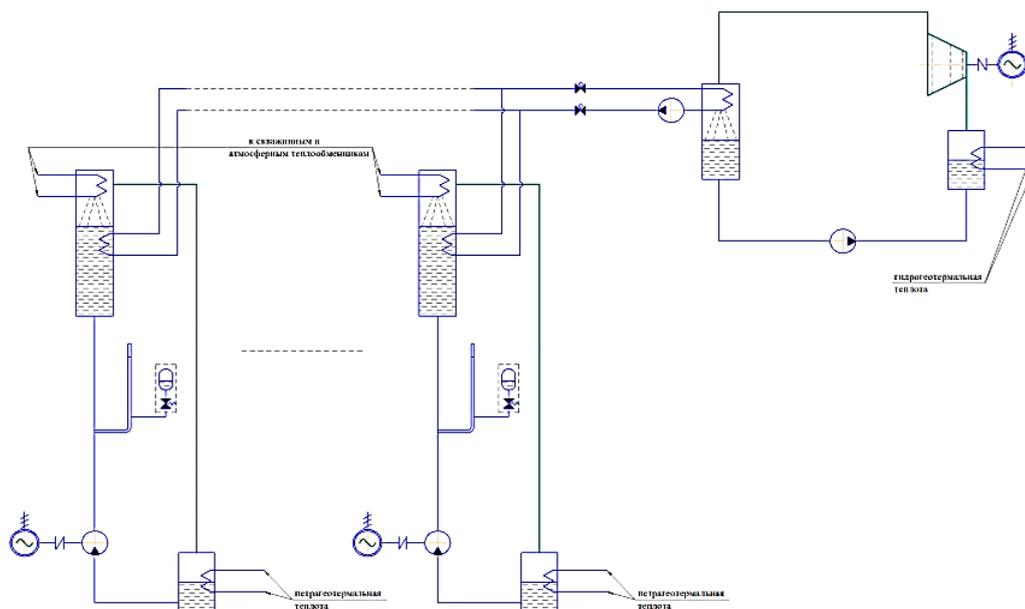


Рис. 2. Схема двухконтурного электрогенерирующего комплекса

Оборудование ПТУ устанавливается непосредственно на кустовой площадке (рис. 3). Подвод гидрогеотермальной НГТ к ПТУ осуществляется теплоносителем (водой), поступающим от всех обводнённых скважин куста, проходящим через продуктивный пласт. Оборудование ГрУ устанавливается в направляющем интервале и на устье каждой обводнённой скважины. Подвод петрагеотермальной НГТ к нижнему теплообменнику ГрУ осуществляется теплоносителем (водой), циркулирующим по внутренней трубе и в пространстве между наружной трубой эксплуатационной колонны и обсадной трубой. Подвод теплоты, отводимой от ПТУ, также осуществляется теплоносителем (водой), поступающим через стандартное устьевое оборудование к верхнему теплообменнику ГрУ. В источнике [4] обосновано, что КПД ПТУ составляет не менее 10%, а КПД ГрУ – 4%.



Рис. 3. Куст нефтяного месторождения

Принимаем: схема куста семиточечная - одна скважина нагнетательная, остальные добычные; на третьей и четвёртой стадии эксплуатации месторождения все добычные скважины обводнены более чем на 95% и должны быть выведены из эксплуатации. Тогда электрическая мощность  $N_{ПТУ}$ , вырабатываемая ПТУ, определяется как:

$$N_{ПТУ} = Q_2 \cdot n_D \cdot \eta_{ПТУ} = 210,166 \cdot 6 \cdot 0,1 = 126,1 \text{ кВт},$$

где  $n_D$  – количество добычных скважин куста;  $\eta_{ПТУ} = 0,1$  - КПД ПТУ.

Электрическая мощность  $N_{ГрУ}$ , вырабатываемая ГрУ куста:

$$N_{ГрУ} = [Q_1 \cdot n_D + K_{сез} \cdot Q_2 \cdot n_D \cdot (1 - \eta_{ПТУ})] \cdot \eta_{ГрУ} = [280 \cdot 6 + 0,6 \cdot 210 \cdot 6 \cdot (1 - 0,1)] \cdot 0,04 = 94,4 \text{ кВт},$$

где  $K_{сез}$  – сезонный коэффициент регенерации теплоты, так как теплота, отводимая от контура ПТУ, может быть регенерирована только при температуре атмосферного воздуха ниже  $+12^\circ\text{C}$ , для района Нефтеюганска принимаем  $K_{сез} = 0,6$ ;  $\eta_{ГрУ} = 0,04$  - КПД ГрУ.

Суммарная мощность электрогенерации кустового двухконтурного электрогенерирующего комплекса  $N_{\Sigma}$ :

$$N_{\Sigma} = N_{ПГУ} + N_{ГрУ} = 126,1 + 94,4 = 220,5 \text{ кВт},$$

Мощность электрогенерации, приведенная к одной скважине:

$$N_{\Sigma} = \frac{N_{\Sigma}}{n} = \frac{220,5}{7} = 31,5 \text{ кВт}.$$

Например, для небольшого нефтегазового месторождения с фондом скважин 450 шт. в конце срока эксплуатации мощность электрогенерации достигнет 14,17 МВт, что с излишком обеспечивает эксплуатационные потребности месторождения в электроэнергии.

В перспективе возможно создание комбинированного энергогенерирующего комплекса, в котором схема двухконтурного электрогенерирующего комплекса дополнена энергогенерирующей станцией с использованием альтернативной схемы генерации электрической энергии на базе термоэлектрических и термоэмиссионных явлений [9], которая, работая параллельно с ПГУ, позволила бы максимально освоить доступные запасы низкопотенциальной геотермальной теплоты и обеспечить децентрализованное снабжение цикла нефтегазодобычи электроэнергией собственной выработки.

**Выводы.** На основе представленных в работе результатов сделаны следующие выводы:

В конце срока эксплуатации, при исчерпании запасов полезного ископаемого инфраструктура нефтегазодобычи может быть постепенно (на третьей и четвертой стадии эксплуатации месторождения) переведена в режим геотермальной электростанции, капитальные затраты на сооружение которой уже на 90% окупилась предыдущим процессом нефтегазодобычи.

Внедрение предложенной технологии позволяет улучшить экономические показатели нефтегазодобычи на третьей и четвертой стадии эксплуатации месторождения, так как способно обеспечить цикл нефтегазодобычи электроэнергией, вырабатываемой с использованием собственных, бесплатных ресурсов, не приобретая её по закупочным ценам от внешнего источника ТЭС.

Использование предложенного технического решения позволяет перевести нефтегазодобывающее предприятие на третьей и четвертой стадии эксплуатации месторождения в категорию просьюмера (потребителя, выступающего на стороне предложения) [9].

Реализация предлагаемого способа электрогенерации повышает техническую и экологическую безопасность нефтегазодобычи, так как собственная выработка электроэнергии повышает надёжность энергоснабжения и не связана с выбросами загрязняющих веществ и парниковых газов, поскольку процесс электрогенерации сопровождается круговой циркуляцией теплоносителя на ГеоЭС по системе «скважина – теплосъемные агрегаты – скважина – пласт». Это позволяет предотвратить поступление термальных вод на поверхность земли, в грунтовые воды и поверхностные водоемы, а также обеспечить сохранение пластового давления и исключить оседание грунта и любую возможность сейсмических проявлений.

Снижение потребления электроэнергии от внешнего источника (ТЭС) также повышает экологическую безопасность атмосферы, так как сокращается количество вредных выбросов на ТЭС, образующихся при выработке электроэнергии, потребляемой в процессе эксплуатации объектов нефтегазодобычи.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Geothermal Development Expands Globally [Электронный ресурс] / Renewable Energy World: [Сайт]. – URL: <https://www.renewableenergyworld.com/2009/05/11/geothermal-development-expands-globally/> (дата обращения: 05.11.2023).
2. Манушин, Э. А. Паротурбинная установка геотермальной электростанции бинарного цикла для геотермальных месторождений камчатского края / Э. А. Манушин, В. В. Бирюков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 13. – С. 45.
3. Редько, А. А. Термодинамические параметры геотермальной электрической станции с бинарным сверхкритическим циклом / А.А. Редько // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2009. – № 4. – С. 81–85.
4. Бирюков, А. Б. Двухконтурная энергогенерирующая станция с изменяемыми параметрами рабочего тела второго контура / А. Б. Бирюков, П. А. Гнитиев, В. В. Варакута // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 66-78. – EDN ZELJZJ.
5. Реализация каскадных тепловых схем с применением турбин на низкокипящих рабочих телах / А. Л. Шубенко, А. В. Русанов, А. В. Сенецкий, Р. А. Русанов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2013. – №12(986). – С. 24-29.
6. Паротурбинные установки на низкокипящем рабочем теле / М. Г. Мелкозёров, А. А. Зуев, А. В. Делков, А. А. Ходенков // Научные труды. – 2010. – Вып. 38. – Т. 2. – С. 102–106.
7. Геотермальная станция со скважинами глубиной в 5-7 км начнет работу в Швеции [Электронный ресурс] / E2nergy: [Сайт]. – URL: <https://eenergy.media/2020/04/20/geotermalnaya-stantsiya-so-skvazhinami-glubinoj-v-5-7-km-nachnet-rabotu-v-shvetsii/> (дата обращения: 05.11.2023).
8. Усть-Балыкское нефтяное месторождение [Электронный ресурс] / Нефтегаз: [Сайт]. – URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/142383-ust-balykское-neftyanoe-mestorozhdenie/> (дата обращения: 05.11.2023).
9. Термоэлектрический преобразователь / В. В. Варакута, С. В. Гридин, Д. И. Пархоменко [и др.] // Взрывозащищённое электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ». – Донецк, 2017. – №1. – С. 73–85.

*Поступила в редакцию 02.05.2024 г., рекомендована к печати 20.05.2024 г.*

**POWER GENERATION BASED ON OIL AND GAS WELLS BEING DECOMMISSIONED**

*Gridin S.V., Varakuta V.V., Maksimenko D.I.*

The article discusses the possibility and relevance of electricity production using decommissioned flooded oil and gas production wells as the primary source of geothermal heat. The energy and economic feasibility of extending the life of wells in geothermal mode is assessed.

**Keywords:** geothermal well, oil and gas production, alternative energy sources, flooded well, power generation, geothermal power plant.

**Гридин Сергей Васильевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: gridin@donntu.ru

**Gridin Sergei Vasilevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Industrial Heat and Power Engineering of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Варакута Виктор Владимирович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела электрических машин ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: varakutaviktor@mail.ru

**Varakuta Viktor Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at Integrated Research Department of Electric Machines of Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof and Mining Electrical Equipment,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Максименко Дмитрий Игоревич**

младший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела электрических машин ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: rabota.lyudila2013@yandex.ru

**Maksimenko Dmitrii Igorevich**

Junior Researcher at Integrated Research Department of Electric Machines of Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof and Mining Electrical Equipment,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.

2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.

3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список источников, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты [vestnik.g@mail.ru](mailto:vestnik.g@mail.ru) высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.

4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.

5. Обязательные требования к оформлению статей:

- **Размер бумаги:** А4.
- **Ориентация:** книжная.
- **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
- **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
- **Междустрочный интервал:** одинарный.
- **Абзацный отступ:** 1 см.
- **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Аннотация, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела *фамилия(и) и инициалы автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию xx.xx.20xx г., рекомендована к печати xx.xx.20xx г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *фамилия(и) и инициалы автора(ов)*, аннотация и ключевые слова (*Keywords*) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
  - **Фамилия, имя, отчество;**
  - ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
  - страна, город;
  - адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 681.5:621.377

## ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ АСНИ КОНТРОЛЯ РАДИООБСТАНОВКИ

© 2024 Третьяков И.А., Данилов В.В.

---

Приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта. Приведен механизм формирования фоннного эха.

**Ключевые слова:** АСНИ, радиообстановка, эхо-эффект, фоннное эхо, обработка радиосигналов.

---

**Введение.** Важнейшим элементом современной концепции [1-3] ...

**Механизм формирования сигналов.** Электрическая компонента первого [4] ...

**Выводы.** Таким образом, рассмотренные элементы позволяют ...

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, С. В. Борщевский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 34-39. – EDN CADMAM.
2. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PHCERN.
3. Автоматизированные системы научных исследований [Электронный ресурс] / Studbooks : [Сайт]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (дата обращения 25.01.2024).

*Поступила в редакцию xx.xx.2024 г., рекомендована к печати xx.xx.2024 г.*

### ELEMENTS OF COMPUTING DEVICES FOR ASRS CONTROL OF RADIO PLACEMENT

*Tretiakov I.A., Danilov V.V.*

The descriptions of the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated systems for scientific research of radio control based on the echo effect are given. The mechanism of phonon echo formation is given.

**Keywords:** ASRS, radio substitution, echo effect, phonon echo, radio signal processing.

#### **Третьяков Игорь Александрович**

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

#### **Tretiakov Igor Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

#### **Данилов Владимир Васильевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: ut5iv@mail.ru

#### **Danilov Vladimir Vasilevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

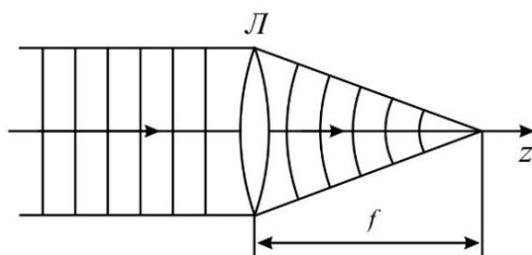


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F<sub>3</sub>

Элемент	Номинал	Единица измерения
C <sub>out</sub>	25	пФ
C <sub>1</sub>	10	нФ
C <sub>2</sub>	100	мкФ
L <sub>1</sub>	150	мкГн
L <sub>2</sub>	460	нГн
L <sub>3</sub>	765	нГн
R <sub>1</sub>	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t \quad (1)$$

10. Материалы предоставляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

**Главный редактор:** Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

**Зам. главного редактора:** Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

**Ответственный секретарь:** Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

**Контактный тел.:** +7 (856) 302 07 81

**E-mail:** [vestnik.g@mail.ru](mailto:vestnik.g@mail.ru)

*Научное издание*

**Вестник Донецкого национального университета.  
Серия Г: Технические науки**

**– 2024. – № 2.**

Научное и техническое редактирование: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

---

Адрес редакции:

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

Тел.: +7 (856) 302 07 81

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

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

---

Подписано в печать 31.05.2024 г.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 10,81.

Тираж 100 экз.

Бесплатно.

Издательство ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»  
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.

Тел.: +7 (856) 302 92 27.